



HAL
open science

Caractérisation de la réponse dynamique d'une structure en béton armé sollicitée par une avalanche de neige dense selon une approche Pression-Impulsion

I. Ousset, D. Bertrand, M. Brun, A. Limam, Mohamed Naaim

► To cite this version:

I. Ousset, D. Bertrand, M. Brun, A. Limam, Mohamed Naaim. Caractérisation de la réponse dynamique d'une structure en béton armé sollicitée par une avalanche de neige dense selon une approche Pression-Impulsion. 32èmes rencontres universitaires de génie civil, AUGC 2014, Jun 2014, Orléans, France. pp.134-146. hal-02603385

HAL Id: hal-02603385

<https://hal.inrae.fr/hal-02603385v1>

Submitted on 17 Jul 2024

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.



HAL
open science

Caractérisation de la réponse dynamique d'une structure en béton armé sollicitée par une avalanche de neige dense selon une approche Pression-Impulsion

I. Ousset, D. Bertrand, M. Brun, A. Limam, Mohamed Naaim

► To cite this version:

I. Ousset, D. Bertrand, M. Brun, A. Limam, Mohamed Naaim. Caractérisation de la réponse dynamique d'une structure en béton armé sollicitée par une avalanche de neige dense selon une approche Pression-Impulsion. 32èmes Rencontres de l'Association Universitaire de Génie Civil, Jun 2014, Orléans, France. hal-01998519

HAL Id: hal-01998519

<https://hal.science/hal-01998519>

Submitted on 29 Jan 2019

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.

Caractérisation de la réponse dynamique d'une structure en béton armé sollicitée par une avalanche de neige dense selon une approche Pression-Impulsion

I. Ousset^{1,2}, D. Bertrand³, M. Brun³, A. Limam³, M. Naaïm^{1,2}

¹ Irstea, UR ETGR, Centre de Grenoble, 2 rue de la Papeterie - BP 76, F-38402 Saint-Martin-d'Hères, France (isabelle.ousset@irstea.fr)

² Univ. Grenoble Alpes, F-38041 Grenoble, France

³ INSA Lyon, LGCIE, 20 avenue Albert Einstein, F-69621 Villeurbanne, France

RÉSUMÉ. Cet article traite du comportement d'une structure de protection paravalanche à l'aide d'un modèle éléments finis. Dans un premier temps, une étude paramétrique du signal avalancheux est réalisée. Ensuite, une approche Pression-Impulsion est proposée de façon à préciser la nature de la réponse de la structure : impulsif, dynamique ou quasi-statique en fonction de l'intensité de l'aléa défini par le paramètre impulsion.

ABSTRACT. This paper proposes the behaviour study of a protective structure under an avalanche loading by using a finite element model. First, a parametric study of the avalanche signal is performed. Then, a pressure-impulse approach is proposed, in order to precise the response mode of the structure : impulsive, dynamic or quasi-static, according to the intensity of the natural hazard defined by the impulse parameter.

MOTS-CLÉS : avalanche de neige dense, structure en béton armé, modèle éléments finis, diagramme pression-impulsion

KEYWORDS: dense snow avalanche, reinforced concrete structure, finite element model, pressure-impulse diagram

1. Introduction

Afin de protéger les personnes et les biens contre les avalanches, des ouvrages de génie civil sont fréquemment utilisés. En l'absence de connaissances suffisantes sur l'effet dynamique des avalanches sur le comportement de telles structures, ces dernières sont encore pour la plupart dimensionnées suivant une approche statique avec introduction de coefficients de sécurité [GIV 06]. L'avalanche de Taconnaz, qui s'est produite en 1999 dans la vallée de Chamonix (France, 74) et a détruit une grande partie du dispositif de protection mis en place [BER 07], a conduit à s'intéresser de plus près à l'interaction écoulement avalancheux - ouvrage.

Cet article s'intéresse à l'étude, par la modélisation numérique, du comportement mécanique de structures de génie civil en béton armé soumises à des avalanches de neige dense et à l'amélioration des approches de dimensionnement associées. En effet, le choix des méthodes de calculs des structures BA (Béton Armé) face à ce type d'aléa naturel va principalement dépendre des hypothèses qu'il est possible de formuler à structure et avalanche données. Dans ce cadre, une approche pression-impulsion est utilisée afin d'identifier les régimes qu'une structure fixée peut développer en fonction de l'évolution temporelle du champ de pression.

Un mur BA en forme de L a été étudié. Ce dernier est représentatif d'une des dents défectives du dispositif paravalanche de Taconnaz (France). Le caractère quasi-statique ou dynamique de la réponse de la structure a été exploré à l'aide d'une approche pression-impulsion plus souvent utilisée dans le cadre des structures soumises à explosion [PAR 10]. Pour ce faire, un modèle numérique selon la méthode des éléments finis a été développé et calé à partir des résultats d'un essai expérimental sur modèle réduit réalisé en laboratoire [OUS 13]. Un signal avalancheux typique d'une avalanche de neige dense (avalanche générant les pressions d'impact les plus élevées), obtenu par analyse inverse à partir de données mesurées sur le site expérimental français du col du Lautaret [THI 08], est ensuite introduit dans le modèle.

L'idée est in fine de tracer à l'aide des résultats du modèle numérique EF (Eléments Finis), pour différentes exigences de comportement données des courbes iso endommagement représentant la pression conduisant au critère de comportement retenu en fonction de l'impulsion, caractéristique de la forme du signal avalancheux. De telles courbes permettent de distinguer en fonction de l'impulsion les cas où la réponse de la structure est quasi-statique (en première approche, cas où la durée du signal est largement supérieure au temps propre de la structure) des cas où elle est dynamique (signaux de plus faible durée).

2. Méthodes

2.1. Structure étudiée

La structure étudiée est un mur en L, constitué d'un voile et d'une semelle, de hauteur 9,60 m, longueur 14,80 m, largeur 9,00 m et épaisseur 1,50 m, comme présenté

à la 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 longueur.

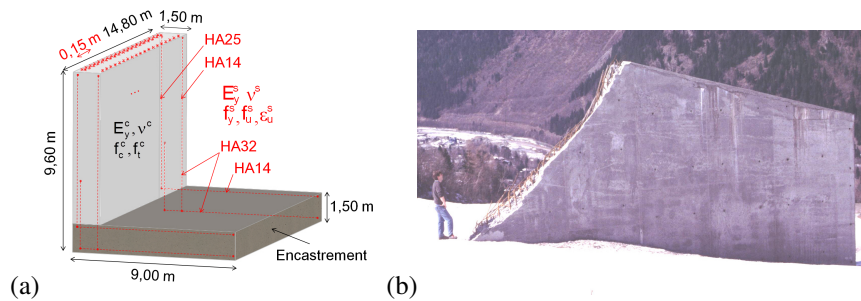


Figure 1. Structure étudiée : (a) Structure modélisée (b) Dent de Taconnaz réelle partiellement détruite en 1999 (Photo F. Rapin - Irstea)

Cette structure est représentative des dents déflectrices (Figure 1b) du dispositif paravalanche situé dans le couloir avalancheux de Taconnaz, qui ont été endommagées lors des événements de 1999 et 2006 et dont l'objectif est de permettre l'étalement d'un écoulement avalancheux avant son ralentissement par des tas freineurs et son arrêt final en amont d'une digue frontale.

Le choix de la structure retenue s'explique par le fait que des dégâts ont pu être observés sur de telles structures et qu'un essai sur modèle réduit de la dent de Taconnaz a été réalisé en laboratoire, permettant ainsi de caler un modèle numérique.

2.2. Modèle EF

Le mode de rupture de la dent de Taconnaz observé à la Figure 1b) montre une rupture 3D. Face à la complexité du phénomène observé, le présent article s'intéresse à caractériser dans un premier temps la réponse de la structure en 2D, dans le plan de la sollicitation. La structure étudiée est ainsi modélisée en 2D à l'aide d'éléments finis QUA4 (quadrilatères à 4 noeuds) pour le béton et SEG2 (segments à 2 noeuds) pour les armatures comme présenté à la Figure 2.

Le béton est décrit par une loi élasto-plastique en contraintes planes avec écrouissage négatif présentée à la Figure 3a). Plusieurs lois de type élasto-plastique ou endommageable ont en amont été testées [OUS 13]; la loi finalement retenue est celle qui conduit d'une part à une convergence du modèle (obtenue pour seulement deux des lois testées) et d'autre part aux temps de calcul les plus faibles pouvant permettre par la suite des études de type fiabiliste. Le comportement de l'acier est représenté par une loi élasto-plastique avec écrouissage positif présentée à la Figure 3b). La liaison entre l'acier et le béton est quant à elle supposée parfaite.

La semelle de la structure est encastree et un champ de pression est appliqué de façon uniforme sur l'intégralité de la hauteur du voile.

Les calculs dynamiques sont menés avec un amortissement de Rayleigh et un taux d'amortissement de 5 %, valeur communément admise en génie parasismique. Le schéma de résolution considéré est un schéma d'intégration de Newmark implicite (accélération moyenne).

Ce modèle est décrit de façon plus précise dans l'article [OUS 14].

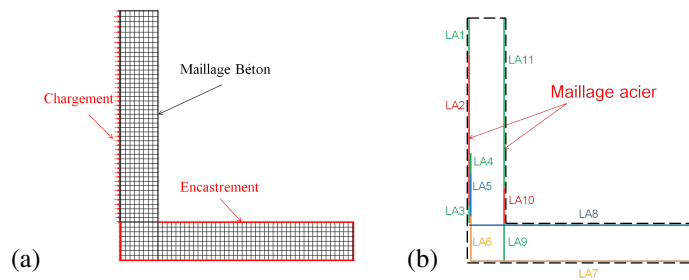


Figure 2. Maillage de la structure : (a) béton et (b) acier et Conditions aux limites (a)

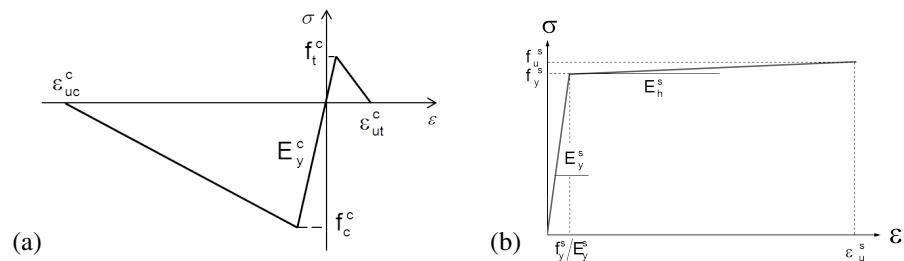


Figure 3. Lois de comportement retenues pour (a) le béton et (b) l'acier

2.3. Chargement avalancheux

Un chargement avalancheux est un champ de pression qui évolue au cours du temps.

Deux types de profils de pression, présentés à la Figure 4a), sont ici testés : un signal de type triangle isocèle et un signal dont la forme est celle d'un signal réel mesuré *in-situ* au col du Lautaret (Hautes-Alpes) [THI 08], caractéristique d'une avalanche de neige dense, et présenté à la Figure 4b).

Ces deux types de signaux sont caractérisés par une pression au pic P_{max} et un temps de montée en charge t_m , tels que spécifiés à la figure 4.

Le temps de chargement est alors égal à :

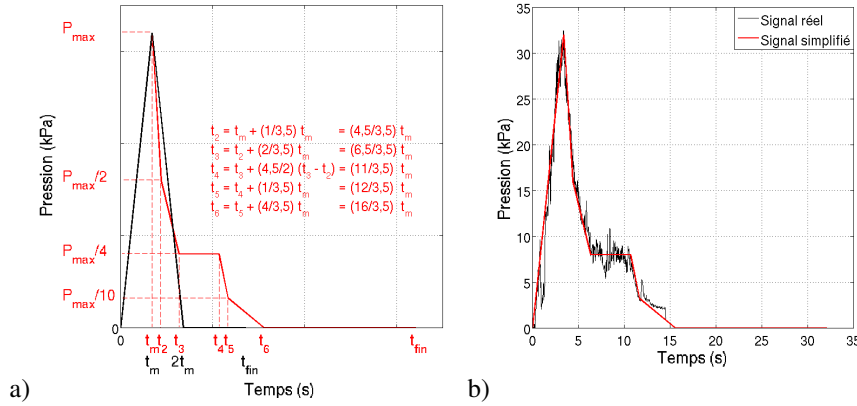


Figure 4. a) Deux types de signaux introduits dans le modèle : en noir, signal triangulaire isocèle et en rouge, signal avalancheux simplifié, comparé en b) au signal réel mesuré in-situ au col du Lautaret [THI 08]

$$t_{chgt} = 2 t_m \quad [1] \quad \text{ou} \quad t_{chgt} = \frac{16}{3,5} t_m \quad [2]$$

dans le cas d'un signal triangulaire

dans le cas du signal avalancheux type Lautaret

t_{fin} correspond à la fin d'une simulation et est pris égal à $2 * t_{chgt}$ de façon à capturer l'essentiel de la réponse de la structure.

2.4. Diagramme Pression-Impulsion

2.4.1. Principe

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

Cette dernière correspond à la quantité de mouvement transférée par la force appliquée sur la structure à savoir : $I = \int_0^{t_{chgt}} F(t) dt = S \int_0^{t_{chgt}} P(t) dt$, où S représente la surface d'application de la sollicitation et est considérée comme constante dans cette étude.

Dans le cas du signal triangulaire, on aura :

$$I/S = \frac{1}{2} P_{max} t_{chgt} = P_{max} t_m \quad [3]$$

et dans le cas du signal avalancheux type Lautaret :

$$\begin{aligned} I/S &= \frac{1}{2} P_{max} t_m + \frac{3}{4} P_{max} (t_2 - t_m) + \frac{3}{8} P_{max} (t_3 - t_2) + \\ &\frac{1}{4} P_{max} (t_4 - t_3) + \frac{7}{40} P_{max} (t_5 - t_4) + \frac{1}{20} P_{max} (t_6 - t_5) \\ &= \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{3,5} \right) P_{max} t_m \quad [4] \end{aligned}$$

Une fois tracées pour différents "iso-dommages", les courbes Pression-Impulsion 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 la durée du signal n'influence pas ou peu la réponse de la structure : seule intervient dans ce cas 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.

La nature de la réponse de la structure va principalement dépendre de la durée du chargement comparé au temps caractéristique de la structure défini comme étant égal à l'inverse de la première fréquence propre.

2.4.2. Construction

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 à l'endommagement fixé tel que spécifié à la figure 5.

Dans cette étude, une automatisation de la construction de ces diagrammes, grâce à un programme Matlab, est proposée. Elle est 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 Δt_{FEM} doit être adapté à la vitesse de sollicitation et calculé de manière à conserver un incrément de pression ΔP_{FEM} constant pour toutes les simulations soit :

$$\Delta t_{FEM} = \Delta P_{FEM} \frac{t_m}{P_{max}} \quad \text{avec} \quad \Delta P_{FEM} = cte \quad [5]$$

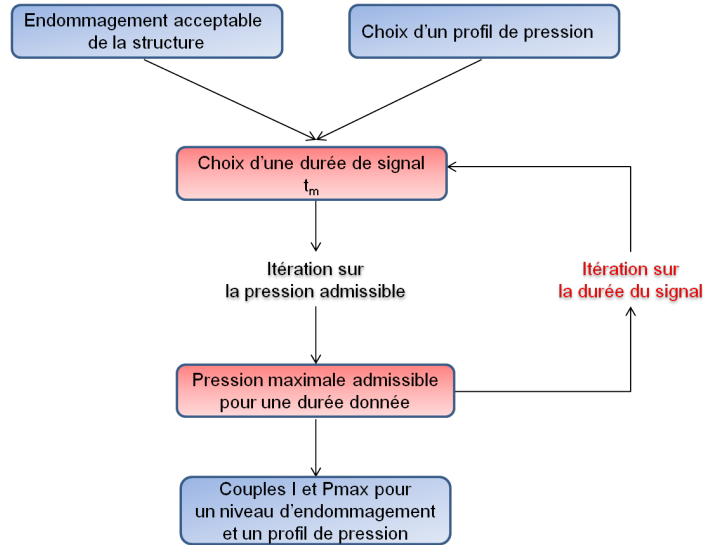


Figure 5. Construction d'un diagramme Pression - Impulsion

– Critère d'atteinte du dommage

Le critère d'arrêt associé à l'atteinte du dommage fixé, représentant ici le déplacement en tête de l'ouvrage et noté D_{dom} , est défini de la manière suivante :

$$\frac{D_{dom} - D_{max}^i}{D_{dom}} \leq 10\% \quad [6]$$

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

Dans le cas présent, D_{dom} est pris égal à 20 mm et correspond à un état compris entre l'Etat Limite de Service et l'Etat Limite Ultime. Il est représentatif de la phase de micro-fissuration du béton avec sollicitation des aciers dans leur phase élastique.

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 6.

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 la formule 7 :

$$P_{max}^{i+1} = P_{max}^i \left(1 + \frac{D_{dom} - D_{max}^i}{D_{dom}} \right) \quad [7]$$

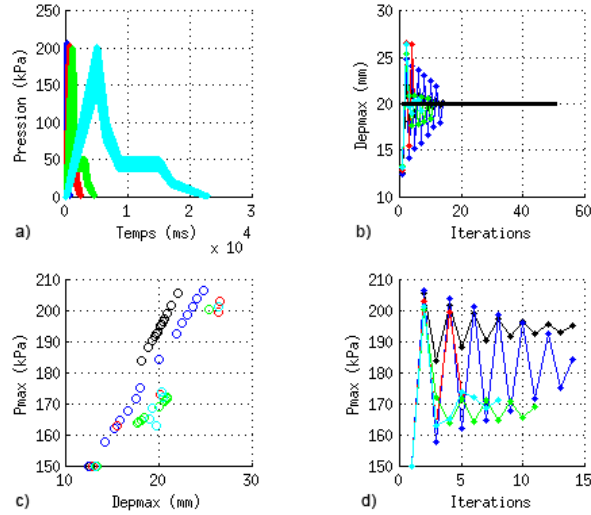


Figure 6. Résultats obtenus au cours de l'algorithme de construction d'un diagramme Pression-Impulsion : convergence en b) et c) vers l'isodommage et en c) et d) vers la pression au pic conduisant à cet endommagement, pour plusieurs signaux avalancheux, caractérisés par un temps de montée en charge, présentés en a)

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 l'endommagement 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 de la manière suivante :

$$\text{si } D_{max}^i > D_{dom}, P_{max}^{maxCV} = P_{max}^i$$

$$\text{et si } D_{max}^i < D_{dom}, P_{max}^{minCV} = P_{max}^i.$$

P_{max}^{i+1} est ensuite dans un premier temps pris égal à la valeur donnée par la formule 7. Puis, si $P_{max}^{i+1} \notin [P_{max}^{minCV} P_{max}^{maxCV}]$, cette valeur est corrigée de la façon suivante :

$$\text{si } P_{max}^{i+1} > P_{max}^{maxCV}, P_{max}^{i+1} = P_{max}^{i+1} - \frac{1}{2} (P_{max}^{maxCV} - P_{max}^i)$$

$$\text{et si } P_{max}^{i+1} < P_{max}^{minCV}, P_{max}^{i+1} = P_{max}^{i+1} + \frac{1}{2} (P_{max}^i - P_{max}^{maxCV}).$$

Les résultats obtenus au fur et à mesure de cette procédure de convergence vers le critère d'atteinte du dommage, pour différentes valeurs de temps de montée du signal, sont présentés à la Figure 6. 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

3.1. Test pushover

Un test pushover consiste à appliquer une pression croissante de manière linéaire jusqu'à la ruine de l'ouvrage. Un tel essai permet de connaître la pression maximale admissible de la structure et d'obtenir dans le cas présent une référence quasi-statique présentée à la Figure 7.

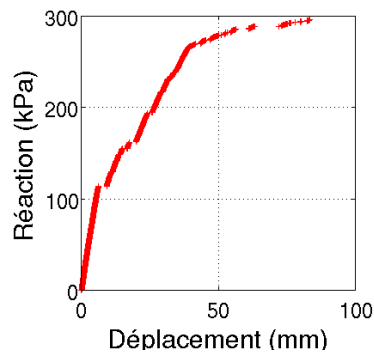


Figure 7. Test Pushover caractérisant le comportement quasi-statique de la structure

3.2. Réponse de la structure

Plusieurs simulations ont été réalisées en faisant varier les paramètres caractéristiques du signal à savoir t_m , t_{fin} , I et P_{max} .

Les Figures 8a), c) et e) sont représentatives d'un comportement quasi-statique puisque la réponse de la structure suit la même évolution temporelle que le chargement. Pour des temps de mise en charge identiques (Figure 8a)), la réponse de la structure en phase de charge est similaire pour les deux types de chargement. A contrario, les différences de pente de la phase de chargement observées entre les deux chargements sur les Figures 8c) et e) correspondent à des temps de montée en charge différents (pour la Figure 8c), $t_m = 5$ s pour le signal triangulaire tandis que $t_m = 1,1$ s pour le signal avalancheux et pour la Figure 8e), $t_m = 6,8$ s pour le signal triangulaire tandis que $t_m = 5$ s pour le signal avalancheux). On remarque de plus que, à temps de

montée en charge ou impulsion égaux, les déplacements maximal et résiduel de l'ouvrage sont les mêmes quelque soit la forme du signal ce qui n'est pas le cas pour des signaux à temps de chargement global égaux. On peut en conclure que les paramètres pertinents pour décrire le signal sont le temps de montée en charge ou l'impulsion.

Les Figures 8b), d) et f) sont quant à elles caractéristiques d'un comportement dynamique puisque la réponse de la structure est de type sinusoïdal.

Ces résultats permettent *in fine* de vérifier que le comportement de la structure peut être qualifié de quasi-statique pour des temps de montée en charge supérieur au temps caractéristique de la structure, déterminé par analyse modale et égal ici à 0,07 s, et de dynamique dans le cas contraire. Pour des avalanches de neige dense, dont les temps de montée avoisinent généralement les quelques secondes, comme ce fut le cas de l'avalanche mesurée *in situ* au col du Lautaret [THI 08] et dont le signal est présenté à la Figure 4b), on peut donc dire que la réponse de la structure de protection paravalanche étudiée ici va être quasi-statique.

Les Figures 9a) et b) confirment la nature différente de la réponse structurale suivant le temps de montée en charge de la sollicitation. En effet, pour un temps de montée de 5 s, supérieur au temps caractéristique de la structure égal à 0,07 s, la courbe Réaction-Déplacement représentant la réponse de l'ouvrage à une sollicitation avalancheuse suit les mêmes gradients que ceux de la courbe pushover. On peut noter de plus que tant que la pression avalancheuse ne dépasse pas la valeur de 300 kPa, les déformations résiduelles en tête de l'ouvrage sont relativement faibles voire nulles, ce qui s'explique par une sollicitation du béton en traction et un comportement de l'acier dans sa phase élastique uniquement. A contrario, dans le cas d'une sollicitation plus rapide (temps de montée de 0,05 s), la réponse est dynamique et se situe au-dessus de la courbe pushover : la structure est capable de résister à des pressions plus fortes dans des temps plus courts.

3.3. Diagrammes Pression-Impulsion

Afin de matérialiser la transition entre les deux modes quasi-statique et dynamique, les figures 10 a) et b) présentent les diagrammes Pression-Impulsion obtenus avec les deux types de signaux présentés ci-dessus, pour un endommagement de la structure en déplacement de 20 mm correspondant à un état de micro-fissurations de la structure.

Les diagrammes obtenus pour les deux types de signaux (triangulaire et avalancheux simplifié) sont identiques en modes quasi-statique ou impulsif. A contrario, des différences importantes sont observées en mode dynamique. Pour autant, les transitions entre les différents modes sont obtenus pour des impulsions de même intensité.

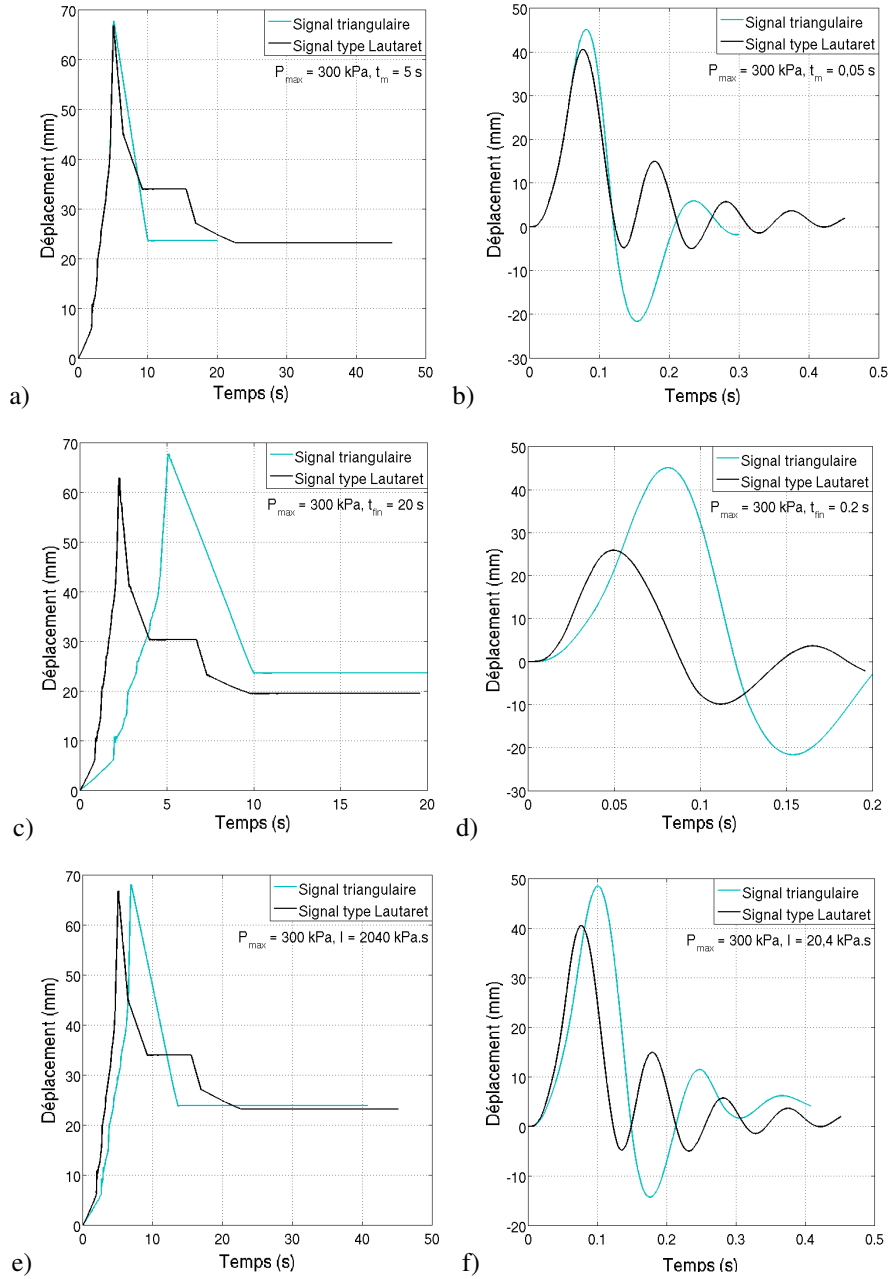


Figure 8. Réponses temporelles de la structure pour des temps de montée en charge de a) 5 et b) 0,05 s, des temps totaux de chargement (comprenant phases de charge et décharge) de c) 10 s et d) 0,1 s et des impulsions de e) 2040 kPa.s et f) 20,4 kPa.s

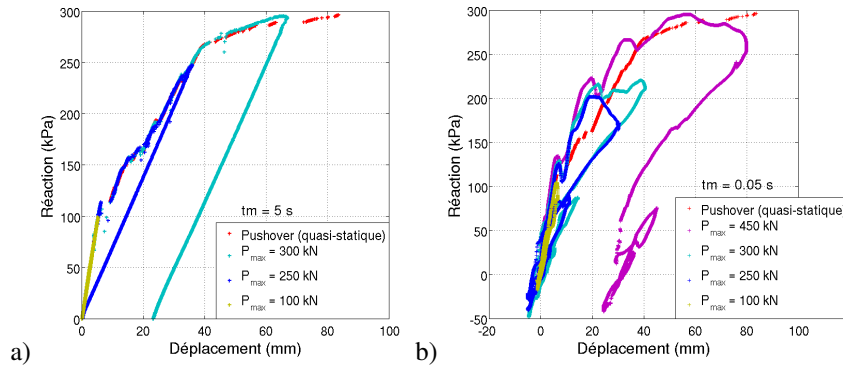


Figure 9. Réponses Réaction-Déplacement en tête de la structure pour des temps de mise en charge de a) 5 et b) 0,05 s

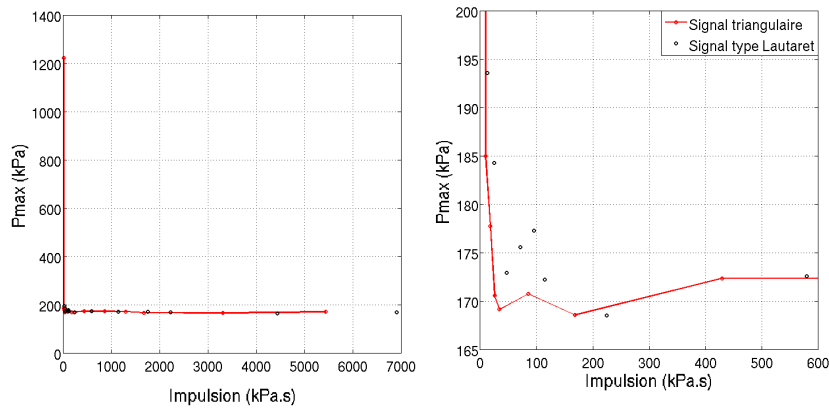


Figure 10. a) Diagrammes Pression-Impulsion pour un endommagement de la structure exprimé en déplacement (ici 20 mm) et pour deux types de signaux avalancheux b) Zoom sur les zones de transition Quasi-statique / Dynamique / Impulsionnel

4. Conclusion

L'étude du comportement des ouvrages en béton armé sous sollicitation avalancheuse est abordée dans cette étude selon une méthode de modélisation numérique aux éléments finis. De façon à préciser la nature de la réponse d'un ouvrage, deux approches ont été utilisées : dans un premier temps, une étude paramétrique du signal avalancheux et dans un second temps, une approche Pression - Impulsion, couramment utilisée dans le domaine de l'explosion. L'étude paramétrique a montré que la réponse de la structure est de type quasi-statique dès lors que le temps de montée en charge de la sollicitation est supérieur au temps caractéristique de la structure égal à

l'inverse de la première fréquence propre et qu'elle est dynamique ou impulsif dans le cas contraire. L'établissement de diagrammes Pression-Impulsion permet ensuite de préciser sur un même graphique, pour un isodommage donné, les zones de transition entre les différents modes de comportement de l'ouvrage : impulsif, dynamique et quasi-statique.

Dans le présent article, cette approche est testée sur une structure paravalanche sollicitée par des avalanches de neige dense, pour laquelle nous disposons d'un test pushover sur modèle réduit permettant le calage du modèle, et pour un endommagement donné, exprimé en terme de déplacement. Par la suite, les diagrammes obtenus seront complétés pour d'autres niveaux et d'autres types d'endommagement. Cette approche sera également utilisée pour étudier le comportement de structures de type poteaux-poutres représentatives des habitations afin d'une part d'améliorer les méthodes de dimensionnement et d'autre part de prendre en compte la nature de la réponse de ces structures dans le calcul de risque.

5. Bibliographie

- [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, 2007, p. 16-31.
- [GIV 06] 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, 2006.
- [OUS 13] OUSSET I., BERTRAND D., BRUN M., LIMAM A., NAAÏM M., « Vulnerability of a reinforced concrete wall loaded by a snow avalanche : experimental testing and FEM analysis », *International Snow Science Workshop*, Grenoble - Chamonix Mont-Blanc, France, 7-11 october 2013.
- [OUS 14] OUSSET I., BERTRAND D., CARVAJAL C., LIMAM A., NAAÏM M., « Etude fiabiliste d'une dent défectrice en béton armé sollicitée par une avalanche de neige dense », *8èmes Journées Fiabilité des Matériaux et Structures*, 2014.
- [PAR 10] PARIS L., « Comportement des structures soumises à une explosion », *Techniques de l'Ingénieur*, vol. SE 5 064, 2010, p. 1-26.
- [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, 2008, p. 206-215.