

---

# Régimes de réponse de structures en béton armé impactées par des avalanches de neige

Ousset I.<sup>1</sup>, Bertrand D.<sup>2</sup>, Thibert E.<sup>1</sup>, Limam A.<sup>2</sup>, Naaïm M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Grenoble Alpes, Irstea, UR ETGR, mail : [isabelle.ousset@irstea.fr](mailto:isabelle.ousset@irstea.fr)

<sup>2</sup> INSA Lyon, LGCIE, mail : [david.bertrand@insa-lyon.fr](mailto:david.bertrand@insa-lyon.fr)

---

*RÉSUMÉ. Cet article traite du comportement de structures en béton armé (BA) sous l'effet de chargements d'avalanche de neige. L'approche pression-impulsion proposée permet de mettre en exergue trois types de comportement théoriques en fonction de l'impulsion du chargement. En pratique, si l'on confronte les diagrammes obtenus pour deux types de structure à des données réelles de signaux de pression d'avalanche, on s'aperçoit que la structure de protection de type mur en L étudiée ici est susceptible de se comporter de façon quasi-statique alors qu'une structure de type poteaux-poutres aurait tendance à se comporter de façon dynamique.*

*ABSTRACT. This article deals with the behaviour of reinforced concrete civil engineering structures submitted to snow avalanches. The proposed pressure-impulse approach allows highlighting three theoretical types of behaviour: quasi-static, dynamic and impulsive. In practice, by comparing the pressure-impulse diagrams of two studied structures with real avalanche pressure signals, we see that the L-shaped protective structure studied here behaves rather in a quasi-static way while a post-and-beam structure would tend to behave in a dynamic way.*

*MOTS-CLÉS : génie civil, béton armé, avalanche de neige, éléments finis, diagrammes pression-impulsion.*

*KEYWORDS: civil engineering, reinforced concrete, snow avalanche, finite elements, pressure-impulse diagrams.*

---

## 1. Introduction

En l'absence de connaissances suffisantes sur l'effet dynamique des avalanches sur le comportement de structures de génie civil en béton armé (BA), ces dernières sont encore pour la plupart dimensionnées suivant une approche statique avec introduction paliative de coefficients de sécurité [GIV 04]. Le chargement issu d'une avalanche étant un champ de pression évoluant au cours du temps, on peut cependant s'attendre à des réponses structurelles différentes suivant la vitesse de chargement ou plus généralement suivant les caractéristiques temporelles/fréquentielles du signal. Dans le cadre de l'étude de structures complexes, [BER 07] et [DAU 13] considèrent ainsi que les effets inertiels sont à prendre en compte. Dans le cas de l'étude de fiabilité de murs représentant le bâti, [BER 10] et [FAV 14a, FAV 14b] font par contre l'hypothèse d'un comportement quasi-statique. Par ailleurs, les structures type pylône font l'objet de chargements particuliers pour les avalanches [SOV 16]. Cet article s'intéresse donc à l'étude, par la modélisation numérique, du comportement mécanique de structures de génie civil en béton armé soumises à des avalanches de neige et à l'amélioration des approches de dimensionnement associées. L'objectif est de préciser la nature de la réponse de la structure c'est-à-dire préciser dans quelles conditions cette réponse peut être considérée comme quasi-statique ou dynamique.

Un mur BA en forme de L représentatif d'une structure de protection paravalanche [OUS 15b] et une structure de type poteaux-poutres à 3 étages de type bâti [TAT 12] ont été étudiés à l'aide de modèles numériques selon la méthode des éléments finis dans lesquels est introduit un signal de pression de type triangle isocèle. La nature de la réponse de ces structures dépend bien entendu de leurs fréquences propres qui se déduisent en élastique par une analyse modale. Une approche plus approfondie est ici proposée qui permet entre autres de prendre en compte les non-linéarités des matériaux constituant la structure. Le régime de la réponse de la structure est exploré à l'aide d'une approche pression-impulsion plus souvent utilisée dans le cadre des structures soumises à explosion [PAR 10]. Cette approche consiste à construire un diagramme pression-impulsion et plus exactement à tracer, pour différents isodommages correspondant ici à une valeur de déplacement de la structure, des courbes représentant la pression conduisant au critère de comportement retenu en fonction de l'impulsion du signal de pression d'avalanche.

## 2. Méthodes

### 2.1. Structures étudiées

#### 2.1.1. Structure de protection de type mur en L

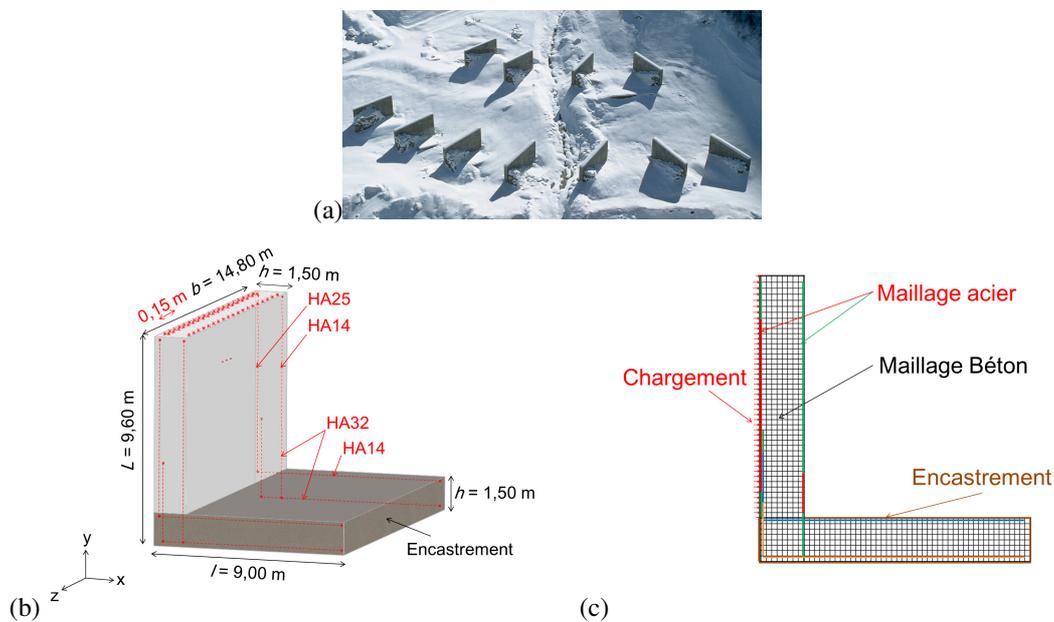
La structure de protection étudiée est constituée d'un voile de hauteur 9,60 m, de largeur 14,80 m et d'épaisseur 1,50 m et d'une semelle de longueur 9,00 m et d'épaisseur 1,50 m (figure 1a). Elle est renforcée par des armatures de diamètres compris entre 14 et 32 mm et espacées en moyenne de 0,15 m dans le sens de la largeur. Elle représente de façon simplifiée une des dents défectives (figure 1b) du dispositif situé dans le couloir de Taconnaz, dont l'objectif est de permettre l'étalement d'un écoulement d'avalanche de neige avant son ralentissement par des tas freineurs et son arrêt final en amont d'une digue frontale. Le choix de cette structure s'explique par le fait que, suite à l'endommagement de deux de ces dents lors d'une avalanche survenue en 1999, un essai sur modèle réduit a été réalisé en laboratoire pour comprendre le mode de rupture de la structure et permettre le calage ultérieur de modèles numériques.

Dans la mesure où l'essai expérimental a montré dans le sens de la largeur (suivant  $z$ ) une symétrie de comportement de la structure, celle-ci est modélisée en 2D sous Cast3M à l'aide d'éléments finis de type quadrilatères à 4 noeuds (QUA4) pour le béton et linéaires à 2 noeuds (SEG2) pour l'acier. La semelle est considérée comme totalement encastree et les lois de comportement du béton et de l'acier sont de type élasto-plastiques avec écrouissage négatif dans le cas du béton et positif dans le cas de l'acier ([OUS 15b, OUS 15a]).

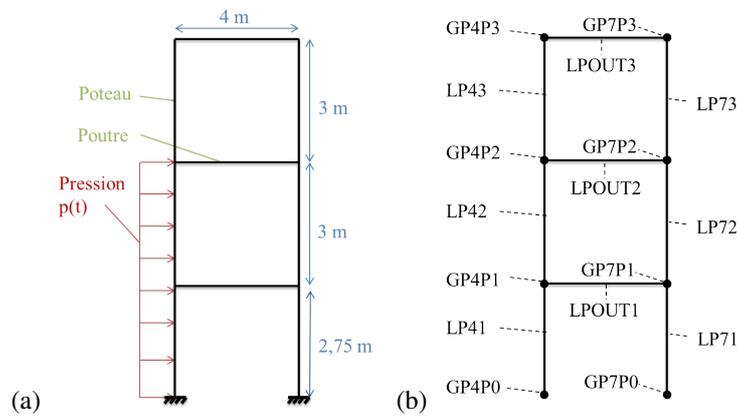
#### 2.1.2. Structure de type poteaux-poutres

La structure poteaux-poutres déjà étudiée dans le cadre sismique par [TAT 11, TAT 12] est un portique constitué d'une baie d'une largeur de 4 m et d'une hauteur de 2,75 m et de deux étages d'une hauteur de 3 m (figure 2).

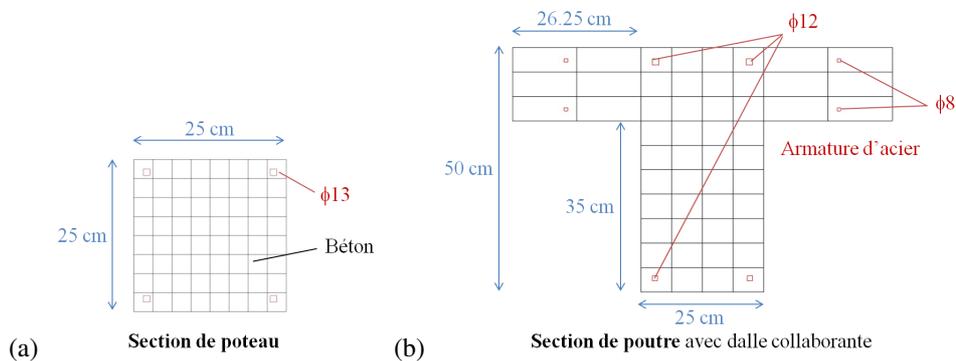
Les colonnes ont toutes la même section 25 cm x 25 cm et sont renforcées par des armatures de diamètre 13 mm (figure 3a). Les planchers contribuent à la rigidité des poteaux par le biais de la section de poutre présentée à la figure 3b. La hauteur de ces poutres est de 50 cm dont 15 cm correspondent à l'épaisseur de la dalle. Des armatures



**Figure 1.** Structure étudiée : (a) Dents déflectrices de Tacomnaz (Photo F. Valla - Irstea) (b) Structure simplifiée (c) Modèle éléments finis



**Figure 2.** Structure poteaux-poutres considérée : (a) dimensions et (b) modèle numérique [TAT 11]



**Figure 3.** Sections de la structure poteaux-poutres : (a) pour les poteaux et (b) pour les poutres [TAT 11]

longitudinales de diamètre 8 et 12 mm assurent le renforcement respectivement des ailes et de la partie centrale de la poutre. Les poteaux, encastres en pied, et les poutres sont modélisés à l'aide d'éléments finis multi-fibres avec une cinématique de type Timoshenko. Les comportements des fibres de béton et d'acier sont décrits à l'aide

respectivement des lois de Hognestad (Béton\_Uni dans Cast3M) et Menegotto-Pinto (Acier\_Uni dans Cast3M) ([TAT 11]).

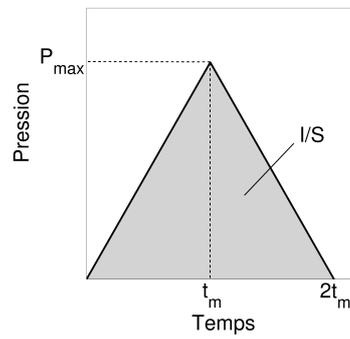
## 2.2. Chargement

Un chargement lié à une avalanche de neige est un champ de pression qui évolue au cours du temps. Le profil de pression retenu ici est un signal synthétique de type triangle isocèle caractérisé par une pression au pic  $P_{max}$  et un temps de montée en charge  $t_m$ , tels que spécifiés à la figure 4. Ce signal peut également être caractérisé par une impulsion qui correspond à la quantité de mouvement transférée par la force appliquée sur la structure à savoir :

$$I = \int_0^{t_{chgt}} F_{ext}(t) dt = S \int_0^{t_{chgt}} P(t) dt \quad (1)$$

où S représente la surface d'application de la sollicitation et est considérée comme constante dans cette étude et P(t) désigne l'évolution temporelle de la pression de chargement. On a donc :

$$I/S = \frac{1}{2} P_{max} t_{chgt} = P_{max} t_m \quad (2)$$



**Figure 4.** Signal avalancheux retenu dans cette étude

Afin de ne pas complexifier le modèle mécanique et augmenter les temps de calcul, la variation spatiale de la sollicitation n'a pas été prise en compte dans la présente étude. Le champ de pression appliqué est ainsi considéré comme homogène sur l'ensemble de la structure et appliqué sur la hauteur totale non encastree de l'ouvrage (figure 1c) dans le cas de la structure de protection et sur les deux premiers étages (figure 2a) dans le cas de la structure de type poteaux-poutres.

## 2.3. Diagramme Pression-Impulsion : Principe et construction

L'approche diagramme pression-impulsion, couramment utilisée dans le domaine de l'explosion, permet de visualiser, sur un même graphique, le comportement de la structure suivant différents cas de charge [PAR 10]. Un tel diagramme représente la pression conduisant à un même niveau de dommage de la structure, pour différentes impulsions.

Ces diagrammes font ressortir trois modes de réponse de la structure suivant le chargement appliqué [PAR 10] :

- mode impulsionnel, pour lequel la réponse de la structure ne dépend pour ainsi dire que de la durée du signal et pas de la pression ;
- mode quasi-statique, pour lequel seule intervient la pression ;
- mode dynamique, qui est un mode intermédiaire où la pression et la durée du signal ont une influence sur la réponse de la structure.

Les diagrammes pression-impulsion sont construits en se fixant une durée de signal (soit, dans le cas présent, en se fixant  $t_m$ ) et en recherchant, par itérations successives, la pression maximale conduisant au niveau de dommage

fixé. Une automatisation de la construction de ces diagrammes est proposée dans cette étude, basée sur les principes suivants :

– discrétisation temporelle :

Afin d'assurer une bonne convergence de l'approche par éléments finis, le pas de temps de calcul  $\Delta t_{FEM}$  est adapté à la vitesse de sollicitation et calculé de manière à conserver un incrément de pression  $\Delta P_{FEM}$  constant pour toutes les simulations soit :

$$\Delta t_{FEM} = \Delta P_{FEM} \frac{t_m}{P_{max}} \quad \text{avec} \quad \Delta P_{FEM} = cte \quad (3)$$

– critère d'atteinte du dommage :

Le critère d'arrêt associé à l'atteinte du dommage fixé  $D_{dom}$  est défini de la manière suivante :

$$\frac{D_{dom} - D_{max}^i}{D_{dom}} \leq 1 \% \quad (4)$$

où  $D_{max}^i$  représente le déplacement maximal atteint lors de la simulation de l'itération  $i$ .

Compte-tenu de la nature non linéaire de l'algorithme de calcul aux éléments finis, des précautions doivent être prises de façon à assurer la convergence de la procédure vers le critère 4. Dans un cas linéaire, la proportionnalité entre déplacement et pression serait assurée et l'évolution de la pression maximale appliquée de façon à converger vers l'isodommage retenu pourrait être calculée selon l'équation 5 :

$$P_{max}^{i+1} = P_{max}^i \left( 1 + \frac{D_{dom} - D_{max}^i}{D_{dom}} \right) \quad (5)$$

où  $P_{max}^{i+1}$  et  $P_{max}^i$  sont les pressions maximales appliquées à l'ouvrage respectivement aux itérations  $i+1$  et  $i$ .

L'algorithme de calcul retenu pour modéliser le comportement de la structure étant dans le cas présent non linéaire, la convergence vers le niveau de dommage recherché  $D_{dom}$  est plus complexe à obtenir. L'idée retenue est dans ce cas de contraindre  $P_{max}^i$  à évoluer dans un intervalle de pression qui encadre la pression produisant  $D_{dom}$  :  $[P_{max}^{minCV}, P_{max}^{maxCV}]$ . Ces bornes sont actualisées à chaque fin d'itération  $i$  selon les formules 6.

$$\begin{aligned} \text{si } D_{max}^i > D_{dom}, P_{max}^{maxCV} &= P_{max}^i \\ \text{et si } D_{max}^i < D_{dom}, P_{max}^{minCV} &= P_{max}^i \end{aligned} \quad (6)$$

$P_{max}^{i+1}$  est ensuite dans un premier temps pris égal à la valeur donnée par l'équation 5. Puis, si  $P_{max}^{i+1} \notin [P_{max}^{minCV}, P_{max}^{maxCV}]$ , cette valeur est corrigée selon les formules 7.

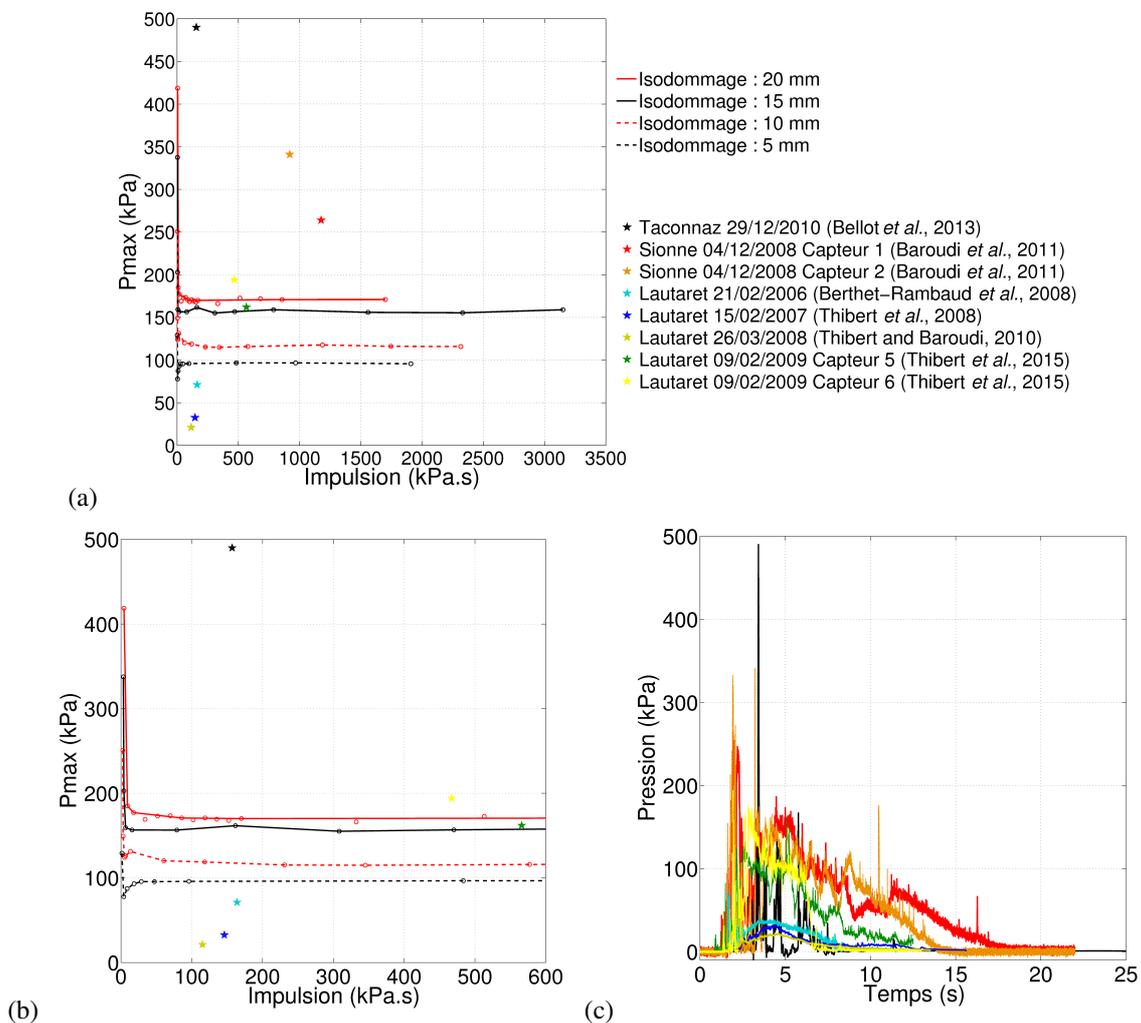
$$\begin{aligned} \text{si } P_{max}^{i+1} > P_{max}^{maxCV}, P_{max}^{i+1} &= P_{max}^{i+1} - \frac{1}{2} (P_{max}^{maxCV} - P_{max}^i) \\ \text{et si } P_{max}^{i+1} < P_{max}^{minCV}, P_{max}^{i+1} &= P_{max}^{i+1} + \frac{1}{2} (P_{max}^i - P_{max}^{maxCV}) \end{aligned} \quad (7)$$

Les différents couples (pression, impulsion) obtenus conduisant à l'isodommage retenu permettent ensuite de tracer un diagramme pression-impulsion représentatif du comportement de la structure.

### 3. Résultats

Dans le cas présent, le niveau de dommage correspond à un déplacement donné de la structure, calculé en tête de voile pour la structure de protection et au point GP4P2 pour la structure poteaux-poutres (figure 2b).

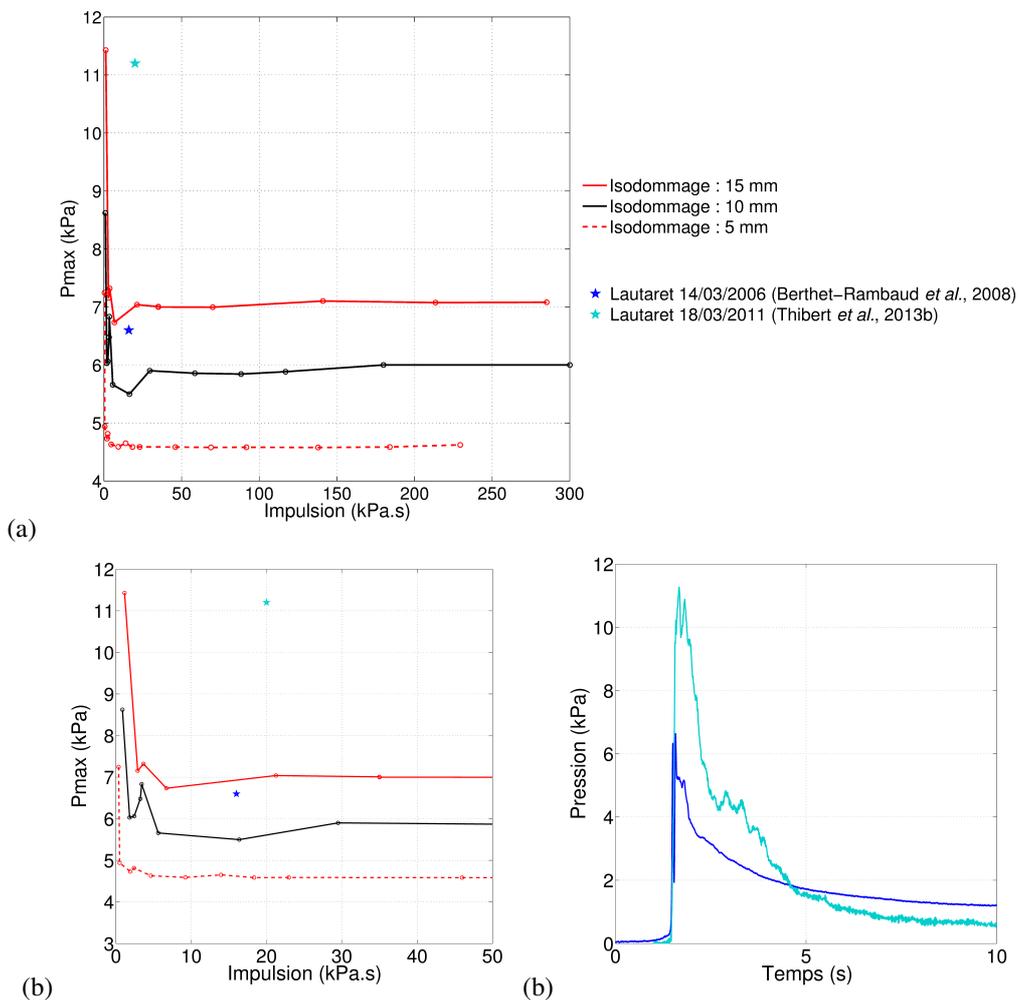
Les figures 5a et b présentent les diagrammes pression-impulsion obtenus pour des valeurs de déplacement de 5, 10, 15 et 20 mm sur lesquels on peut observer les trois types de comportement : quasi-statique (partie horizontale des courbes), impulsionnelle (partie verticale) et dynamique (zone de transition entre les deux parties précédentes). Sont également reportées dans cette figure des valeurs de pression-impulsion issues de divers signaux avalancheux réels mesurés *in situ*. Ces signaux (figure 5c) sont issus de trois sites expérimentaux : ceux du Lautaret ([THI 15,



**Figure 5.** (a) Diagrammes pression-impulsion pour la structure de type mur en L, comparés à des valeurs de pression-impulsion réelles issues de signaux avalancheux mesurés in situ, (b) zoom sur les zones de transition quasi-statique/dynamique/impulsionnel et (c) signaux avalancheux réels utilisés pour calculer les valeurs de pression-impulsion réelles reportées sur les diagrammes

BER 08, THI 08, THI 10, THI 13]), de la Sionne ([SOV 13, BAR 11]) et de Taconnaz ([BEL 13]). D'après la figure 5b, on voit que pour les avalanches de la Sionne et du Lautaret, le comportement de la structure étudiée serait plutôt de type quasi-statique. *A contrario*, pour l'avalanche de Taconnaz, on semble se rapprocher d'un comportement dynamique. Ceci est vraisemblablement dû au caractère hétérogène de l'avalanche du 29 décembre 2010 pour laquelle on a pu observer la présence de blocs de glace provenant très probablement du glacier situé en amont. En conclusion, alors que pour des avalanches de neige dense relativement homogènes, le comportement de la structure de protection étudiée est *a priori* de type quasi-statique, pour des avalanches de neige mixte avec possibilité de blocs au sein même de l'écoulement, il convient de rester prudent sur le type de comportement de la structure à prendre en compte.

Des diagrammes pression-impulsion ont également été établis pour des déplacements de la structure poteaux-poutres de 5, 10 et 15 mm. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 6. La transition entre quasi-statique et dynamique intervient pour ce type de structures pour des impulsions de l'ordre de 20 - 30 kPa.s et des pressions au pic de 4,5 à 7 kPa soit pour des temps de montée de l'ordre de 3 à 6 s. Les deux exemples de signaux avalancheux enregistrés au col du Lautaret montrent que des effets inertiels sont à prendre en compte pour de telles structures susceptibles d'être sollicitées par des avalanches de neige dense, le temps de montée en charge de telles avalanches de faible ampleur (avec une pression au pic relativement faible) étant généralement de l'ordre de la seconde voire inférieurs.



**Figure 6.** (a) Diagrammes pression-impulsion pour la structure poteaux-poutres à 3 étages, (b) zoom sur les zones de transition quasi-statique / dynamique / impulsionnel et (c) signaux avalancheux reportés sur les diagrammes

#### 4. Conclusion

Le chargement issu d'une avalanche est un champ de pression évoluant au cours du temps. Aussi, afin d'assurer la représentativité d'un calcul de structure sollicitée par ce type d'aléa, il est nécessaire d'identifier au préalable le régime dans lequel va répondre l'ouvrage, à savoir quasi-statique ou dynamique. Une approche diagramme pression-impulsion, couramment employée dans le domaine des structures soumises à des chargements de type explosion, est ici proposée et présente l'avantage de prendre en compte les non linéarités des matériaux. Cette approche consiste à construire un diagramme pression-impulsion pour différents isodommages correspondant ici à des valeurs de déplacement de la structure. Elle permet d'identifier trois types de réponses : quasi-statique, dynamique et impulsionnelle. De tels diagrammes ont été réalisés pour une structure de protection ainsi qu'une structure de type poteaux-poutres à 3 étages. Le report sur ces diagrammes de valeurs de pression et impulsion issues de signaux avalancheux réels mesurés permet de conclure que la structure paravalanche étudiée se comporte *a priori* de façon quasi-statique sous l'effet d'un champ de pression issu d'avalanches de neige dense homogènes (sans présence de blocs de glace ou de pierres) alors que par contre les structures de type poteaux-poutres sont susceptibles de se comporter de façon plus dynamique. Pour des avalanches mixtes avec présence d'hétérogénéités telles que celles observées à Taconnaz, il convient cependant de rester prudent. Par la suite, il serait intéressant de compléter ces diagrammes pour d'autres types de dommages et de structure. Un dommage caractérisé par un paramètre local tel que les déformations ou les contraintes permettrait par exemple de préciser au niveau du diagramme les différentes phases de comportement de la structure (élastique, fissuration du béton et plastification des aciers). Le cas de murs en béton faiblement armés représentatifs de certains bâtis pour lesquels une hypothèse de comportement quasi-statique est actuellement faite pour le calcul de risque [BER 10, FAV 14a, FAV 14b] pourrait aussi faire

l'objet d'investigations de type diagramme pression-impulsion. Enfin, il serait important de prendre en compte la distribution spatiale de la pression d'impact des avalanches de neige dense, cette pression pouvant fortement varier suivant la hauteur.

## 5. Bibliographie

- [BAR 11] BAROUDI D., SOVILLA B., THIBERT E., « Effects of flow regime and sensor geometry on snow avalanche impact-pressure measurements », *Journal of Glaciology*, vol. 57, n° 202, p. 277-288, 2011.
- [BEL 13] BELLOT H., NAAÏM-BOUVET F., CACCAMO P., FAUG T., OUSSET F., « Tacconnaz avalanche path : pressure and velocity measurements on breaking mounds », *International Snow Science Workshop*, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, p. 1378-1383, October 7-11 2013.
- [BER 07] BERTHET-RAMBAUD P., LIMAM A., ROENELLE P., RAPIN F., TACNET J.-M., « Avalanche action on rigid structures : Back-analysis of Tacconnaz deflective wall's collapse in February 1999 », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 47, p. 16-31, 2007.
- [BER 08] BERTHET-RAMBAUD P., LIMAM A., BAROUDI D., THIBERT E., TAILLANDIER J.-M., « Characterization of avalanche loading on impacted structures : a new approach based on inverse analysis », *Journal of Glaciology*, vol. 54, p. 324-332, 2008.
- [BER 10] BERTRAND D., NAAÏM M., BRUN M., « Physical vulnerability of reinforced concrete buildings impacted by snow avalanches », *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 10, p. 1531-1545, 2010.
- [DAU 13] DAUDON D., BAROTH J., Y. M., PERROTIN P., MOMMESSIN M., « Sensitivity of a reinforced concrete protective gallery under a snow avalanche loading », *Structural Safety*, vol. 44, p. 47-56, 2013.
- [FAV 14a] FAVIER P., « Sensitivity of avalanche risk to vulnerability relations », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 108, p. 163-177, 2014.
- [FAV 14b] FAVIER P., Une approche intégrée du risque avalanche : quantification de la vulnérabilité physique et humaine et optimisation des structures de protection, PhD thesis, Université de Grenoble, 2014.
- [GIV 04] GIVRY M., PERFETINI P., *Construire en montagne : la prise en compte du risque d'avalanche*, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, www.marc-givry-architecte.org, 2004.
- [OUS 15a] OUSSET I., Contribution à la modélisation par éléments finis des structures en béton armé - Application à la structure de protection de Tacconnaz, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, 2015.
- [OUS 15b] OUSSET I., BERTRAND D., BRUN M., THIBERT E., LIMAM A., NAAÏM M., « Static and dynamic FE analysis of an RC protective structure dedicated to snow avalanche mitigation », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 112, p. 95-111, 2015.
- [PAR 10] PARIS L., « Comportement des structures soumises à une explosion », *Techniques de l'ingénieur*, vol. SE5064, p. 1-26, 2010.
- [SOV 13] SOVILLA B., MCELWAIN J., STEINKOGLER W., HILLER M., DUFOUR F., SURINACH E., PEREZ GUILLEN C., FISCHER J.-T., THIBERT E., BAROUDI D., « The full-scale avalanche dynamics test site Vallée de la Sionne », *International Snow Science Workshop*, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, p. 1350-1357, October 7-11 2013.
- [SOV 16] SOVILLA B., FAUG T., KÖHLER A., BAROUDI D., FISCHER J.-T., THIBERT E., « Gravitational wet avalanche pressure on pylon-like structures », *Cold Regions Science and Technology*, 2016, doi :10.1016/j.coldregions.2016.03.002.
- [TAT 11] TATAIE L., Méthodes simplifiées basées sur une approche quasi-statique pour l'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages soumis à des excitations sismiques, PhD thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2011.
- [TAT 12] TATAIE L., BRUN M., REYNOUARD J. M., « Modal pushover procedures for seismic evaluation of reinforced concrete structures : using new nonlinear single degree of freedom systems », *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 16(2), p. 178-203, 2012.
- [THI 08] THIBERT E., BAROUDI D., LIMAM A., BERTHET-RAMBAUD P., « Avalanche impact pressure on an instrumented structure », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 54, p. 206-215, 2008.
- [THI 10] THIBERT E., BAROUDI D., « Impact energy of an avalanche on a structure », *Annals of Glaciology*, vol. 51(54), p. 45-54, 2010.
- [THI 13] THIBERT E., FAUG T., BELLOT H., BAROUDI D., « Avalanche impact pressure on a plate-like obstacle », *International Snow Science Workshop*, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, p. 663-670, October 7-11 2013.
- [THI 15] THIBERT E., BELLOT H., RAVANAT X., OUSSET F., PULFER G., NAAÏM M., HAGENMULLER P., NAAÏM-BOUVET F., FAUG T., NISHIMURA K., ITO Y., BAROUDI D., PROKOP A., SCHÖN P., SORUCO A., VINCENT C., LIMAM A., HÉNO R., « The full-scale avalanche test-site at Lautaret Pass (French Alps) », *Cold Regions Science and Technology*, vol. 115, p. 30-41, 2015.