

# Méthodes statistiques pour la définition des aléas de référence : le cas des avalanches

Nicolas ECKERT  
Cemagref, UR Erosion Torrentielle, Neige et Avalanches  
38402 Saint Martin d'Hères

ENGRF Montpellier, 4 décembre 2007

1

## Plan du cours/exposé

- 1. Avalanches et risque avalanche**
- 2. La notion d'aléa de référence et son applicabilité au domaine des avalanches**
- 3. Calcul d'aléas de référence par couplage données-modèles de propagation :**
  - Calibration d'un modèle de propagation sur les données locales
  - Quantification des incertitudes en prédiction
- 4. Approche décisionnelle du dimensionnement paravalanche**
  - Effet d'un obstacle sur le modèle d'aléa
  - Prise en compte des enjeux

Contexte et état de l'art


Recherche récente

2

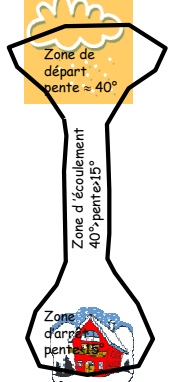
# 1. Avalanches et risque avalanche

3

## Avalanche et site avalancheux



Déclenchement sur site expérimental du Cemagref (05)





Vulnérabilités → Risques

4

## Avalanches denses

Description rapide du phénomène :  
Écoulement laminaire dense et rapide

Impact d'une phase dense sur une étrave métallique

Ordre de grandeur :

- Longueur : 1000 m
- Hauteur : 10 m
- Densité : 100-500 kg/m<sup>3</sup>
- Vitesse : jusqu'à 50 m/s
- Pression : 30-300 kPa

5

## Avalanches aérosols et mixtes

Description rapide du phénomène :

- Particules de glace en suspension dans l'air
- Neige froide et sèche sans cohésion




Ordre de grandeur :

- Hauteur : 100 m
- Densité : 2-5 kg/m<sup>3</sup>
- Vitesse : jusqu'à 100 m/s
- Pression : 10-50 kPa (10 kPa = 1 t / m<sup>2</sup>)

Surmonte en général une phase dense !

6

## Moyens d'étude (1) : expérimentation in situ

Col du Lautaret :

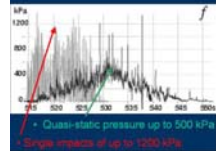


- Longueur : 300 à 800 m
- Dénivelé : 200 à 500 m (zone d'arrêt à 2100 m)
- Neige mobilisée : 1000 m<sup>3</sup> – 2000 m<sup>3</sup>
- Vitesse : 20-40 m/s

Vallée de la Sionne (Suisse) :



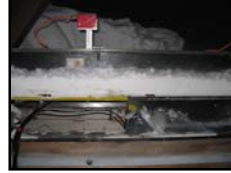
- Longueur : 2500 m (de 1450 m à 2650 m)
- Dénivelé : 1200 m
- Bunker à 1650 m en face du couloir



7

## Moyens d'étude (2) : expériences en laboratoire

Canal pour l'étude d'écoulements de neige dense :



Bassin noyé pour la modélisation des avalanches poudreuses par bouffées et courants de densité :



Avalanche granulaire sur plan incliné et interaction avec obstacle :

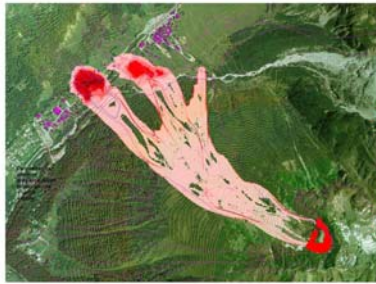


8

## Moyens d'étude (3) : modélisation numérique

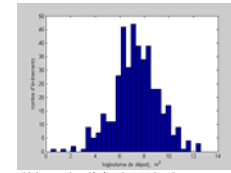
Propagation des avalanches très étudiée : plus de 50 modèles d'après Harbitz 1999  
- différents types d'avalanches : sèche ou humide, dense et/ou aérosol  
- différentes échelles de description (solide, fluide monophasique, fluide « bicouche ») : compromis description/temps calcul  
- loi de comportement (coefficients de frottement) reste discutée

Modélisation numérique sur le site de Montroc (74) : Description fluide 3D moyennée sur la verticale



## Moyens d'étude (4) : l'information historique

- Données avalanches rares
- En France : EPA, CLPA, etc.
- Un contexte favorable : la rénovation des bases de données avalanches



L'EPA est particulièrement intéressante :

- Échantillon de sites suivis aussi exhaustivement que possible
- Séries assez longues
- Date des événements
- Données quantitatives (altitudes de départ et d'arrêt, volumes des dépôts)
- Données catégorielles (nivo-météorologie, dégâts)
- Qualité discutable mais en amélioration

10

## Caractéristiques du risque avalanche

Une menace :

- saisonnière (novembre/mai en France)
- localisée (600 communes en France)
- soudaine : évacuation préventive seulement
- brutale : capacité de destruction
- multivariée : distance d'arrêt, pression, etc..



Maison détruite par une avalanche aérosol (38)

Pour qui ?

- Concerne avant tout les pratiquants de sports de montagne
- Constructions et infrastructures routières menacées plus ponctuellement
- Pression foncière forte
- Coûts humains élevés (30 morts/an en France)
- Coûts matériels variables (500 millions d'€ en 98/99 en Europe)



Catastrophe de Montroc (74), sauveteurs au travail

## Les outils de gestion du risque (1) : la prévision

Acquisition de données météo → Evolution du manteau neigeux



Bulletins d'avalanches, Affichage du niveau de risque



Calcul d'un niveau de risque

En France : par massif, versant et tranche d'altitude

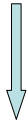
PIDA : Plan d'Intervention et de Déclenchement des Avalanches

Fermetures de routes et évacuations préventives

12

## Les outils de gestion du risque (2) : la prédétermination

Gestion à long terme de l'aménagement du territoire



Zonage (volet avalanches des Plans de Prévention des Risques)

Ouvrages de protection paravalanches



Protection paravalanche active



Protection paravalanche passive

13

## 2. La notion d'aléa de référence et son applicabilité au domaine des avalanches

14

## Définir plus rigoureusement un aléa de référence

Prédétermination basée historiquement sur l'expertise :

Définition par assemblage plus ou moins subjectif d'un ou plusieurs **aléas de référence**

Réalisation d'intensité élevée du phénomène utilisée pour la prédétermination

Hiver 1998/99 catastrophique :



Catastrophe de Montroc, 9 février 1999, chalet détruit et déplacé

Demande forte pour des méthodes plus systématisées

Caractérisation de l'aléa de référence en  **période de retour**

15

## L'exemple de l'hydrologie stochastique

**Théorie des valeurs extrêmes :**

Convergence des valeurs extrêmes d'un processus vers des lois limites bien connues

**En particulier :**

- convergence des dépassements indépendants d'un seuil vers une loi GPD dès lors que le seuil est assez haut (Pickands, 1975)
- les nombres de dépassements sont poissonniens

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pr(X \leq y + c | X > c) = 1 - \left(1 + \frac{c}{\eta} y\right)^{-1/\xi} \\ \Pr(K = k | \lambda, T) = \exp(-\lambda T) \frac{(\lambda T)^k}{k!} \end{array} \right.$$

Figure 2. Au dépassement  $Y$  du seuil  $c$ , il correspond l'intensité  $X = Y + c$ .

**Modélisation des débits de crues et crues de projets**

- crues centennales pour le zonage
- dimensionnements décennaux des grands ouvrages hydrauliques

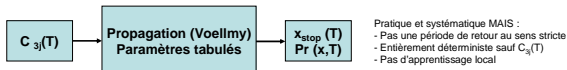
**Bien sûr :**

- Hypothèses discutables (max stabilité, stationnarité)
- C'est (beaucoup) plus difficile pour des phénomènes multivariés

16

## Période de retour : les méthodes « traditionnelles »

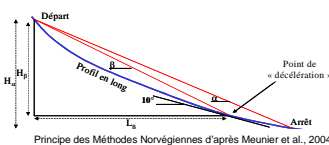
La « **méthode suisse** » : période de retour de la chute de neige et modèle de propagation (Salm et al., 1990)



Pratique et systématique MAIS :

- Pas de variabilité des positions de départ
- Entièrement déterministe sauf  $C_3(T)$
- Pas d'apprentissage local

Les « **méthodes norvégiennes** » : des approches statistiques plus standard : Lied et Bakkehoi (1980), McClung et Lied (1986), Keylock (2005)



Principe des Méthodes Norvégiennes d'après Meunier et al., 2004

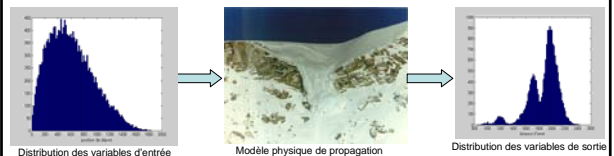
Relation distance d'arrêt-période de retour MAIS :

- Pas de dynamique
- Pas de variabilité des positions de départ
- Souvent mélange de données pour l'apprentissage
- Extrapolation des valeurs de projet douteuse car distance d'arrêt pas intrinsèque

17

## Période de retour par combinaison statistique/propagation

Les méthodes « **statistiques-dynamiques** » : (Barbolini et Savi (2001) ; Bozhinsky et al. (2001), Meunier et al (2001), Barbolini et Keylock (2002)



Approche de type Monte Carlo

- Calcul de périodes de retour à partir de la distribution des distances d'arrêt MAIS :
- Distribution des variables d'entrée ex nihilo (pas d'apprentissage local)
- Hypothèses d'indépendance abusives

L' « **approche conceptuelle** » : Meunier et al. (2004) :

- Modèle de propagation assimilé à une fonction de transfert
- Valorisation des BD avalanches pour la calibration et plus généralement assemblage des connaissances

MAIS difficultés techniques à surmonter :

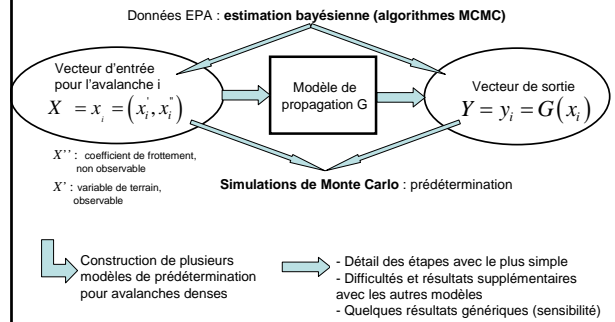
- Calibration probabiliste du modèle de propagation
- Répercussion des incertitudes en prédiction

18

### 3. Calcul d'aléas de référence par couplage données-modèles de propagation

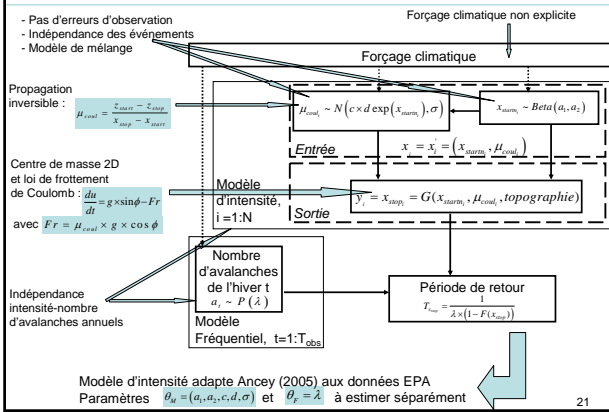
19

### Coupler données et modèle de propagation



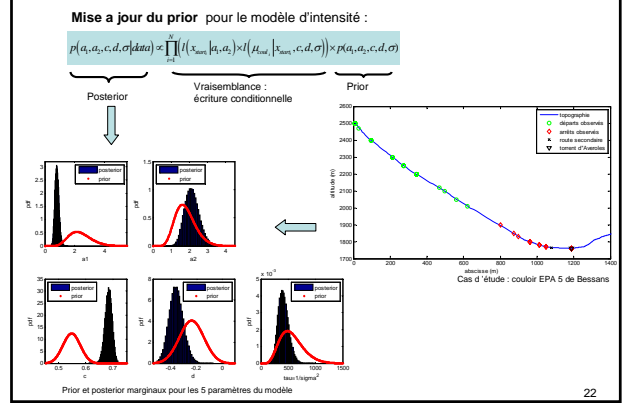
20

### Un modèle extrêmement simplifié inversible



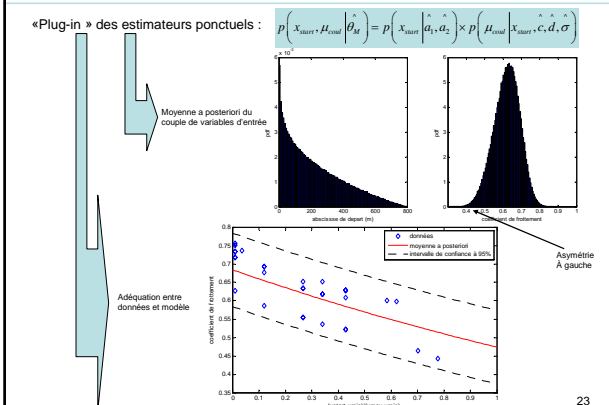
21

### Estimation bayésienne du modèle d'intensité inversible



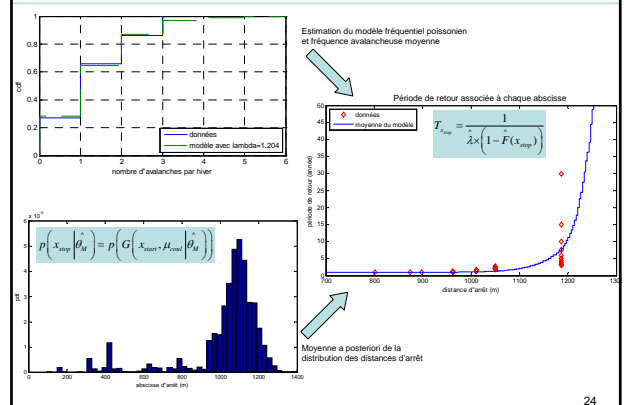
22

### Moyennes a posteriori des variables



23

### Combinaison intensité-fréquence et périodes de retour



24

## Lois prédictives des variables

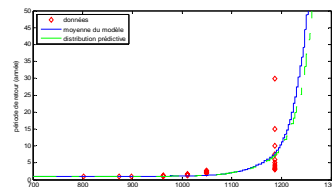
Lois prédictives des variables d'entrée par intégration sur la loi a posteriori :

$$p(x_{stop}^{post}, \mu_{post}^{post} | data) = \int p(x_{stop}^{post}, \mu_{post}^{post} | \theta_{\mu}) \times p(\theta_{\mu} | data) \times d\theta_{\mu}$$

	Moy.	SD	Q <sub>2.5</sub>	Q <sub>97.5</sub>
$\mu_{post}$	0.631	0.083	0.587	0.692
$\mu_{post}^{post}$	0.62	0.072	0.471	0.75
$x_{stop} (m)$	213.9	174.7	28.5	343.1
$x_{stop}^{post} (m)$	221.5	182.7	3.2	647.3

Lois prédictive de la distance d'arrêt :

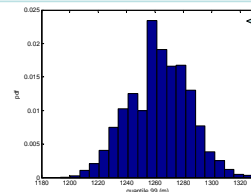
$$p(x_{stop}^{post} | \mu_{post}^{post}, \mu_{post}^{post}, data) = p(G(x_{stop}^{post} | \mu_{post}^{post}, \mu_{post}^{post} | data))$$



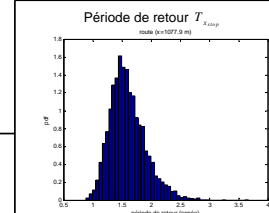
Distributions plus dispersées que les moyennes a posteriori :  
Incertitude additionnelle liée à l'erreur d'estimation

25

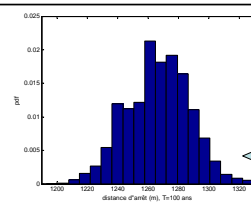
## Lois prédictives des valeurs de projet



Quantile de distance d'arrêt  $x_{stop,q}$   
 $p(x_{stop,q} | data) = \int F_{x_{stop,q}}^{-1}(q/100) \times p(\theta_{\mu} | data) \times d\theta_{\mu}$



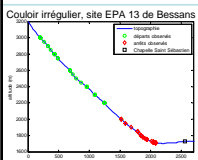
Période de retour  $T_{stop,q}$   
 $p(T_{stop,q} | data) = \frac{1}{\lambda \times (1 - F(x_{stop,q} | \theta_{\mu}))} \times p(\theta_{\mu} | data) \times p(\lambda | data) \times d\theta_{\mu} \times d\lambda$



Quantile annuel  $x_{stop,T}$   
 $p(x_{stop,T} | data) = \int F_{x_{stop,T}}^{-1}(1 - \frac{1}{T}) \times p(\theta_{\mu} | data) \times p(\lambda | data) \times d\theta_{\mu} \times d\lambda$

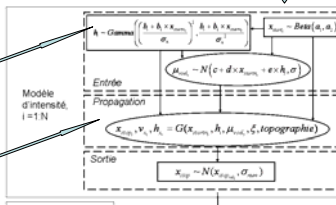
26

## Limites topographiques et modèle non inversible



$\epsilon = x_{stop} - x_{stop,limit}$  non négligeable  
Le modèle de Coulomb est limité aux distances d'arrêt

Modèle de prédétermination avec propagation non inversible



$h = 2.5 + 5 \times 10^{-3} \times \sqrt{N_{stop}}$   
Calcul des hauteurs de bloc à partir des dépôts (Meunier et al., 2004)

$\frac{d\mu}{dt} = g \times \sin \phi - \mu_{crit} \times g \times \cos \phi + \frac{g}{\sigma_{crit}} \times v^2$   
Centre de masse et loi de frottement de «voelmy»

Paramètres  $\theta_{\mu} = (a_1, a_2, h, b_1, \sigma, c, d, e, \sigma, \xi)$   
et variables latentes  $\mu_{post}, x_{stop}$  à estimer

27

## Estimation bayésienne d'un modèle non inversible

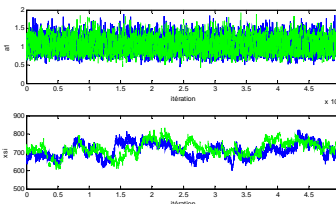
Théorème de Bayes pour toutes les inconnues :

$$p(\theta_{\mu}, \mu_{post}, x_{stop} | data, \sigma_{\mu}) \propto p(\theta_{\mu}) \times \prod_{i=1}^n (p(x_{stop,i}, h_i, x_{stop,i} | \theta_{\mu}, \mu_{post}, x_{stop,i}, \sigma_{\mu})) \times p(\mu_{post}, x_{stop} | \theta_{\mu}, x_{stop}, h_i, x_{stop}, \sigma_{\mu})$$

Conditionnalité et propagation déterministe :

$$p(x_{stop,i}, h_i, x_{stop,i} | \theta_{\mu}, \mu_{post}, x_{stop,i}, \sigma_{\mu}) = p(x_{stop,i} | \theta_{\mu}, h_i, \sigma_{\mu}, x_{stop,i}) \times p(h_i | \mu_{post}, x_{stop,i})$$

$$p(\mu_{post}, x_{stop} | \theta_{\mu}, x_{stop}, h_i, x_{stop}, \sigma_{\mu}) = p(\mu_{post} | \theta_{\mu}, x_{stop}, h_i, x_{stop}, \sigma_{\mu}) \times p(G(x_{stop} | \mu_{post}, h_i, x_{stop}, \sigma_{\mu}))$$



Algorithme MCMC de Metropolis-Hastings :  
- itération séquentielle  
- réglages fins

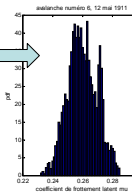
Vérification de la convergence :  
- taux d'acceptation optimaux  
- test de Gelman et Rubin  
- données simulées

Valeurs successives prises par deux chaînes pour deux paramètres

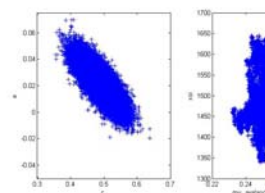
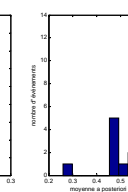
28

## Lois a posteriori

Loi a posteriori des coefficients de frottement latents



Estimateurs ponctuels



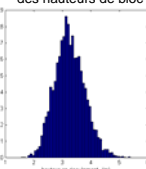
Corrélations a posteriori inter paramètres

Compensations, en particulier entre les coefficients de frottement

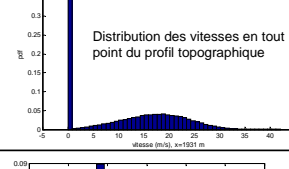
29

## Moyenne a posteriori : un modèle plus riche

Distribution des hauteurs de bloc

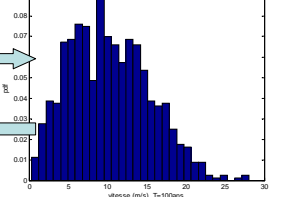


Distribution des vitesses en tout point du profil topographique



Distribution des vitesses correspondant aux distances d'arrêt de projet :

Scenarii de référence



30

### Un modèle fluide encore plus riche

Description fluide de l'écoulement (Saint Venant) et loi de frottement de «Voellmy» :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hv)}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha_m \times hv^2 + k_m \times \frac{h^2}{3}) = h \times [g \sin \phi - F_{vol}]$$

avec  $F_{vol} = \mu_{vol} \times g \times \cos \phi + \frac{g}{\epsilon_{vol}} \times v^2$

Scenarii de référence mieux caractérisés : hauteurs maximales et régimes d'écoulement correspondant aux distances d'arrêt de projet

Toutefois :  
- longueur de zone de départ à définir  
- temps de calcul longs

31

### Pression d'impact tenant compte de la rhéologie

$Pr = Cx \times \frac{1}{2} \rho_N \times v^2$  : un Cx constant ne rend pas compte de la rhéologie de la neige

Formule théorique pour un fluide visqueux (Naaim, 2007) :

$$Cx = 0,6 \times \left( 1 + 9 \left( \frac{d_v \times F_v^2}{\mu_{vol} \times \frac{g}{\epsilon_{vol}} \cos(\phi)} \right)^{-1,2} \right)$$

- Dimensionnement structural  
- Scenarii de référence « complets »

32

### Prise en compte de l'information a priori

Différents moyens d'obtention de lois a priori :

- Expertise « subjective »
- Lois non informatives
- Couloir d'apprentissage

Nécessité d'un prior assez informatif pour le coefficient de frottement turbulent

Analyses de sensibilité

Possibilité de le fixer moyennant précautions

Modèle Voellmy bloc glissant avec 3 priors différents sur  $\epsilon_{vol}$

Vitesses centennales,  $\epsilon_{vol}$  estimé ou fixé

33

### Sensibilité au modèle de propagation

Traitement du même cas d'étude avec trois modèles de propagation :

- Deux modèles assez proche
- Le modèle empirique est plus pessimiste
- L'information (prior, données) n'est pas tout à fait équivalente

Le modèle fluide s'adapte mieux aux irrégularités de terrain

Les vitesses sont moins fortes avec le modèle fluide qu'avec le modèle de bloc glissant

34

### Incertitude et distances d'arrêt de référence

	Moy.	SD	Skew.	$q_{0,5}$	$q_{0,95}$
$X_{10ans}$ (m)	2110,4	29,3	0,17	2055,3	2169,6
$X_{30ans}$ (m)	2188,4	33	0,37	2127,9	2256,8
$X_{100ans}$ (m)	2262,3	40,3	0,71	2191,8	2353,8
$X_{300ans}$ (m)	2325	49	0,72	2243,3	2434,3

Quantiles annuels : Augmentation de la moyenne, de la variance et de l'asymétrie avec la période de retour

Couloir EPA 13 de Bessans, modèle de Coulomb bruté

35

### Bilan sur la prédétermination locale

**Des hypothèses toujours effectuées :**

- Indépendance intensité/fréquence
- Forçage climatique non explicite
- Pas d'erreur d'observation (prétraitement)
- Données indépendantes
- Modèles paramétriques de type lois de mélange avec corrélations explicites
- Période de retour pour la distance d'arrêt seulement

**Des choix de modélisation :**

- Modèle de propagation
- Nature des entrées/sorties
- Modèle stochastique décrivant les entrées/sorties
- Modèle de prior

**Différents modèles pour la prédétermination locale selon :**

- information disponible
- temps calcul supportable
- précision recherchée

**Cadre rigoureux pour la prédétermination par couplage donnée-modèles**

**Pour la suite :**

- Confrontation des approches
- Travail sur la zone de départ
- Filtrage des données

Sensibilité à certaines hypothèses étudiée MAIS

- difficulté à valider les scénarii de référence
- Limites liées à la qualité des données
- Problèmes des données d'entrées à adapter

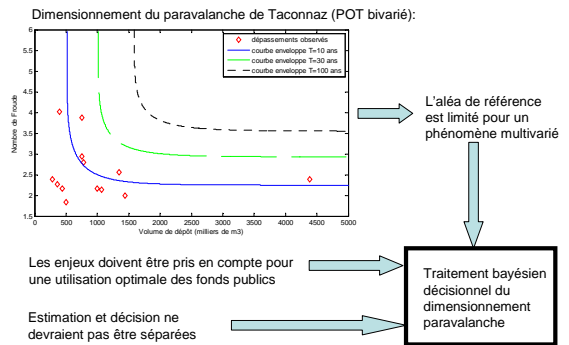
36



## 4. Approche décisionnelle du dimensionnement paravalanche

37

## Les limites d'un aléa de référence



38

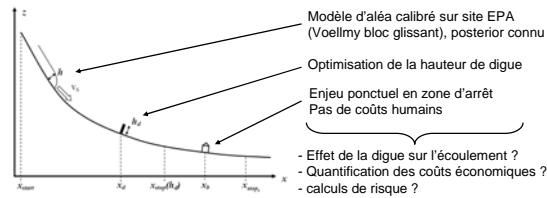
## Optimisation d'une digue paravalanche

### Approches décisionnelles dans le domaine des avalanches :

- Calculs de risques classiques pour le zonage (législation islandaise, Arnalds et al., 2004)
- Analyses coût/bénéfices pour le dimensionnement d'ouvrages de protection (Bouval, Wilhelm 1999)

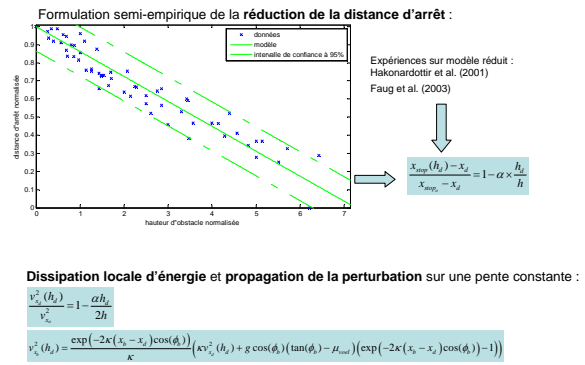
- Pas d'optimisation d'ouvrage
- Pas de prise en compte de l'information locale

### Traitement propre d'un cas simple : une digue verticale



39

## Modélisation des effets de l'ouvrage



40

## Quantification des coûts

### Coût total à partir de la date de construction de la digue :

$$C(h_d, y, a) = C_c(h_d) + \sum_{t=1}^a \frac{1}{(1+i)^t} \times C_d(h_d, y, a)$$

$$C(h_d, y, a) = C_c h_d + A_c \times E_d[a|\theta_c, \theta_d] \times C_d(h_d, y)$$

$$\text{Actualisation totale} \quad \text{Fréquence moyenne au dépassement} : \tilde{E}_d[a|\theta_c, \theta_d] = \lambda \times (1 - F_{sup}(x_d))$$

### Introduction d'un état de référence (sans digue)

$$u(h_d, y, a) = C_c h_d + A_c \times E_d[a|\theta_c, \theta_d] \times (C_d(h_d, y) - C_d(0, y))$$

- Dépendance en vitesse du coût des dommages
- Seuils en vitesse (Salm et al., 1990)

$$I_{[v_{sup}(h_d) > v_m]} \times \left( \frac{v_s(h_d) - v_m}{v_{sup} - v_m} I_{[v_m < v_s(h_d) < v_m]} + I_{[v_s(h_d) > v_m]} \right)$$

41

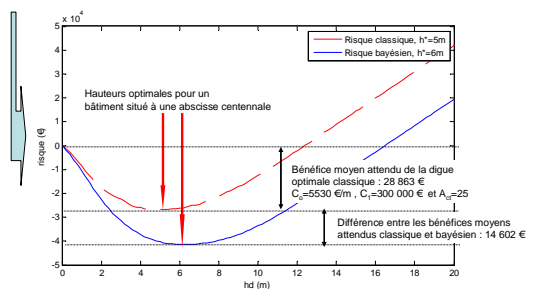
## Optimisation et effet de l'incertitude locale

### Calcul des fonctions de risque classique et bayésienne :

$$R_c(h_d, \theta_m, \theta_d) = E_{p,u} [u(h_d, y, a)]$$

$$R_b(h_d) = E_{p,u} [R_c(h_d, \theta_m, \theta_d)] = \int R_c(h_d, \theta_m, \theta_d) \times p(\theta_m, \theta_d) \text{data} \times d\theta_m \times d\theta_d$$

- Seuillage du modèle d'aléa
- Intégration numérique



42

## Position de l'enjeu et effets topographiques

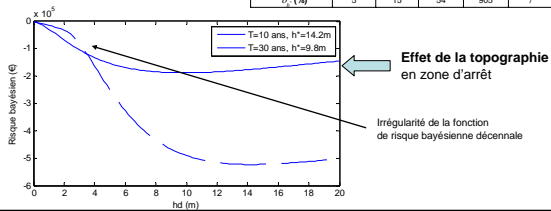
### Optimums économiques pour différentes position d'enjeux :

- Hauteur et bénéfice optimaux diminuent avec la période de retour
- L'effet de l'incertitude augmente avec la période de retour

	$T_{10}$	$T_{30}$	$T_{100}$	$T_{300}$	$T_{1000}$
$h_1^*$ (m)	13.2	8.6	5.0	0.6	0.0
$h_2^*$ (m)	14.2	9.8	6.0	2.8	0
$\delta_1^* = h_1^* - h_2^*$ (m)	1.0	1.2	1.0	2.2	0
$\delta_2^*$ (%)	8	14	20	367	/

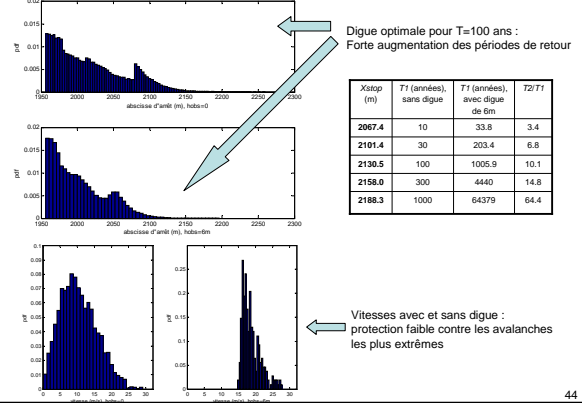
  

	$T_{10}$	$T_{30}$	$T_{100}$	$T_{300}$	$T_{1000}$
$h_1^*$ (€)	497 824	163 499	28 863	422	0
$h_2^*$ (€)	522 965	187 868	41 465	4247	0
$\delta_1^* = h_1^* - h_2^*$ (€)	25 141	24 369	14 602	3624	0
$\delta_2^*$ (%)	5	15	54	905	/



43

## Calcul de l'aléa résiduel



44

## Bilan sur le dimensionnement optimal

### Piste de recherche nouvelle et prometteuse :

- Construction d'un cadre formel complet (complète le modèle d'aléa exposé précédemment)
- Décision tenant compte de l'information locale grâce au formalisme bayésien
- Calcul analytique possible si hypothèses supplémentaires

### Mais cas de figure très simple

- avalanches denses de neige sèche
- digue verticale
- optimisation de la hauteur uniquement

### Pour la suite :

- différents types d'aléas
- différents types d'obstacles
- plusieurs variables de décision
- formalisation des dommages plus fine



Avalanche aérosol (73)

45

## Synthèse et conclusion

### Un risque assez spécifique :

- Localisation dans le temps et l'espace, coûts humains
- Méconnaissance des processus élémentaires
- Difficulté à définir et utiliser l'aléa de référence

### Marier statistique et dynamique des avalanches :

- Pallier à la méconnaissance des processus par l'apprentissage
- Distinguer les sources d'incertitudes et les répercuter en prédiction

### Une approche intégratrice et assez neuve :

- Modélisation numérique
- Données historiques EPA
- Expertise dans le cadre bayésien
- Effet des obstacles
- Des résultats mais encore de la place pour de nouveaux développements

46