

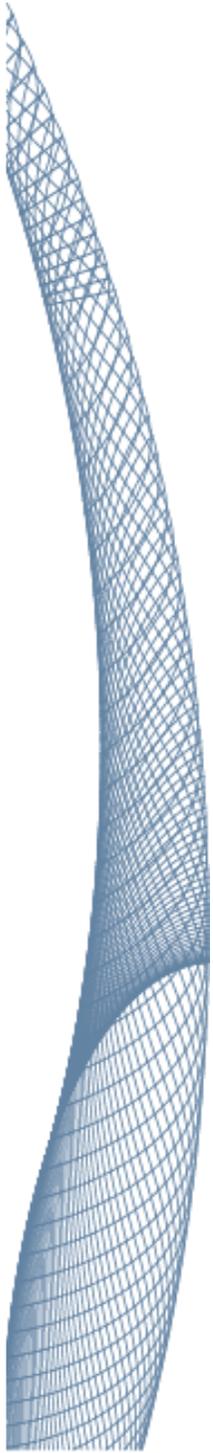
Analyse sensibilité vis-à-vis du chargement avalancheux du comportement d'un ouvrage paravalanche

Dominique Daudon* — Julien Baroth* — Ying Ma* —
Pascal Perrotin*** — Michel Mommessin*****

* UJF/G-INP-CNRS, Laboratoire Sols, Solides, Structures -
Risques – Grenoble

*** Univ. Savoie, Locie – Chambéry





Introduction - Plan de l'exposé

1. Problématique du chargement avalancheux
Entre recherche et dimensionnement réglementaire
2. Variabilité du chargement
Domaine du génie civil-aléas naturels
3. Etude de sensibilité/propagation d'incertitude
Un exemple simple

Conclusion

1. Problématique du chargement avalancheux en ingénierie de protection

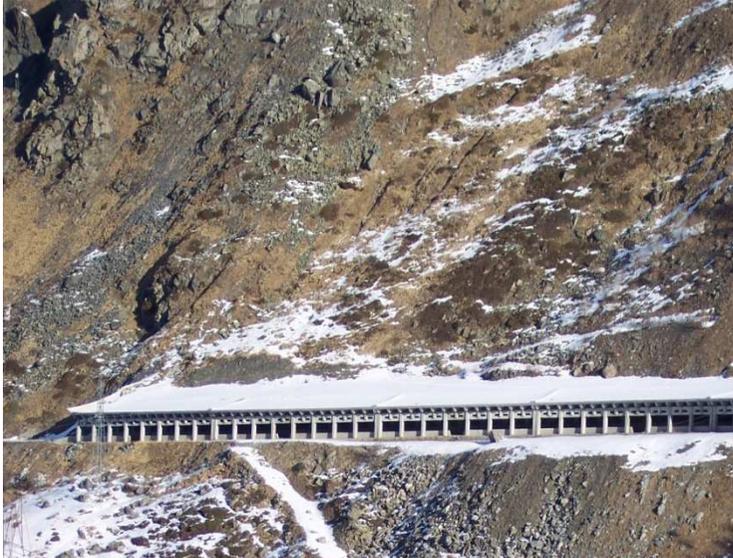
projet **ANR OPALE (2005-2008)** :
Améliorer la prise en compte du chargement pour le dimensionnement des galeries de protection

- Mesures expérimentales *in-situ*,
- Mesures expérimentales, en laboratoire,
- Simulation numérique d'éléments de structure (MEF dynamique)

Poursuite : variabilité du chargement avalancheux
propagation d'incertitude



1. Problématique du chargement avalancheux : cas du paravalanche de Mautalever (Haute Savoie)



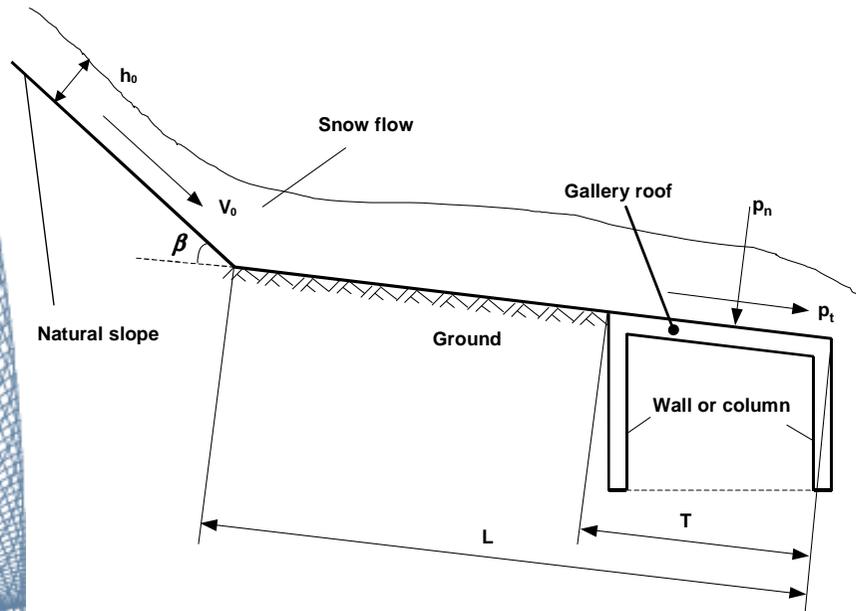
Chargement avalancheux => Issue de la dynamique des fluides en régime permanent → dimensionnement statique

Or, chargement évolutif dans le temps et incertain :

- Maintenance incertaine
- Effet de choc lors du passage du front
- Chaque avalanche est différente

1. Problématique du chargement avalancheux

Avalanche : composantes normale p_n et tangentielle p_t



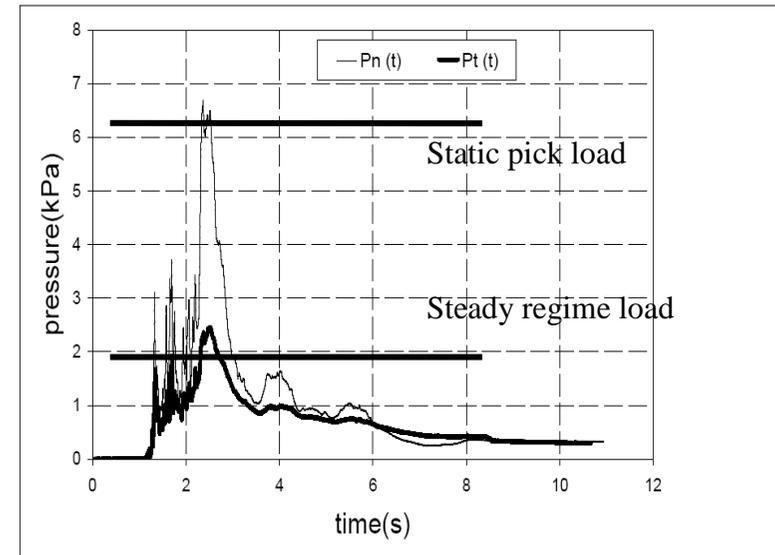
Dynamique fluide en régime permanent

$$p_n = \frac{\rho V^2 h_0 \sin \beta}{L}$$

$$p_t = c \cdot p_n$$

Avant 2007 : $0,3 < c < 0,4$ suivant le type de neige, la géométrie

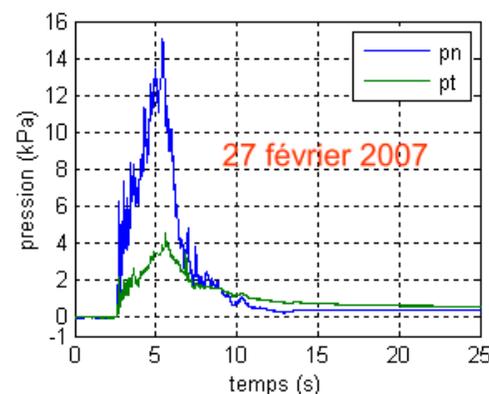
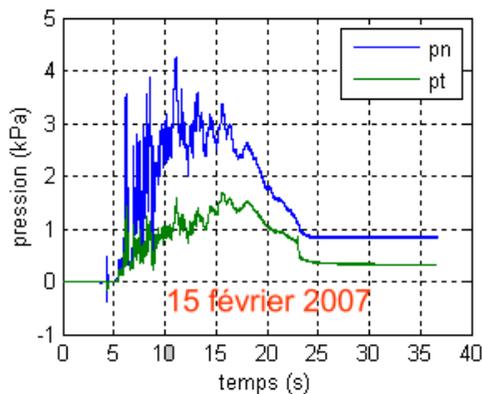
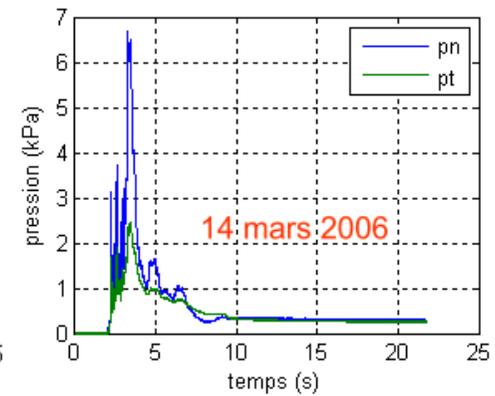
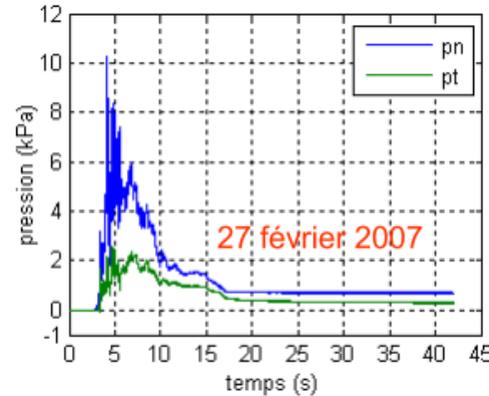
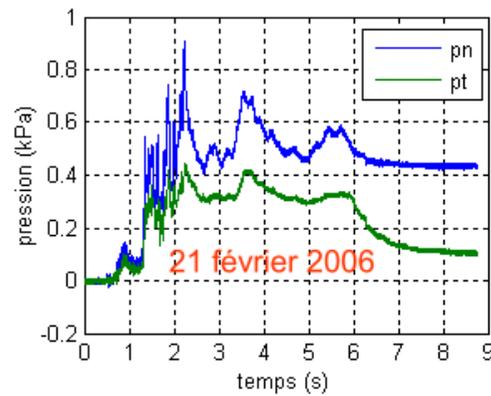
Depuis 2007 $0,2 < c < 0,55$ suivant les règles de construction suisse



Avalanche du 7 mars 2008

2. Variabilité du chargement avalancheux

Comportements des sollicitations :



➤ Comportement transitoire des sollicitations.

➤ P_n (0,6 à 15 kPa).

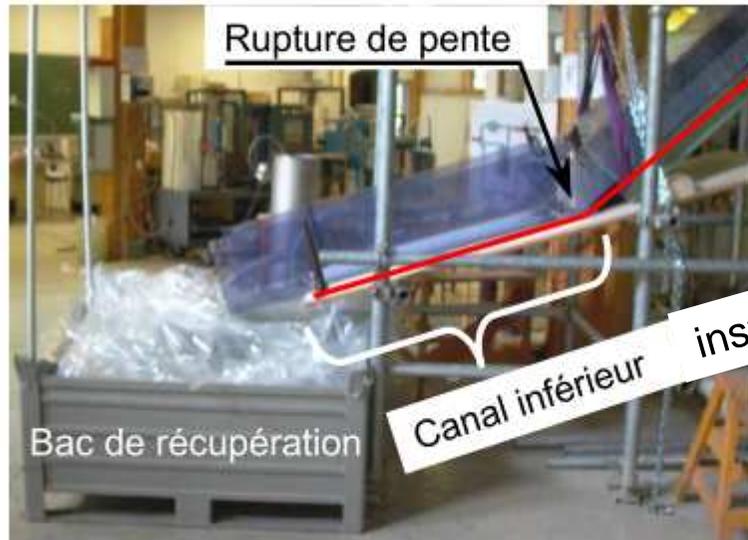
➤ P_t (0,3 à 4 kPa).

Le rapport $C = P_n / P_t$ est donc très variable.

1. Expérimentation écoulement en canal et réel

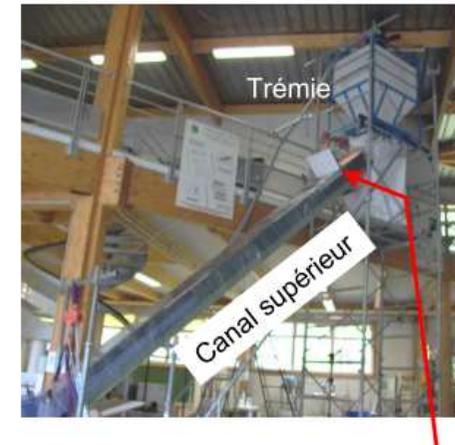
Thèse de Ying Ma (LOCIE)

Canal inférieur



L : 2 m
l : 50 cm
H : 30 cm

Canal supérieur



L : 6 m
l : 50 cm
H : 20 cm

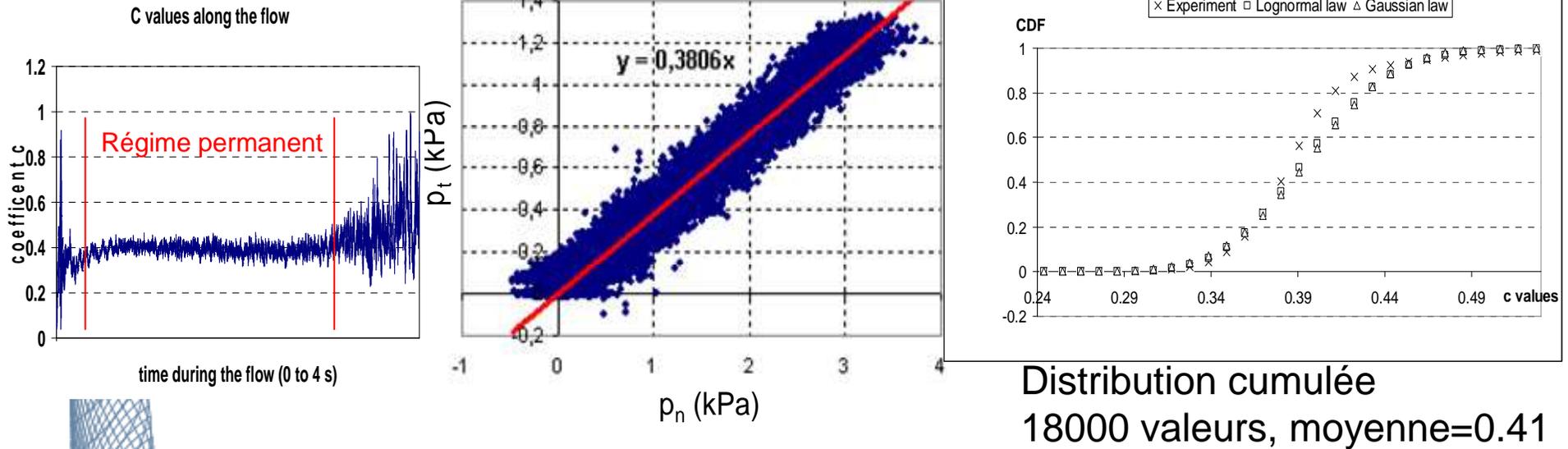
Inclinaison : 10°

Expérimentation réelle au col du Lautaret (col Cemagref)



2-variabilité du chargement avalancheux

Ecoulement bille de verre en canal instrumenté



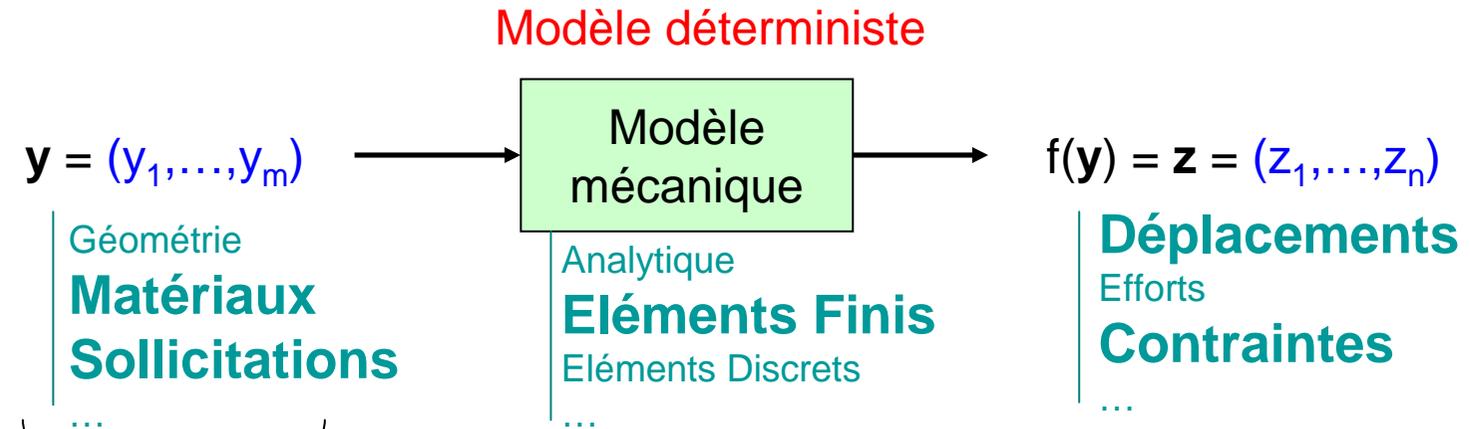
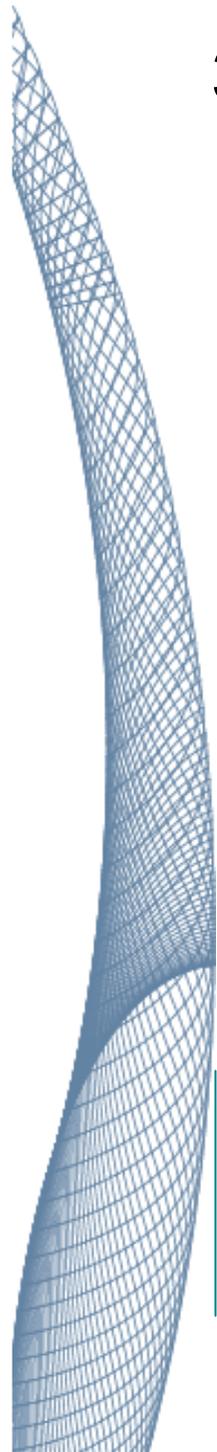
Relative stabilité pendant le régime permanent

Coeff c moyen équivalent très variable

($0,4 < c < 0,89$)

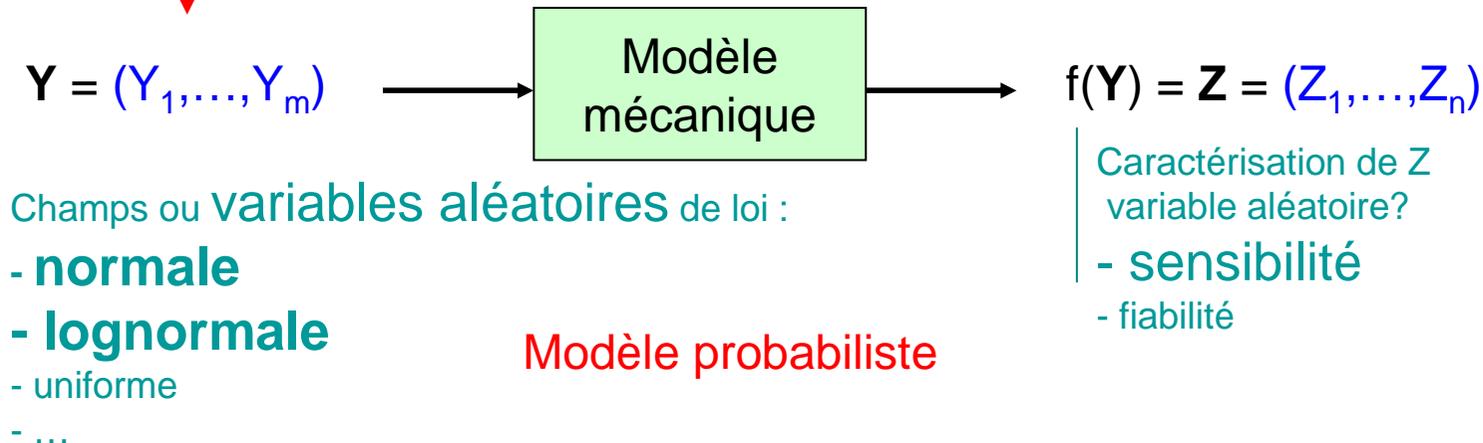
Distance adimensionnelle capteur/rupture de pente	1,67	3,33	5
c	0,38/0,41	0,72/0,61	0,58/0,65
Totalité/régime permanent			
Ecart type (coefficients of variation) of c (regime permanent)	0,07 (17%)	0,14 (23%)	0,13 (20%)

3-Propagation d'incertitude/étude de sensibilité



« Indicateurs de vulnérabilité de l'ouvrage »

Hypothèses probabilistes



3. Etudes de sensibilité de modèles

- **Méthode de Monte-Carlo** si modèle analytique ou numérique léger (linéaire, peu de degrés de liberté,...)

Mais si modèle EF « industriel » avec n(ddl) grand, comportement mécanique non linéaire, chargement dynamique,... qqs h à qqs jours de calcul...

- **Méthodes alternatives : quadrature** (EF « Stochastiques »)
- Méthode simple pertinente modèle mécanique couteux

$$I = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot p_z(t) \cdot dt = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot f(x_i)$$

poids

points

$$\tilde{\mu}_P = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot f(x_i);$$

$$\tilde{\sigma}_P^2 = \sum_{i=1}^N (f(x_i))^2 \cdot \omega_i - (\tilde{\mu}_P)^2$$

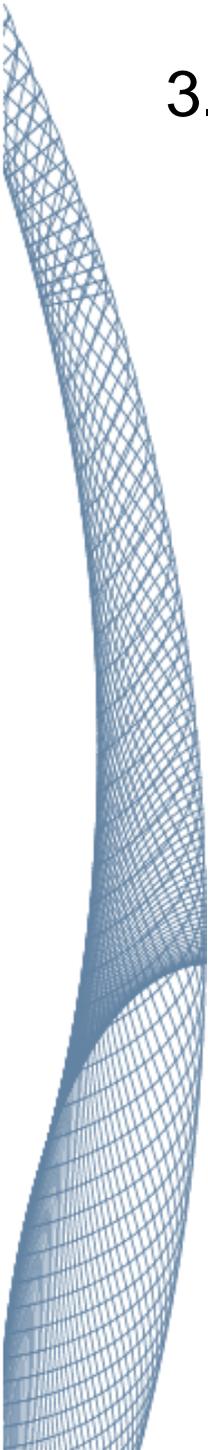
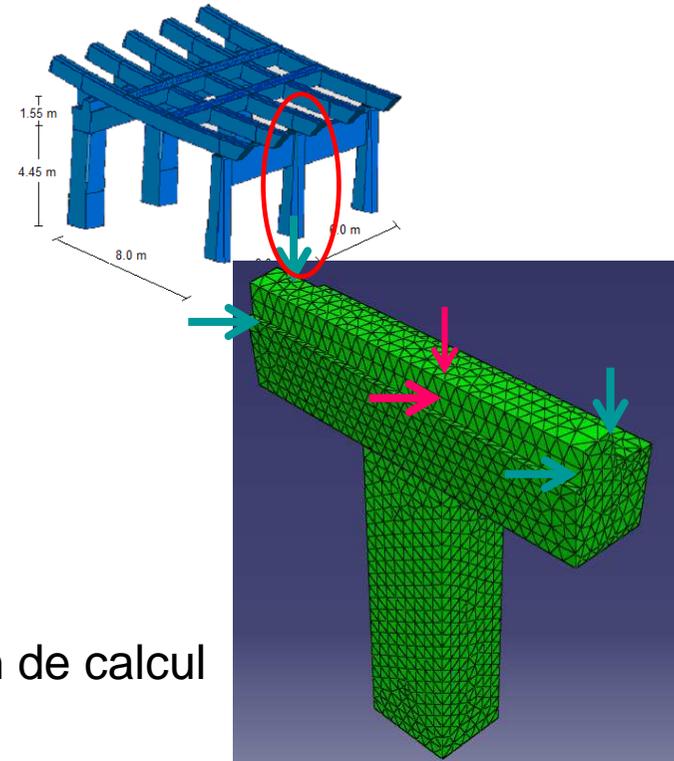
3. cas du paravalanche de Mautalever (Haute-Savoie)

2 stratégies : paramètres incertains
(p_n, p_t) ou $c = p_t/p_n$

Modèle MEF non Linéaire 3D
de la structure,
comportement du béton et
des aciers non linéaires , 6 à 12 h de calcul

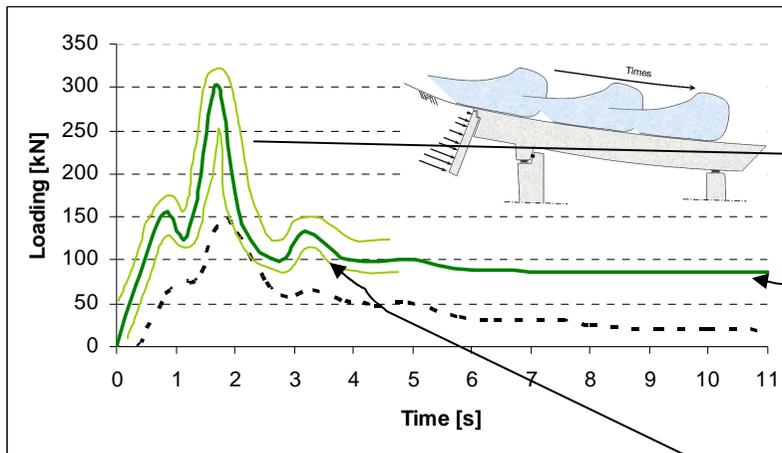
Indicateurs de vulnérabilité mécanique :
Déplacements max en tête poteaux
Contrainte max (compression) dans le béton
Déformation plastique max
Contrainte dans les armatures

Quelle incertitude des indicateurs de vulnérabilité ?



modélisation d'un chargement avalancheux

- Une seule avalanche mesurée, de composantes $y_n(t)$, $y_t(t)$
- Pour t fixé, intensité modélisée par une variable aléatoire de moyenne $y(t)$ et de variabilité croissante



Variable aléatoire de moyenne ρ_n, ρ_t, c
 Variabilité 5, 10, 20 %
 Lois normale et lognormale

$$\tilde{\mu}_P = \sum_{i=1}^N \omega_i \cdot g(x_i);$$

N points d'intégration

$$\tilde{\sigma}_P^2 = \sum_{i=1}^N (g(x_i))^2 \cdot \omega_i - (\tilde{\mu}_P)^2$$

Influence du coefficient c

$c(t) = p_t(t) / p_n(t)$, est LogNormal si p_n et p_t lognormal
Vérifier l'influence du nombre de points de collocation
Determiner le chargement le plus contraignant pour la structure

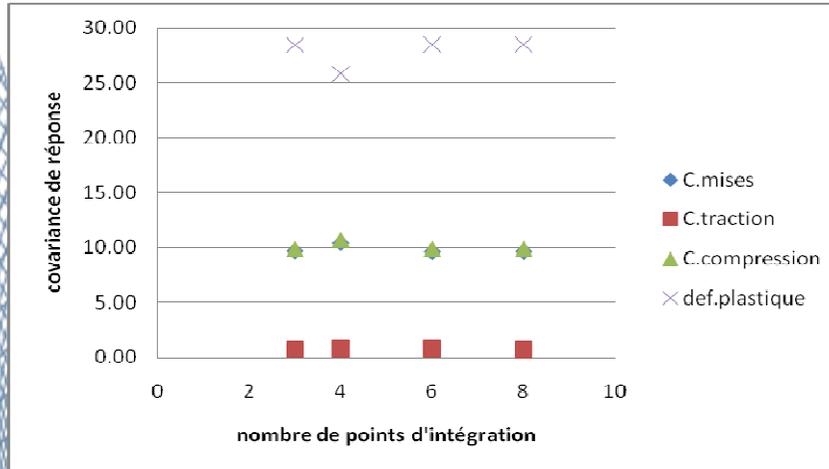
1^{ère} stratégie : peut on négliger l'influence de p_n , donc on considère uniquement l'influence de la variabilité de p_t

Intérêt : simplification

2^{ème} stratégie à chaque instant t , la variabilité sur c est considérée, à chargement résultant initial constant

Intérêt : plus précis, mais plus long mettre en œuvre

Influence du Nb de point de Gauss Variabilité $p_t = 10\%$

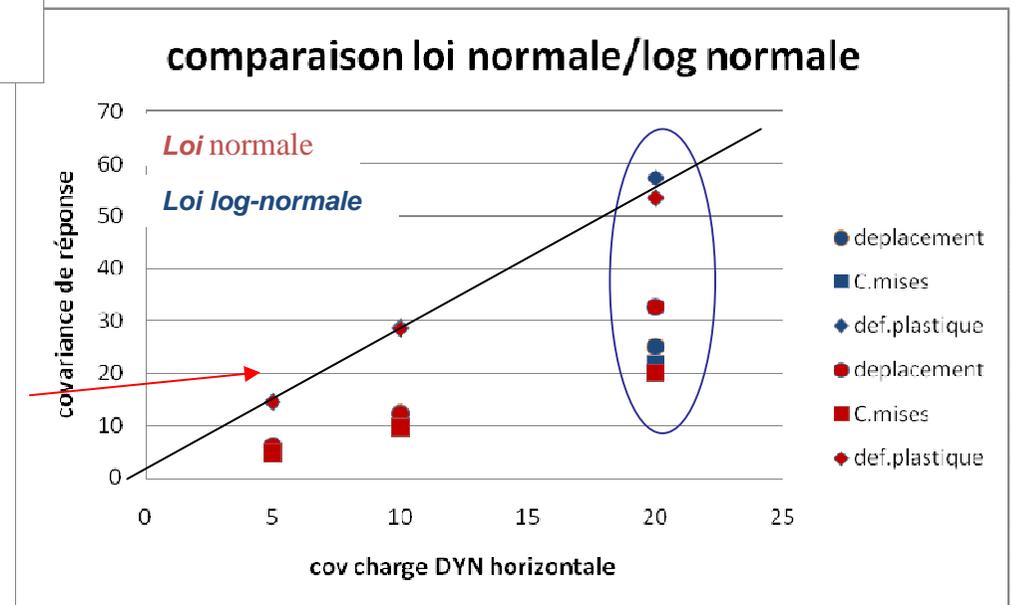


Peu d'influence : $N = 6$

Évolution linéaire du coefficient de variation

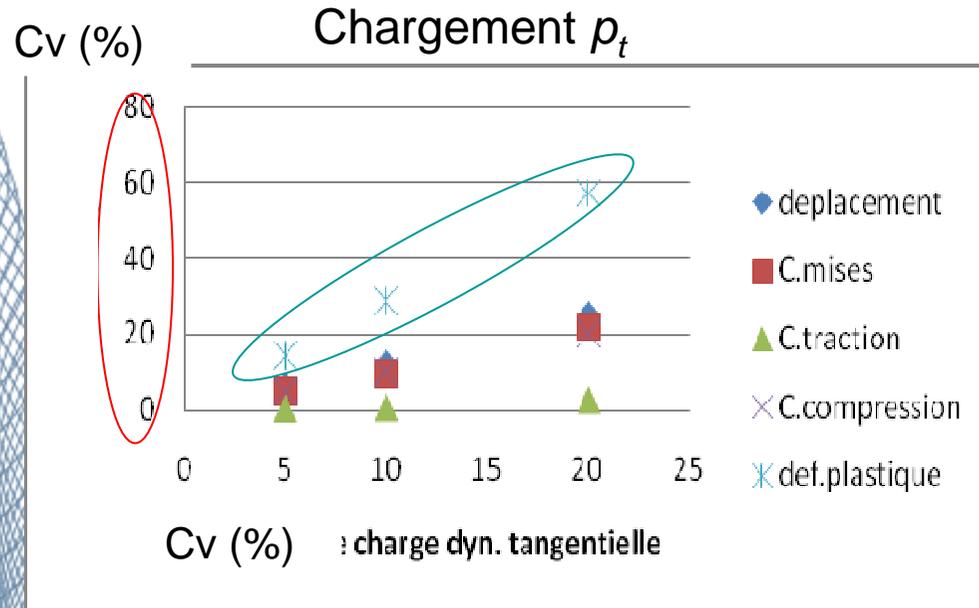
Influence des hypothèses de méthodologie

Influence de la loi de probabilité Gaussienne – Log Normale



Influence du type de loi peu marqué

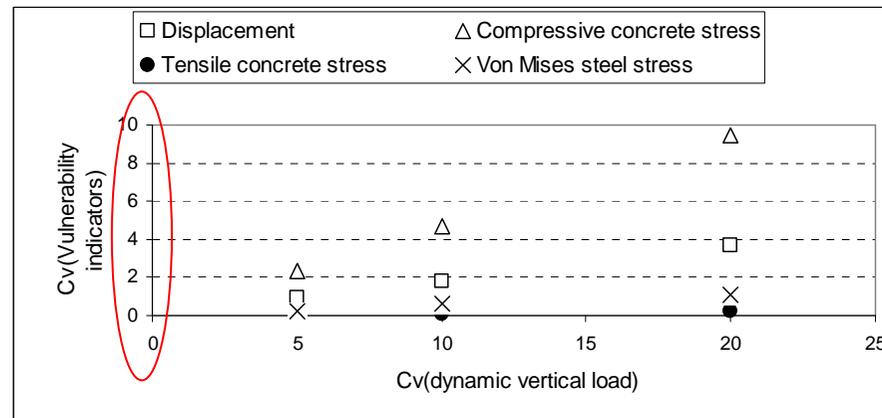
Influence des variabilités du module de chargement



Indicateur le plus sensible
déformation plastique béton
 = dégradation du béton en compression

variabilité de $p_n \ll$ variabilité de p_t
 ➤ Lié au caractère // ou \perp au flux de l'élément.
 ➤ Si élément de toiture sans doute variabilité $p_n \gg$ variabilité p_t ?

Chargement p_n



Variabilité des indicateurs de vulnérabilité pour $cv(c)=10\%$

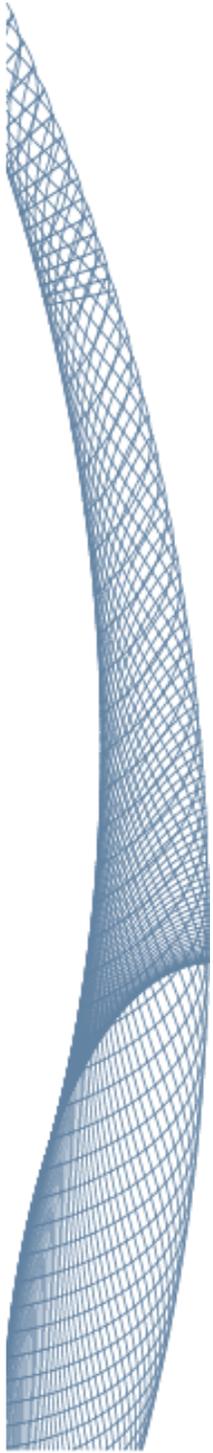
En %	u_{max}	σ_c_{max} béton	σ_t_{max} béton	σ_t_{max} armatures	ε_c_{max} plastif béton
1 ^{ère} stratégie loi log normale (p_t uniquement)	12.2	9.9	0.77	4.8	29
2 nd stratégie, loi log normale	5.6	2.2	0.06	7	7.5
2 nd stratégie, loi normale	6.7	2.8	1.3	9	9.8

Pas significatif = béton plastifié
=> ε_t max

Peu significatif = armatures peu sollicitées

Conclusions

- **Pratique de dimensionnement actuelle confirmée** : pour $p_t = c p_n$
 - Domaine de variation $0,3 < c < 0,4$ a faire évoluer suivant le type de neige, la géométrie
 - Dimensionnement en statique seulement
- Choix des paramètres incertains, p_t , p_n , c : p_t le + sensible
- Choix des **indicateurs de vulnérabilité - les + sensibles** :
 - déformation plastique du béton
 - déplacement en tête de poteau
- **Recommandations possibles règlement actuel discutable**
 - Dimensionnement en dynamique si possible (thèse Ying MA)
 - Etendre le domaine de variation : au moins $0,2 < c < 0,55$ (Suisse)
 - Au moins considérer deux extrema c_{min} , c_{max} correspondant à 2 combinaisons de charge distinctes, aux effets différents sur les éléments structuraux verticaux et horizontaux



Influence de la variabilité de c :

- Résultats différents pour les deux stratégies, suivant les indicateurs
- Indicateurs de déformation plastique béton très sensible à $c = \rho_t / \rho_n$
- $cv(\sigma_{t \max} \text{ béton})$ et $cv(\sigma_{t \max} \text{ armatures})$ peu significatives
- **première stratégie** : forte cv de c pour la déformation plastique béton en compression :
 - ⇒ c est -il un bon paramètre de dimensionnement?
 - ⇒ élargir encore le domaine des valeur c ? $c_{max} = 1$?
 - ⇒ Fournir des chargements Type //ou \perp ?
- **2eme stratégie** : cv plus faible
 - ⇒ relativise l'influence de C ;
 - ⇒ proposer non seulement un domaine de variation + grand de c (règlement suisse), mais recommander 2 combinaisons de chargements :
 - i) $\rho_t = c_{min} \rho_n$
 - ii) $\rho_t = c_{max} \rho_n$