

## Les séminaires de l'IPGS

31 Octobre 2007

# Morphologie et dynamique des laves torrentielles boueuses. Applications aux torrents évoluant dans les 'Terres Noires'



Alexandre Remaître

Institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS)

(alexandre.remaître@eost.u-strasbg.fr)



## Des catastrophes dans le monde :

- 1985 : lahars du ***Nevado del Ruiz*** détruisant la ville ***d'Armero (Colombie)***, 23 000 victimes ;
- 1999 : laves torrentielles dans l'état de ***Miranda (Venezuela)***, 15 000 victimes ;

## ... en Europe :

- 1998 : laves torrentielles dans la région de ***Sarno-Quindici (Campanie, Italie)***, 161 victimes ;
- 2002 : laves torrentielles dans le village de ***Rueun (Grisons, Suisse)***, 12M € de dégâts.



État de Miranda, Venezuela, 1999

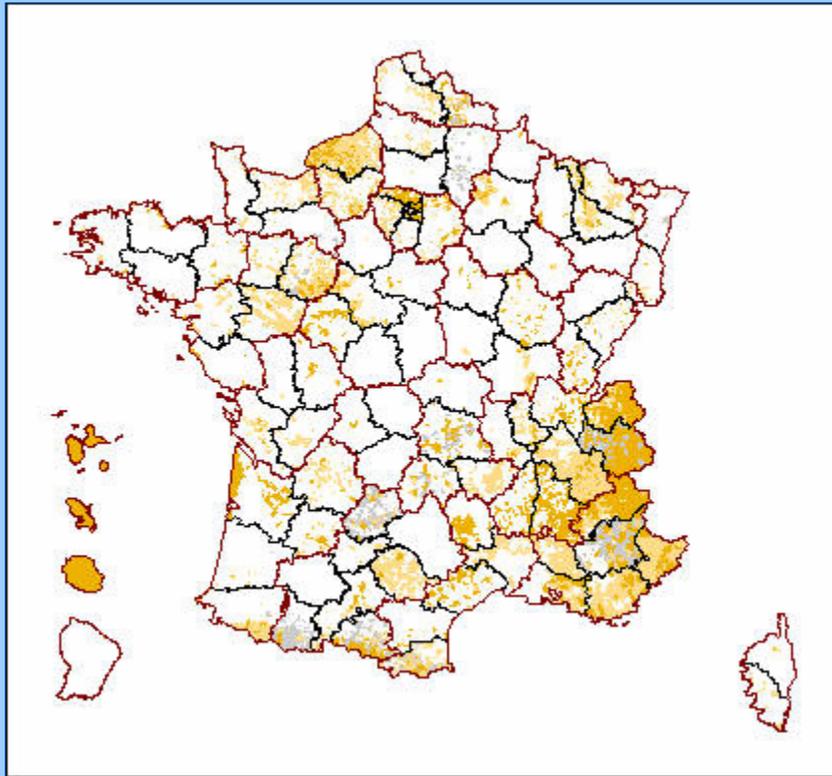


État de Miranda, Venezuela, 1999



Rueun, Suisse, 2002

## Un risque 'réel' en France :



Torrent de Faucon, août 2003

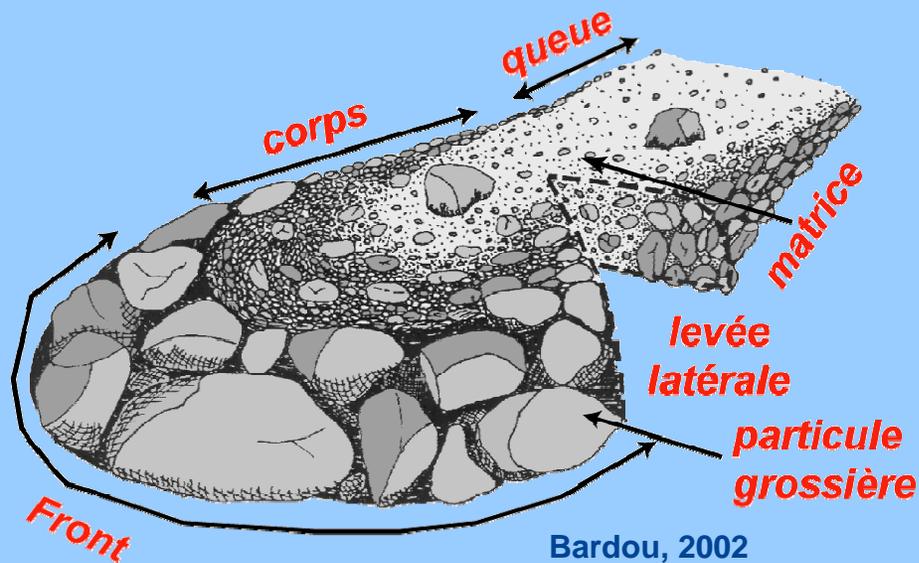
## ... et en France :

- 1970 : coulée de boue sur le **plateau d'Assy (Haute-Savoie)**, 40 victimes ;
- 1987 : lave torrentielle du torrent de **St-Antoine (Haute-Savoie)**, 10M € de dégâts.

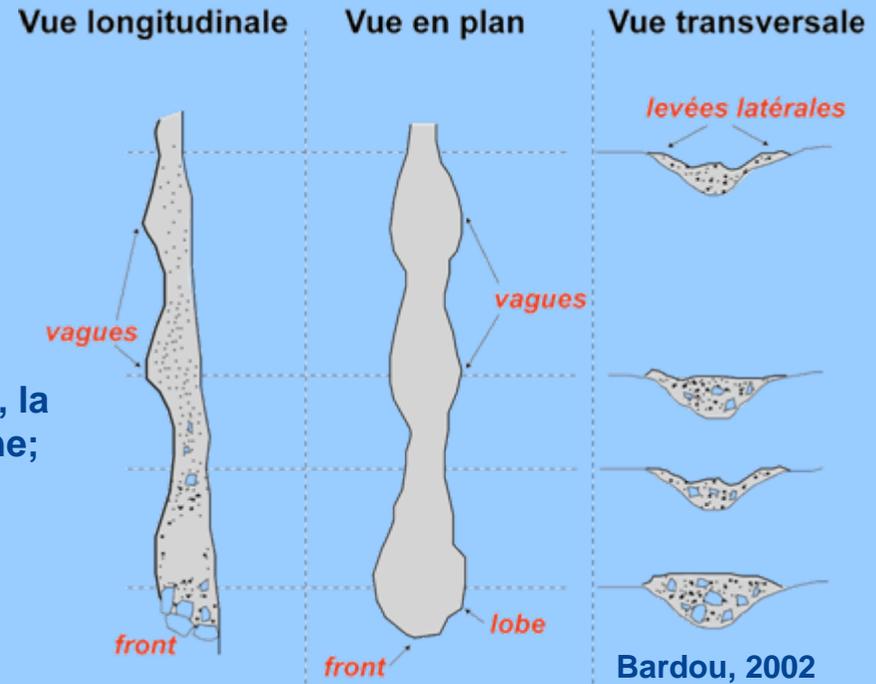
Sur les 7 000 communes concernées par le risque '**mouvement de terrain**', **4 500** sont menacées par **le risque torrentiel**.

## Caractéristiques des laves torrentielles :

- Vitesses comprises entre 0.5 et 20 m.s<sup>-1</sup> ;
- Extension spatiale kilométrique ;
- Matériau constitutif : dense, hautement concentré, gamme granulométrique étendue
- Écoulement transitoire par bouffées, non uniforme.
- Typiquement pas de structuration verticale du corps, la lave est considéré comme monophasique et homogène;
- Capacité de transport énorme.



Bardou, 2002



Bardou, 2002

‘Les ‘**laves torrentielles**’ sont des **volumes** importants (de quelques m<sup>3</sup> jusqu’à plusieurs millions de m<sup>3</sup>) d’un **mélange** d’eau, de sédiments (jusqu’à plusieurs mètres de diamètre) et de matières organiques, **fortement concentré** (entre 45 et 80% en volume de fraction solide dans l’écoulement) s’écoulant dans **les torrents de montagne**’

Coussot, 1996

## Terminologie rhéologique :

- ➔ 3 classes de comportement rhéologique (définies par des expériences de rhéologie, Ancy, 1999).
- ➔ 3 classes identifiées sur le terrain (Bardou, 2001).

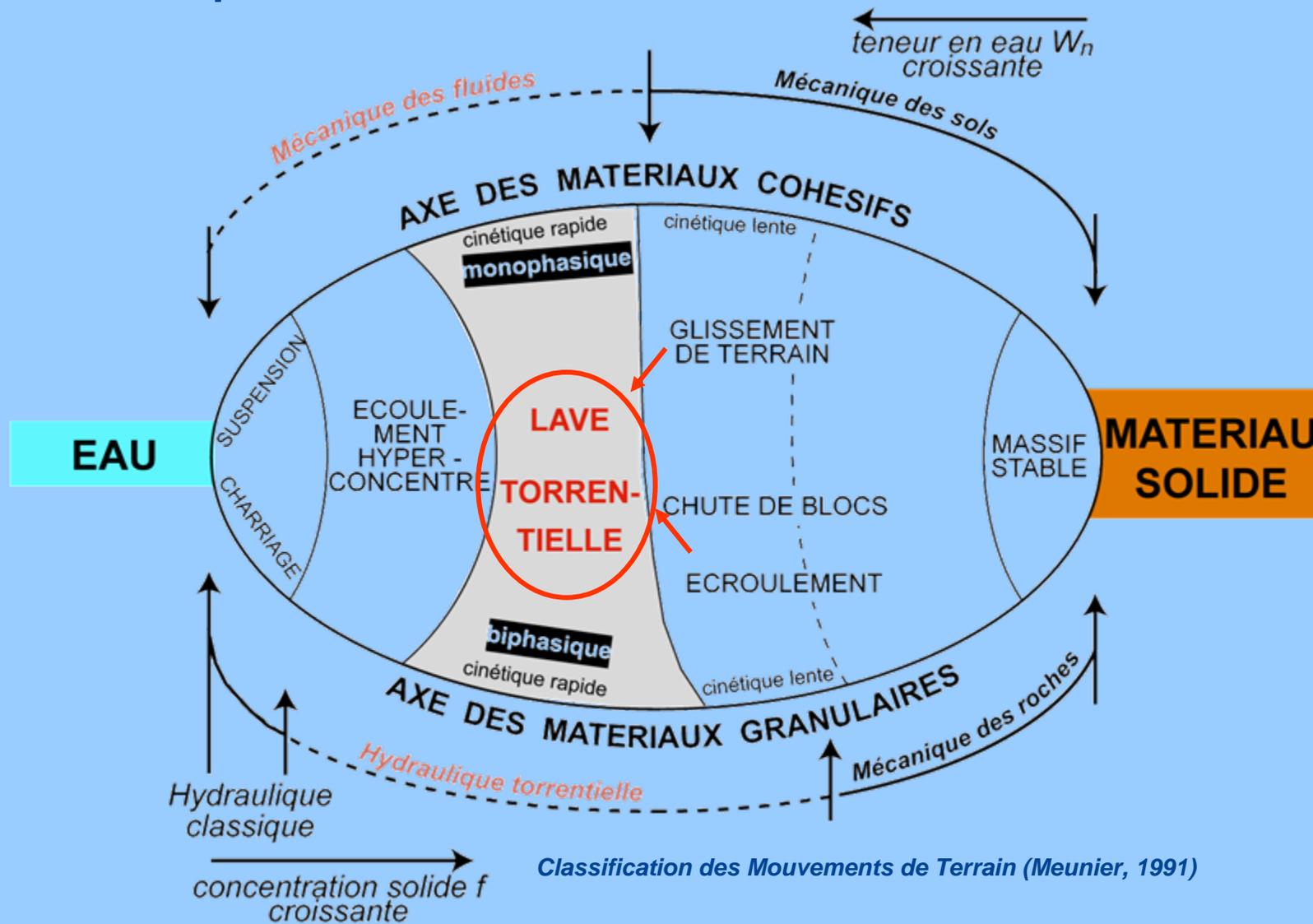
Nom commun	Comportement boueux	Comportement granulaire	"Lahar"
Comportement	<u>Viscoplastique</u> (Bingham, Herschel-Bulkley, bi-linéaire)	<u>Frictionnel-collisionnel</u> (Coulomb)	<u>Frictionnel-visqueux</u> (Coulomb aux faibles vitesses, Newton aux fortes vitesses)
Loi de comportement	2 ou 3 ( $K, n, \tau_c$ )	2 ( $K, \phi$ )	1 à 2 ( $\phi, \mu$ )
Forme des dépôts	Régulier, Limites bien définies, Très cohésif une fois sec	Chaotique, Limites peu franches, Peu cohésif une fois sec	Forme des terrasses alluvionnaires, Cohésives une fois sèches
Forme des bourrelets	Forme arrondie	Forme plane	Pas de bourrelet

## Caractéristiques des laves torrentielles :



Evènement filmé par Franck Lavigne en Indonésie (2003)

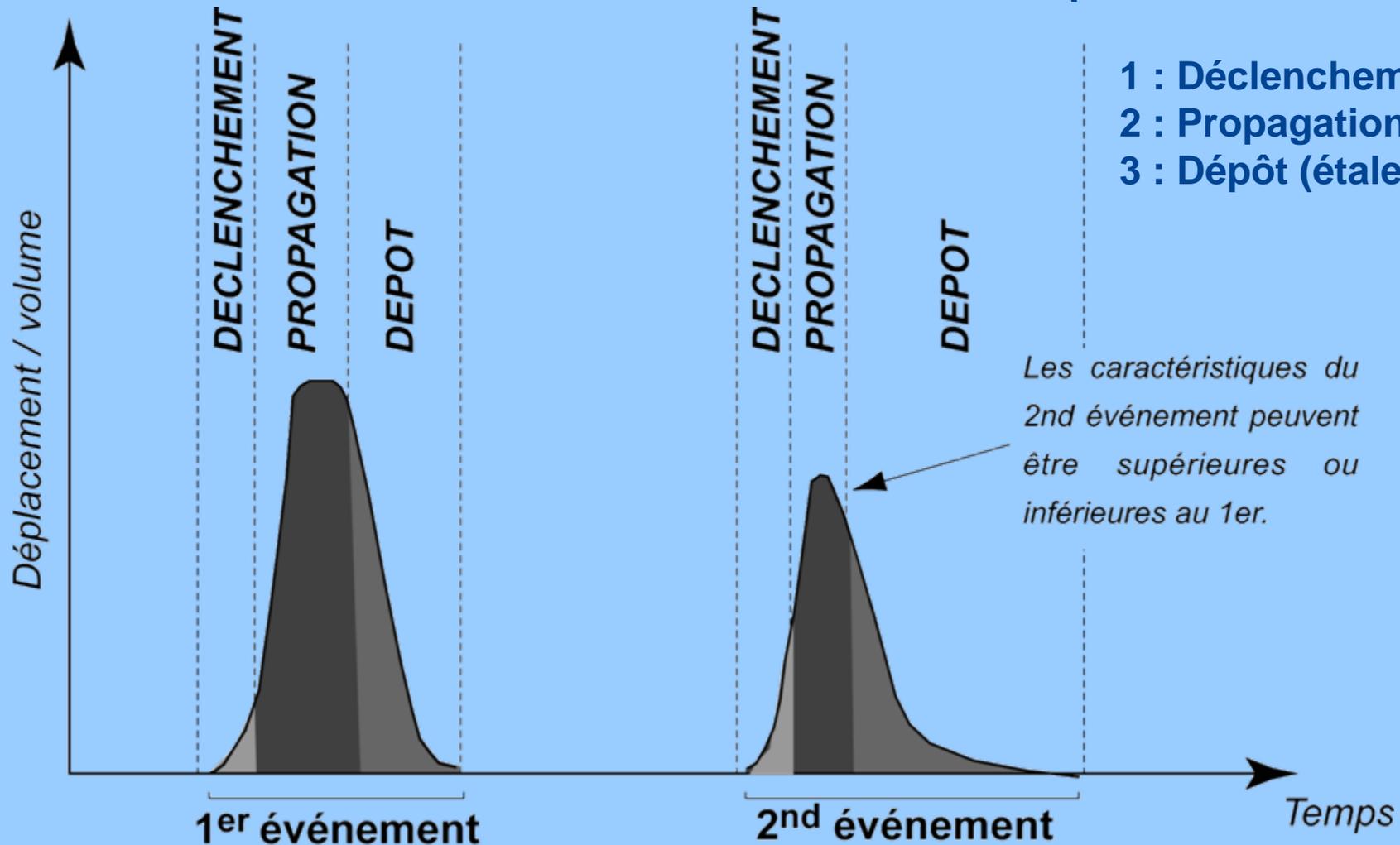
## Caractéristiques des laves torrentielles :



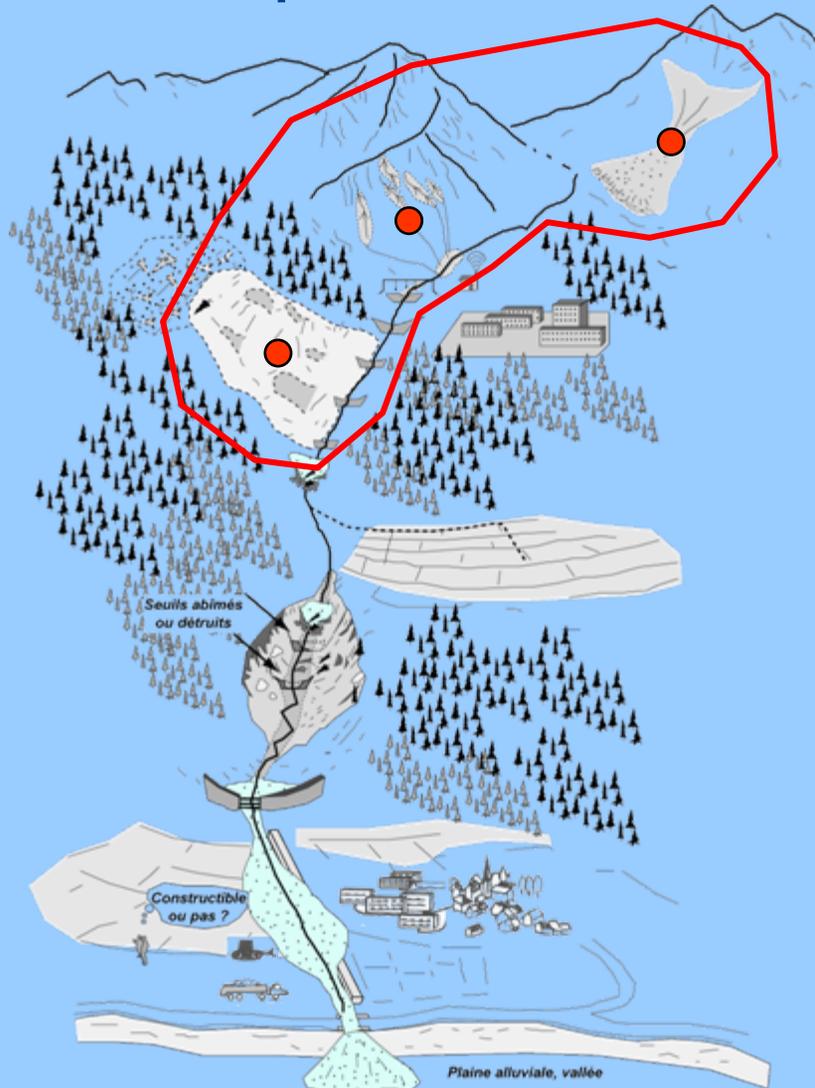
## Dynamique temporelle des laves torrentielles :

Trois phases bien distinctes :

- 1 : Déclenchement
- 2 : Propagation
- 3 : Dépôt (étalement)



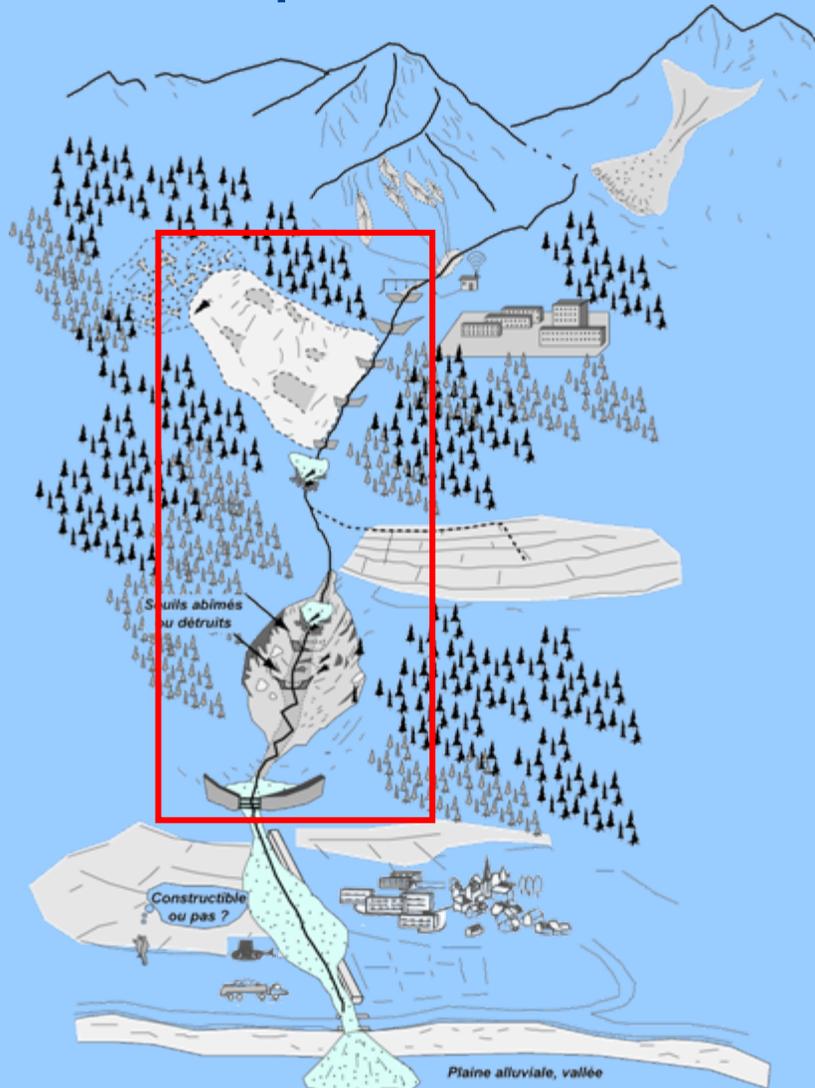
## Cinématique des laves torrentielles :



### Déclenchement (une ou plusieurs sources) :

- par (re)mobilisation d'un glissement de terrain actif (*lave à genèse 'mouvement de terrain'*) ;
- par ruissellement généralisé et ravinement (*lave à genèse 'hydraulique'*) ;
- par combinaison de plusieurs mécanismes ;

## Cinématique des laves torrentielles :



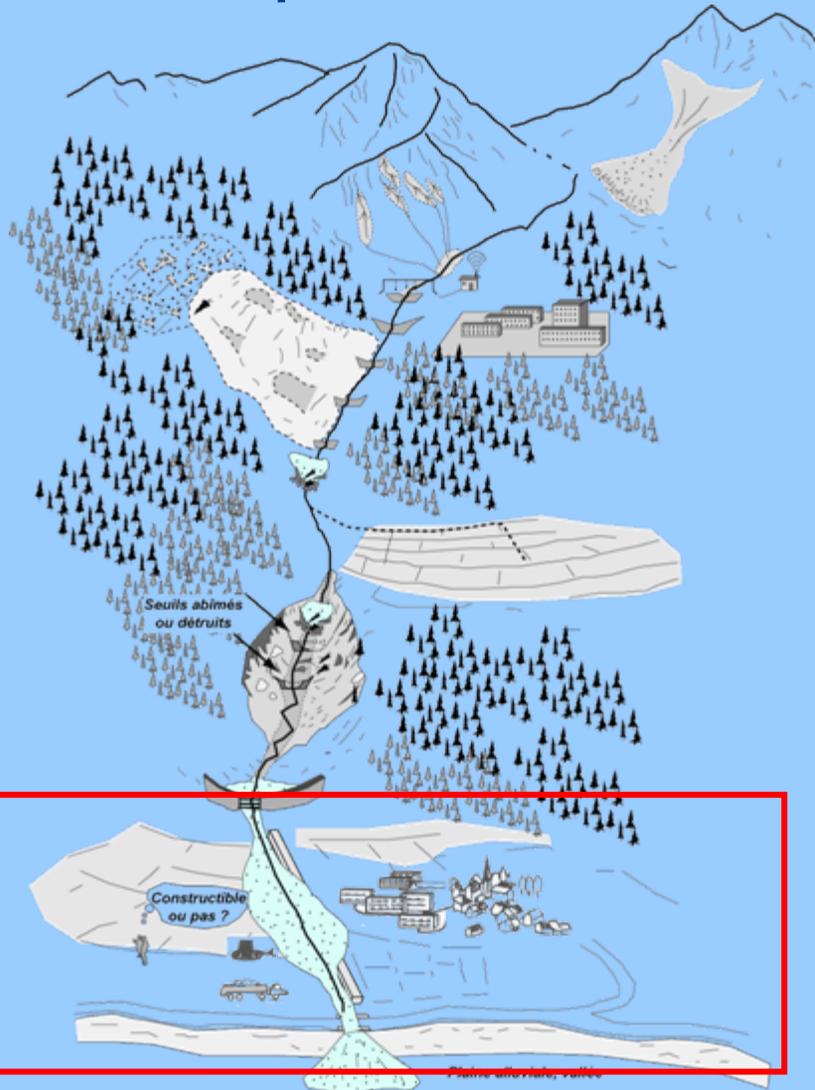
### Déclenchement (une ou plusieurs sources) :

- par (re)mobilisation d'un glissement de terrain actif (*lave à genèse 'mouvement de terrain'*) ;
- par ruissellement généralisé et ravinement (*lave à genèse 'hydraulique'*) ;
- par combinaison de plusieurs mécanismes ;

### Propagation :

- augmentation du volume pendant la propagation (**contribution**) en fonction de plusieurs facteurs (morphologie du chenal, correction torrentielle) ;
- caractéristiques d'écoulement fortement dépendantes du comportement du mélange et de la morphologie du chenal ;

## Cinématique des laves torrentielles :



### Déclenchement (une ou plusieurs sources) :

- par (re)mobilisation d'un glissement de terrain actif (*lave à genèse 'mouvement de terrain'*) ;
- par ruissellement généralisé et ravinement (*lave à genèse 'hydraulique'*) ;
- par combinaison de plusieurs mécanismes ;

### Propagation :

- augmentation du volume pendant la propagation (**contribution**) en fonction de plusieurs facteurs (morphologie du chenal, correction torrentielle) ;
- caractéristiques d'écoulement fortement dépendantes du comportement du mélange et de la morphologie du chenal ;

### Dépôt (étalement) :

- arrêt et étalement des laves dépendent de la morphologie du chenal et du comportement des matériaux ;

## Questionnements scientifiques :

- Comment appréhender la rhéologie et le modélisation des écoulements de laves torrentielles ?
- Quelle stratégie reproductible, à partir de résultats de modélisation, peut-on mettre en œuvre pour évaluer et quantifier l'aléa dans des zones menacées ?

## Les points de blocage :

- difficulté pour **observer** un événement **en temps réel** du fait de leur vitesse et de leur soudaineté ;
- **fonctionnement différent** (causes multiples) entre les torrents et entre les événements ;
- **variations** de volume et de comportement très importantes **au cours d'un même événement** ;
- **échelles spatio-temporelles différentes** pour les processus élémentaires ;
- **base de données** largement **insuffisantes** sur ces phénomènes.

## Ce travail a bénéficié du soutien de :

- 2 programmes de recherches nationaux (INSU, MNRT) :
  - ACI 'Mote' (2000-2004) : MOdélisation, Transformation et Écoulement des coulées boueuses ;
  - PNRN 'Eclat' (2001-2002): Écoulement, initiation et Contribution des LAves Torrentielles.
- 1 programme de recherches européen :
  - 'ALARM' (2001-2004) : Assessment of LAndslides Risks and Mitigation in mountainous areas.

## En collaboration avec :

- le **Cemagref**, Unité de Recherche 'Erosion Torrentielle, Neige et Avalanche', Grenoble ;
- le **Département de Géologie et Génie Géologique**, Université de Laval, Quebec ;
- le **Laboratoire de Mécanique des Sols**, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne ;
- le **Utrecht Faculty of Gesciences**, Université d'Utrecht.

## 1 : Introduction

- les événements de type lave torrentielle ;
- typologie et cinématique ;
- évaluation de l'aléa : questionnement et points de blocage.

## 2 : Présentation des sites d'étude

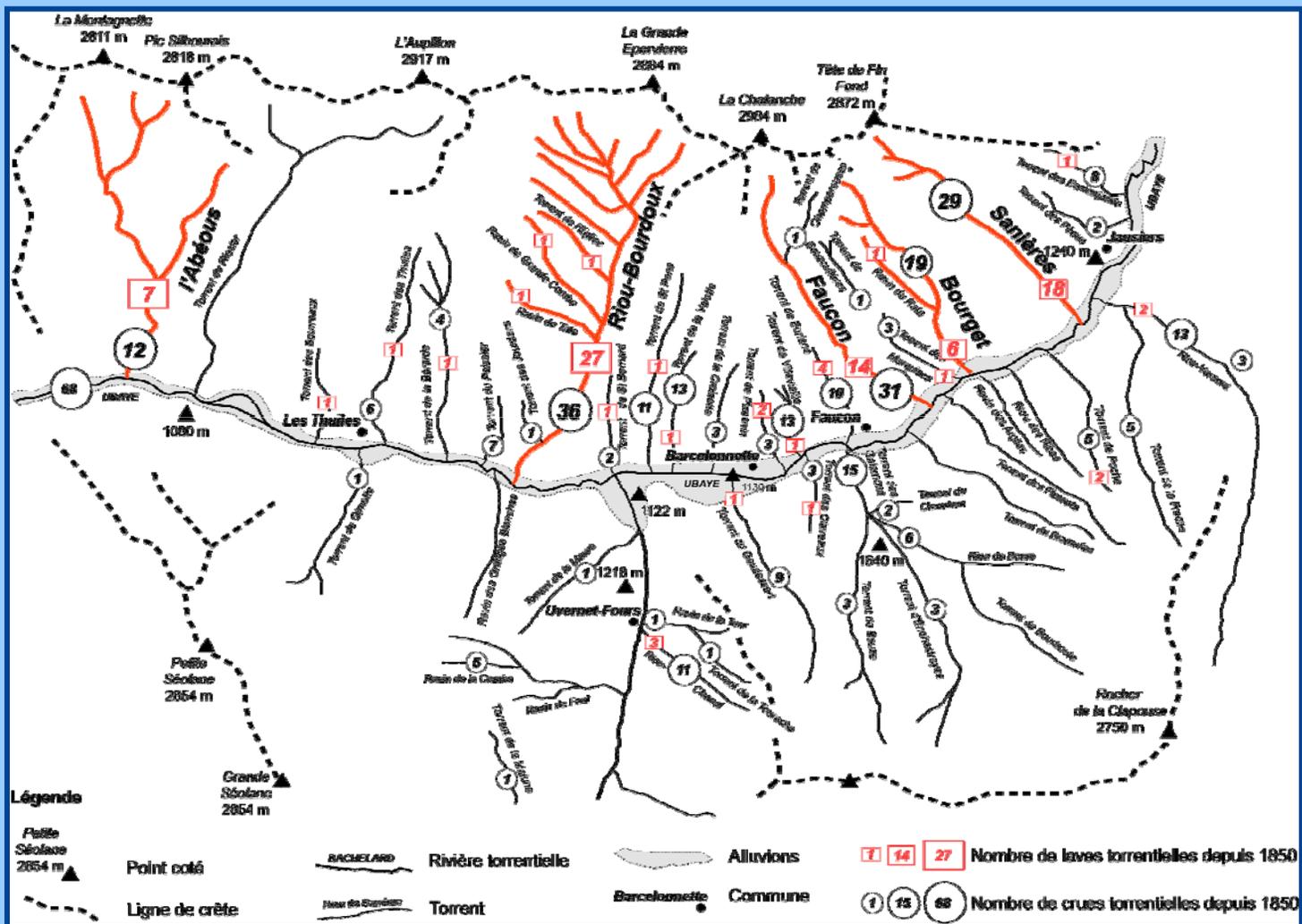
## 3 : Rhéologie des laves torrentielles boueuses

## 4 : Modélisation de la propagation et de l'étalement

## 5 : Quantification de l'aléa

## 6 : Conclusions et perspectives

## Le bassin de Barcelonnnette (activité torrentielle) :



- 461 crues torrentielles et 100 laves dénombrées depuis 1850 ;

- 90% des laves se sont déclenchées dans les torrents situés en adret ;

- 5 torrents à laves : Riou-Bourdoux, Sanières, Faucon, Abeous, Bourget ;



Dispositif de correction torrentielle

- En 2003, plusieurs laves déclenchées (Faucon, Bourget).

## Le bassin de Barcelonnette (susceptibilité des matériaux) :

### Variété des matériaux ...

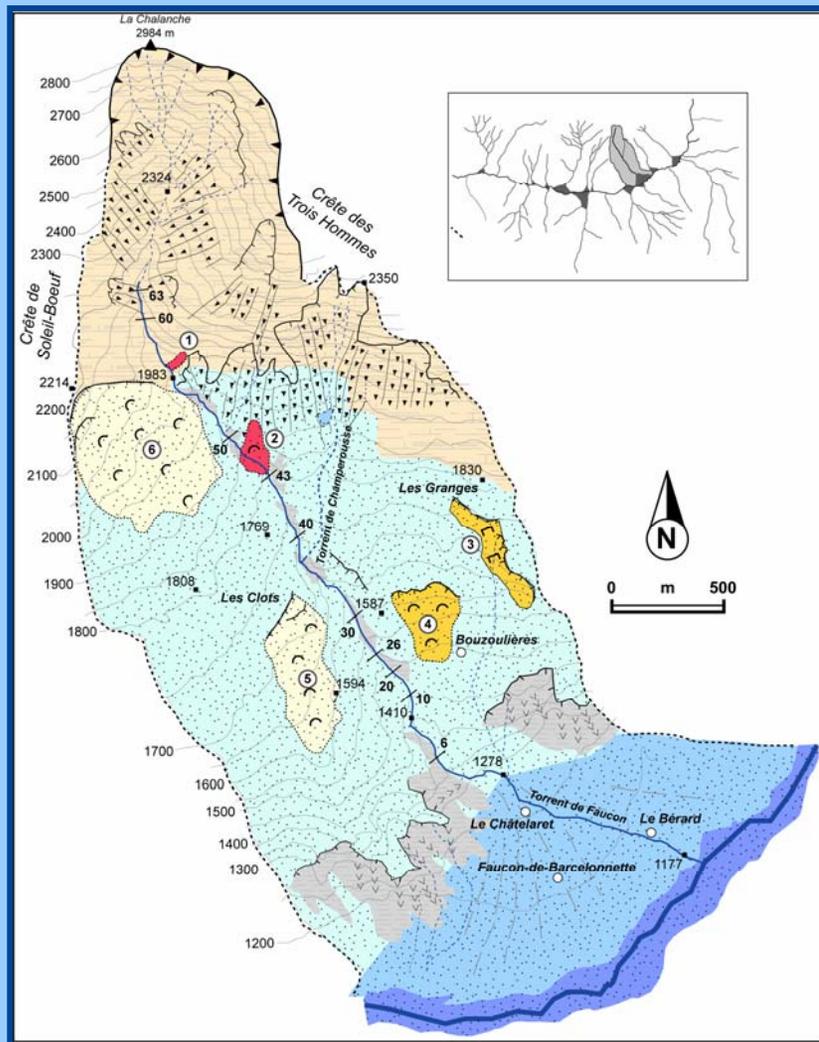
- Marnes noires (autochtone) ;
- Flyschs dissociées (allochtone) ;
- Moraines et formations de pente.

### ... et variété des processus de versant

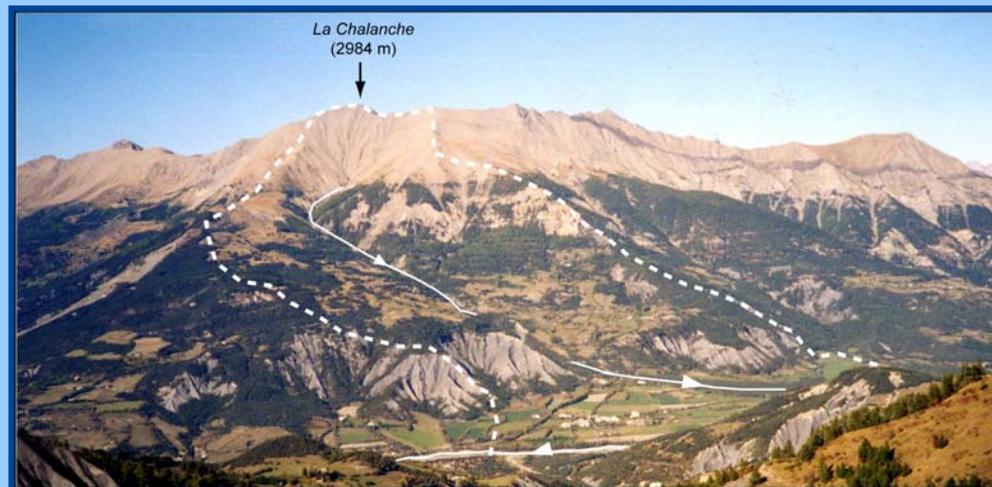
- Ravinement ;
- Glissements de terrain ;
- Écroulements ;
- Couloirs d'avalanche et tabliers d'éboulis actifs ;
- Érosion torrentielle (sapements, incision, ...).



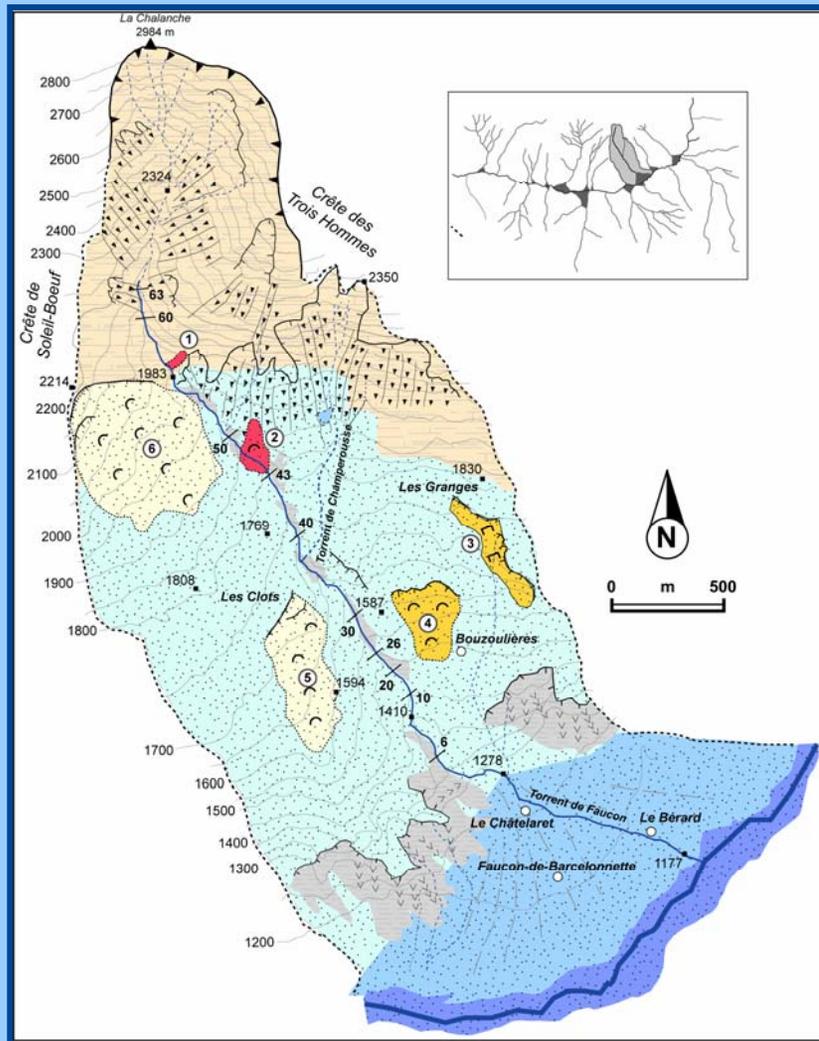
## Le site d'étude principal : le torrent de Faucon



- Un torrent représentatif des processus hydro-gravitaires dans les Terres Noires ;



## Le site d'étude principal : le torrent de Faucon

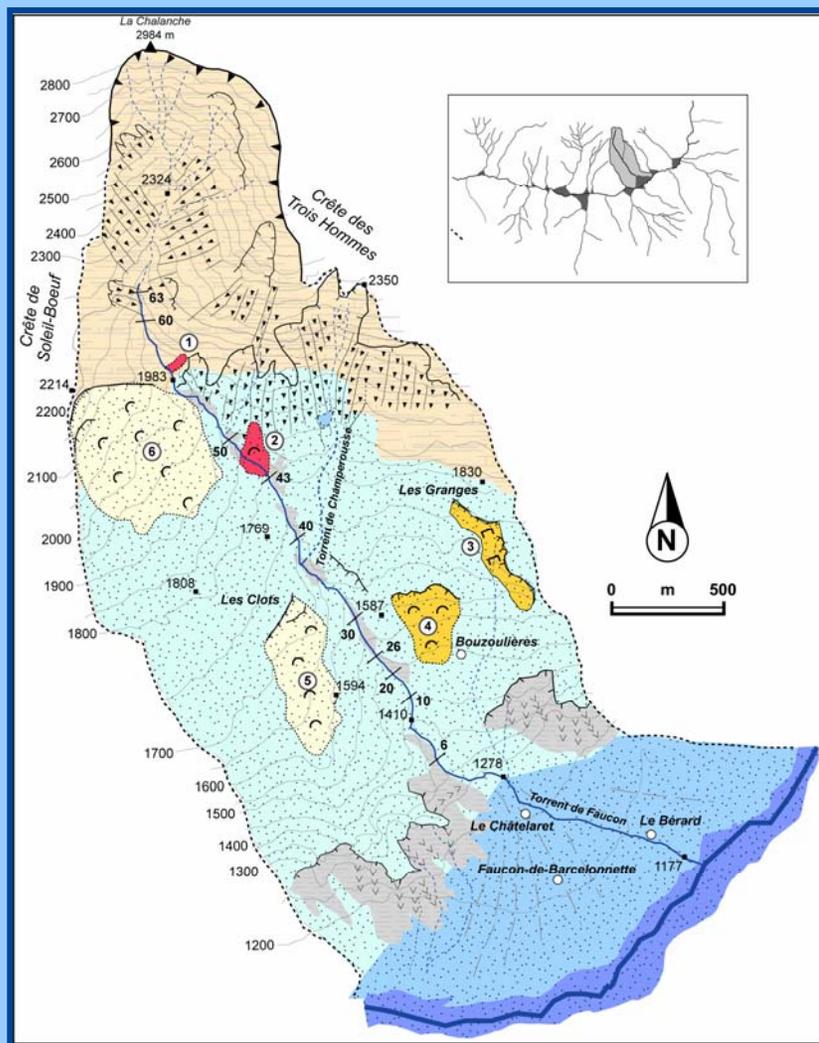


- Un torrent représentatif des processus hydro-gravitaires dans les Terres Noires ;
- Une forte activité depuis 10 ans :
  - 3 événements en 1996, 2002 et 2003.



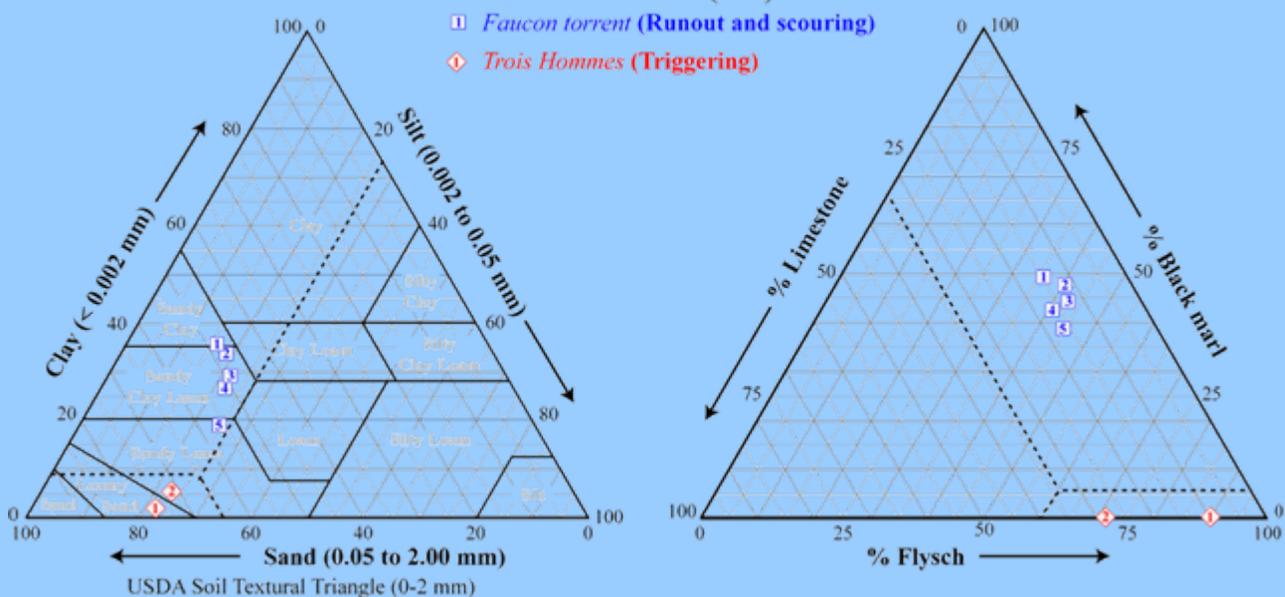
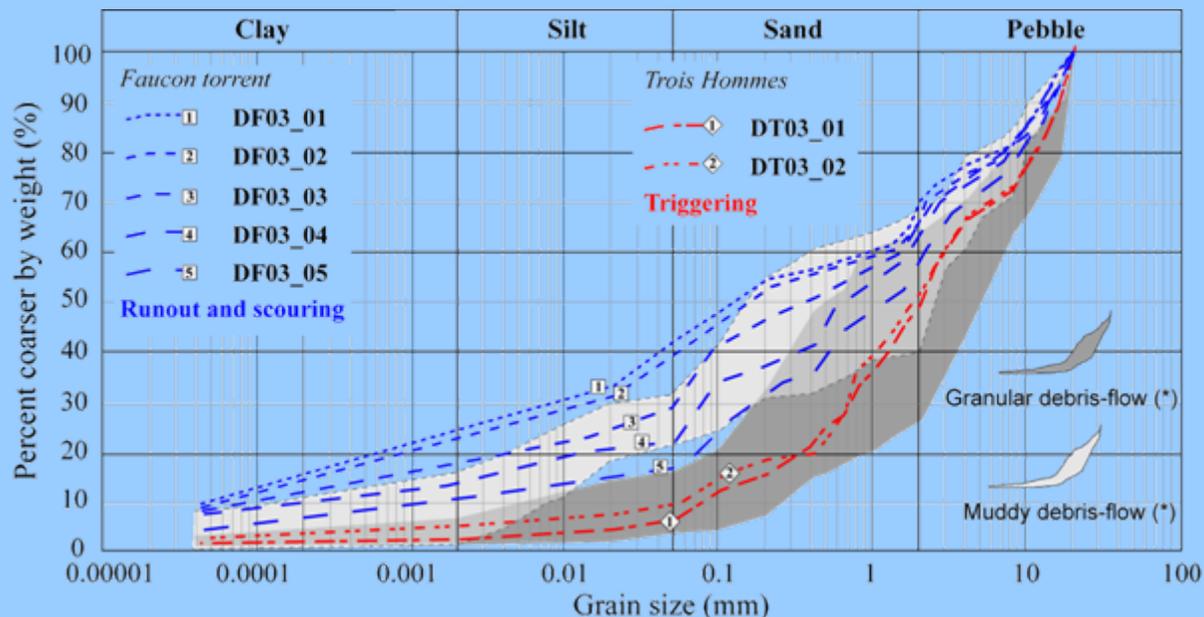
**Débordements de la lave de 2003**

## Le site d'étude principal : le torrent de Faucon



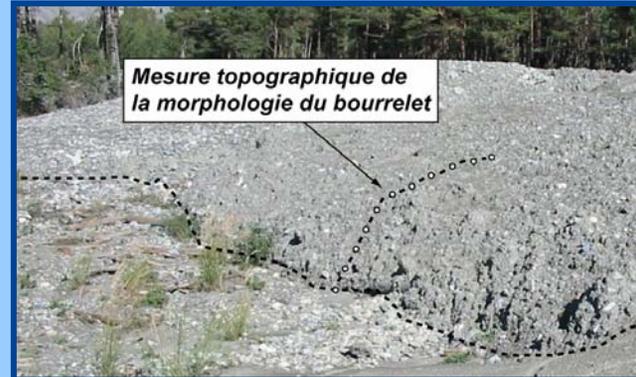
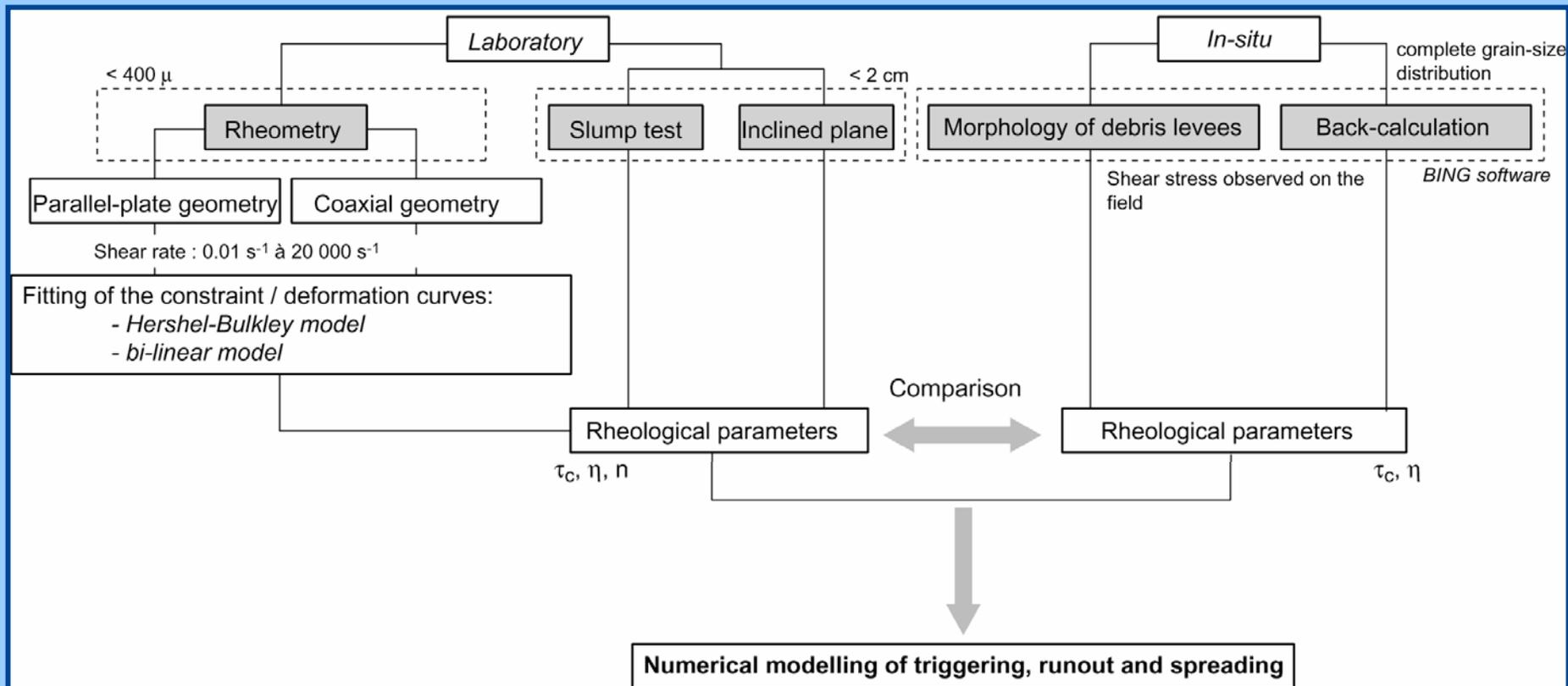
- Un torrent représentatif des processus hydro-gravitaires dans les Terres Noires ;
- Une forte activité depuis 10 ans :
  - 3 événements en 1996, 2002 et 2003.
- ... malgré un important dispositif de correction torrentielle :
  - plus d'une centaine de seuils torrentiels.





- Grain-size analysis show an increase of the fine content during the event ;

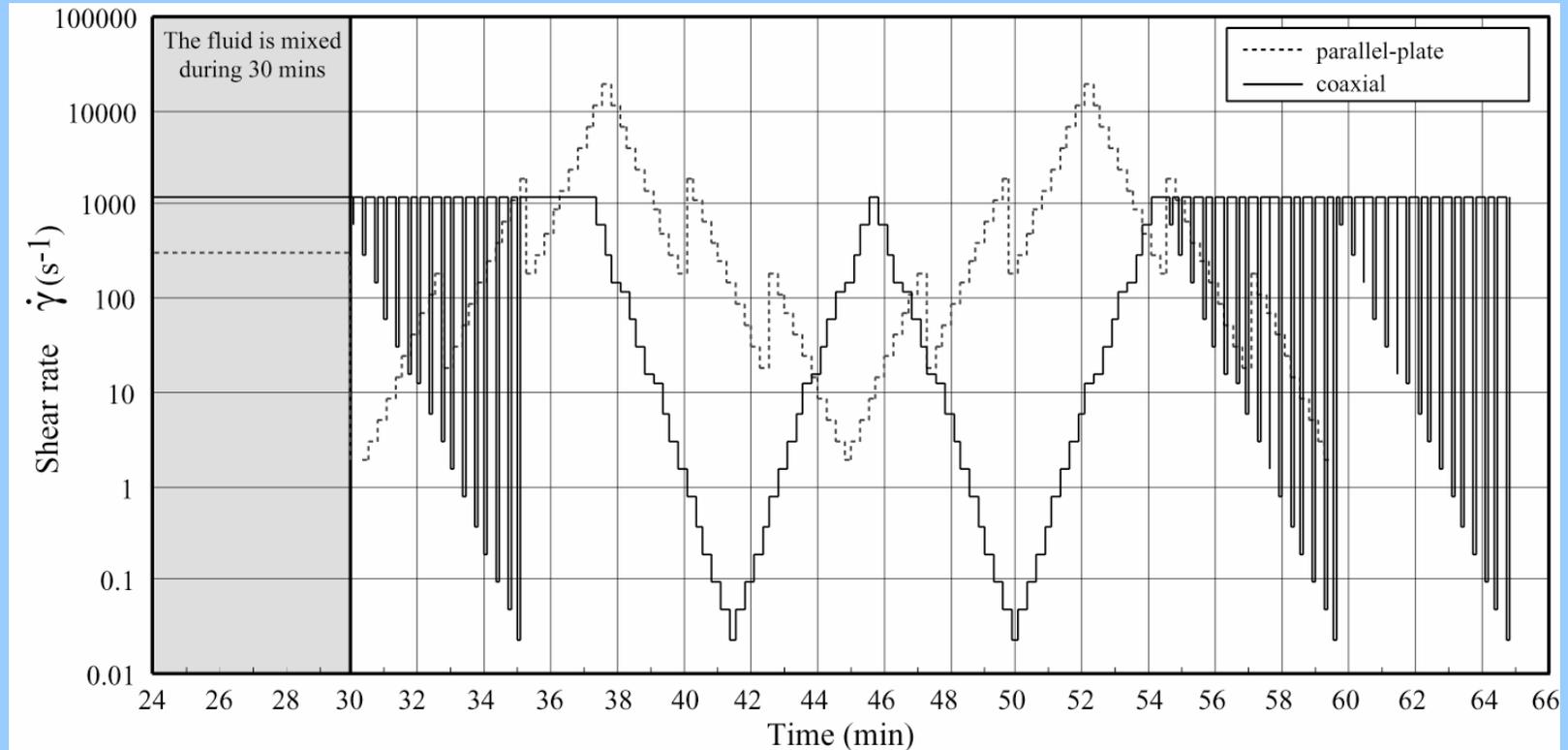
- Evolution of the behaviour (granular to muddy).



## Rheometry: experimental settings

- ➔ **6 total solid fraction were tested  $\phi$  (29 – 50 %)**  
*the fluid has been mixed during 1 min at 600 t.min<sup>-1</sup>, and during 12 min at 400 t.min<sup>-1</sup>*
- ➔ **rheometer Rotovisco Haake RV20 with rough parallel plates**  
*(diameter = 5 cm, sample thickness = 3 cm, roughness = 250 mm)*
- ➔ **rheometer Rotovisco Haake RV12 with coaxial cylinder with a large gap**
- ➔ **ambient temperature à 18° C**
- ➔ **the fluid is sheared during 2 mins with a  $\dot{\gamma}$  of 1000 s<sup>-1</sup> then mixed during 28 min at 100 s<sup>-1</sup> in order to reach the permanent regime**

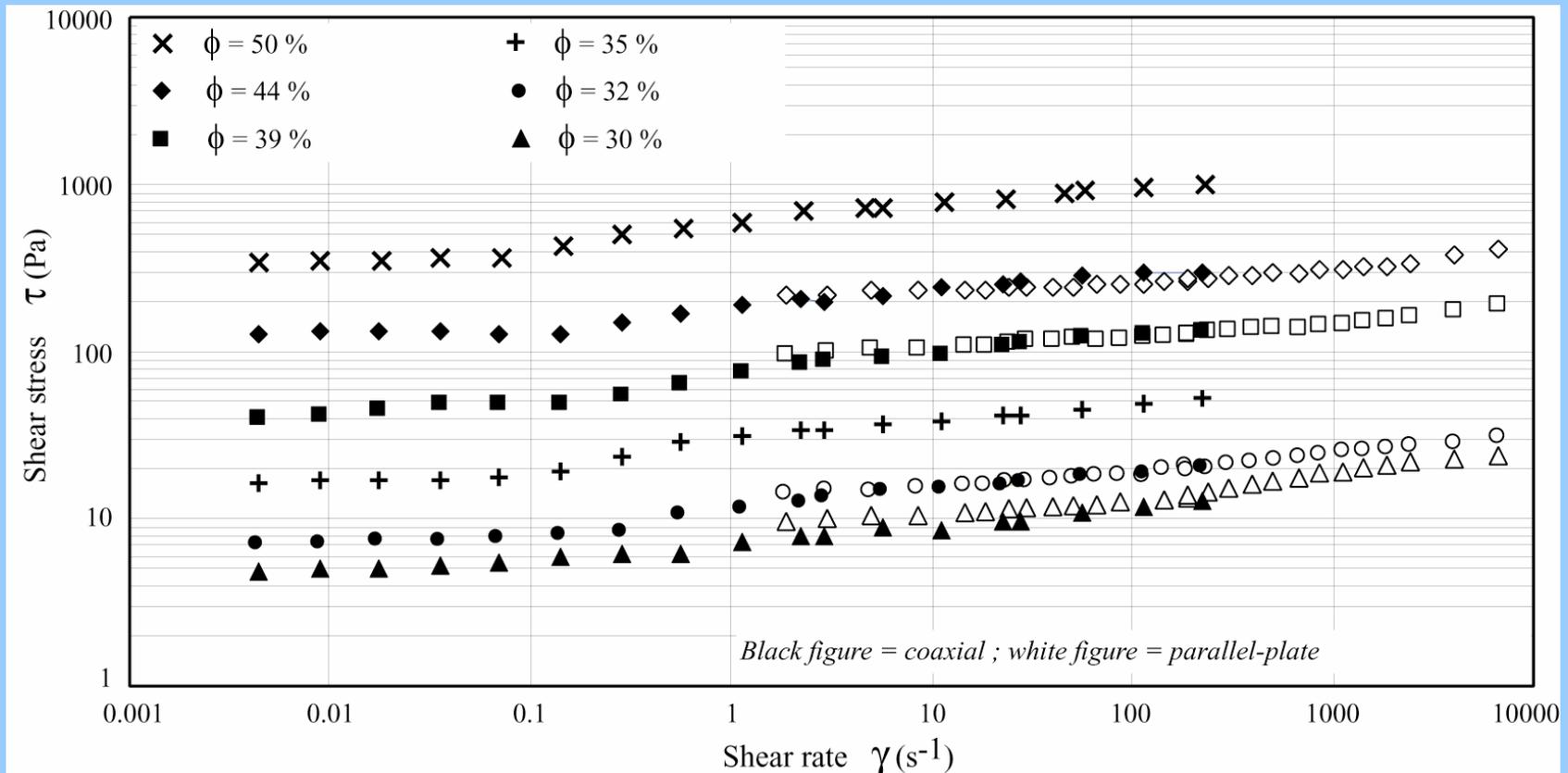
# Rheometry: speed stages and dynamic fluid sollicitation



➔ The two geometries allow us to explore a **wide range of shearing rate**, from 1,87  $\text{s}^{-1}$  to 18700  $\text{s}^{-1}$  for the parallel-plate, between 0,02  $\text{s}^{-1}$  and 1200  $\text{s}^{-1}$  for the coaxial.

➔ Nevertheless, the range of **shear rate used for this study** is 2 to 3 much higher than the observation made for such flow-like landslides.

## Rheometry: influence of the geometry on the flow curves

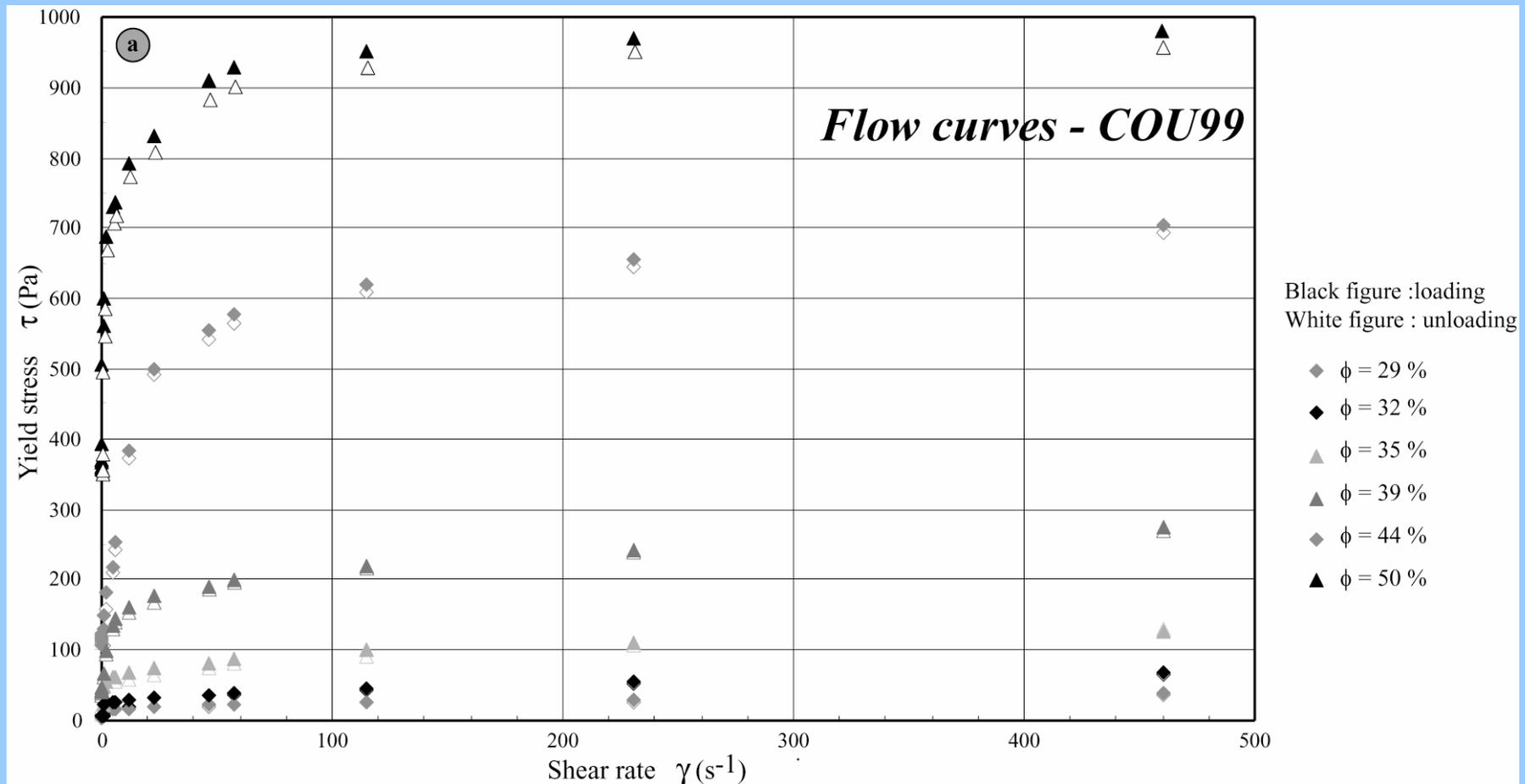


➡ **Shear-thinning behaviour** around the high shear rate (for all the material), for any  $\phi$

➡ In the common range of shear rate for the two rheometer geometry, the shape and the amplitude of the curves are similar.

## Rheometry: thixotropic character of the material ?

Some **specific tests** were undertaken with **the coaxial geometry**. Tests with a **loading phase** and an **unloading phase** (between the two phases the shear rate is stabilized during 135 s). The **thixotropy** is estimated by measuring the **surface of the hysteresis**.



## Slump tests: experimental settings and result

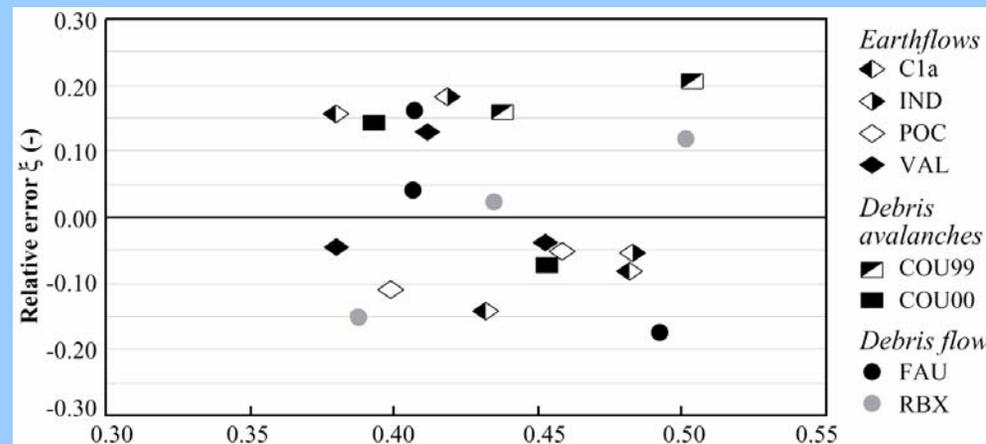
- ➔ The test comprises **filling a cylinder** (diameter, 42 mm; height 82.5 mm) with **the fluid (0-20 mm)**, raising the cylinder and allowing the material to sink under its own weight.
- ➔ Estimation of the **yield stress** was obtained by using the formula devised by **Pashias *et al.* (1996)**.
- ➔ **The relative error** between results of rheometrical datas and slump tests results fluctuates around a mean value **close to 0.15**, whatever the solid fraction.



(1) Slump test au cylindre :

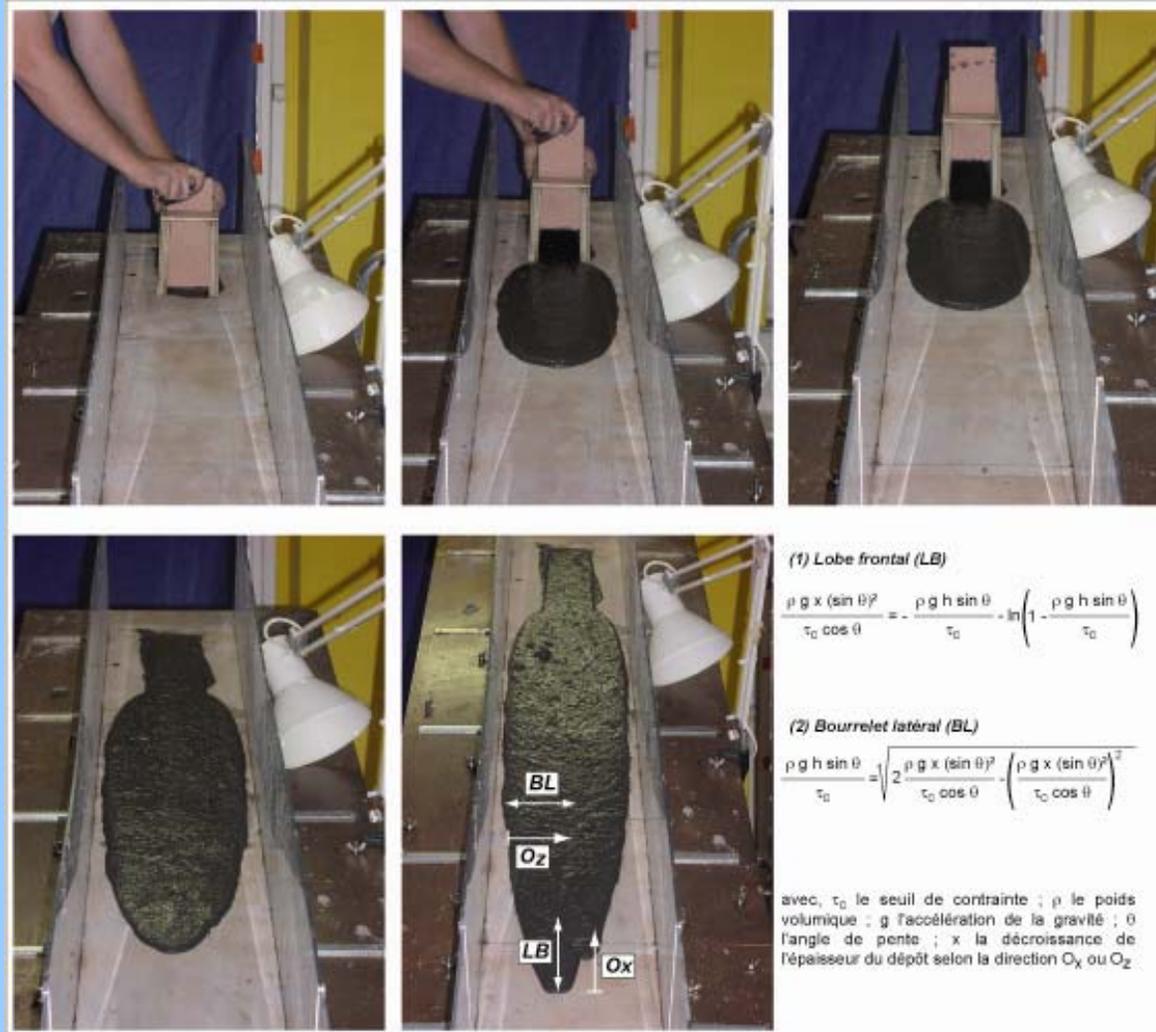
$$\frac{H_s}{H} = 1 - \frac{2 \tau_c}{\rho g H} \left( 1 - \ln \left( \frac{2 \tau_c}{\rho g H} \right) \right)$$

avec,  $\tau_c$  le seuil de contrainte ;  $\rho$  le poids volumique ;  $g$  l'accélération de la gravité ;  $H$  la hauteur initiale de l'échantillon ;  $H_s$  l'affaissement



- ➔ Making allowance for uncertainties in **rheometrical** and **slump test** measurements **the agreement** between rheometrical data and slump tests results **is very good**.

## Flume tests: experimental settings



(1) Lobe frontal (LB)

$$\frac{\rho g x (\sin \theta)^2}{\tau_0 \cos \theta} = \frac{\rho g h \sin \theta}{\tau_0} \cdot \ln \left( 1 - \frac{\rho g h \sin \theta}{\tau_0} \right)$$

(2) Bourrelet latéral (BL)

$$\frac{\rho g h \sin \theta}{\tau_0} = \sqrt{2 \frac{\rho g x (\sin \theta)^2}{\tau_0 \cos \theta} \cdot \left( \frac{\rho g x (\sin \theta)^2}{\tau_0 \cos \theta} \right)^2}$$

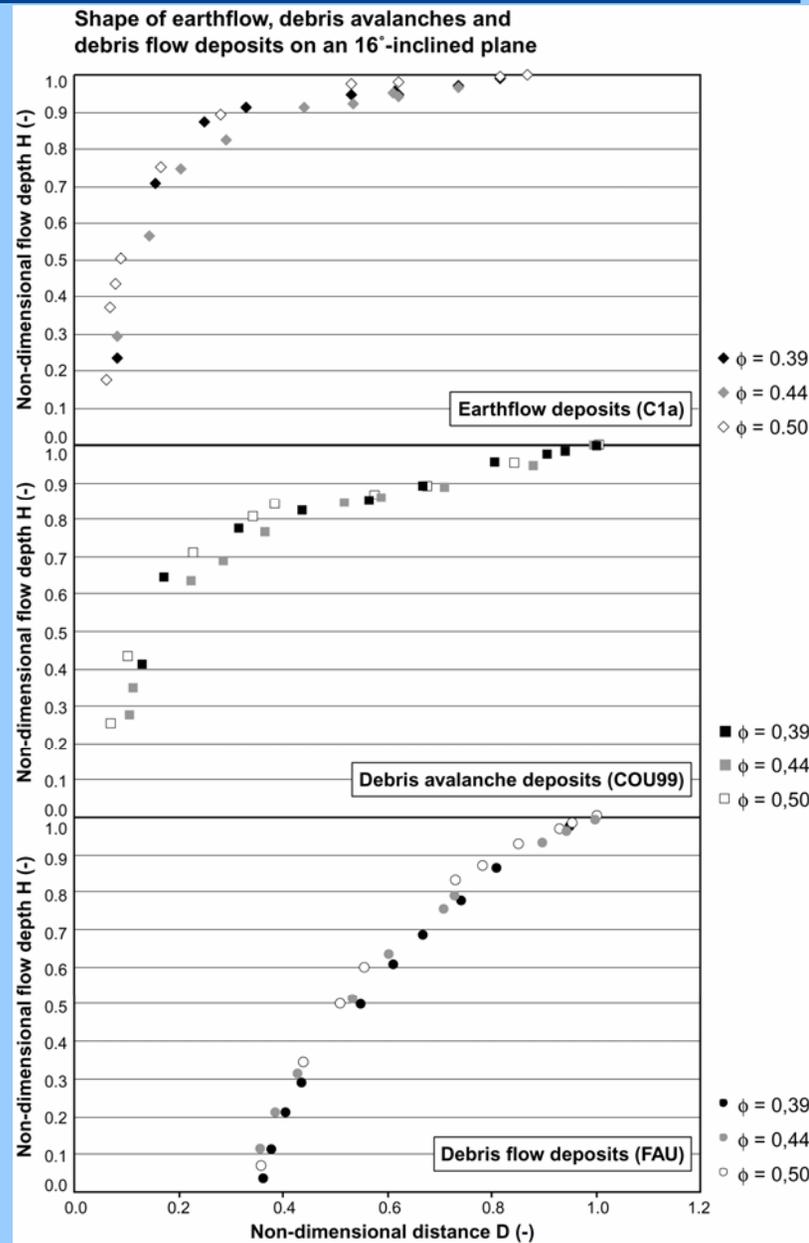
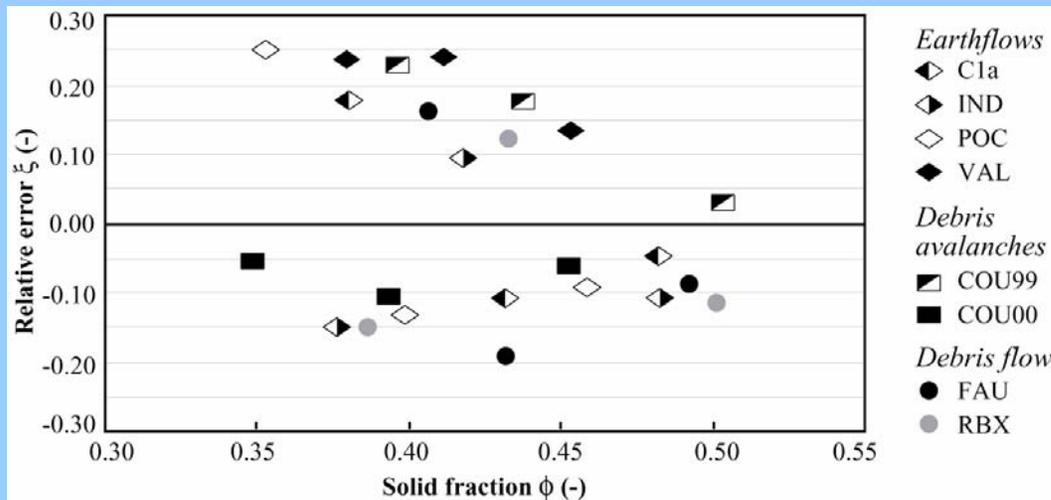
avec,  $\tau_0$  le seuil de contrainte ;  $\rho$  le poids volumique ;  $g$  l'accélération de la gravité ;  $\theta$  l'angle de pente ;  $x$  la décroissance de l'épaisseur du dépôt selon la direction  $O_x$  ou  $O_z$

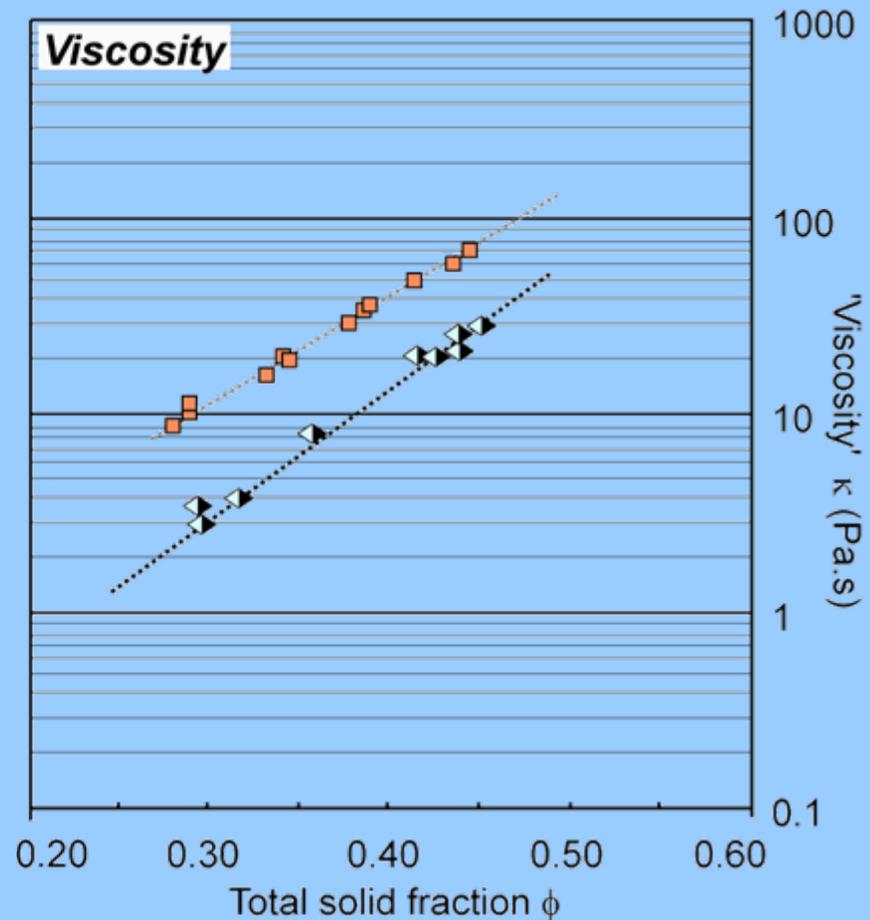
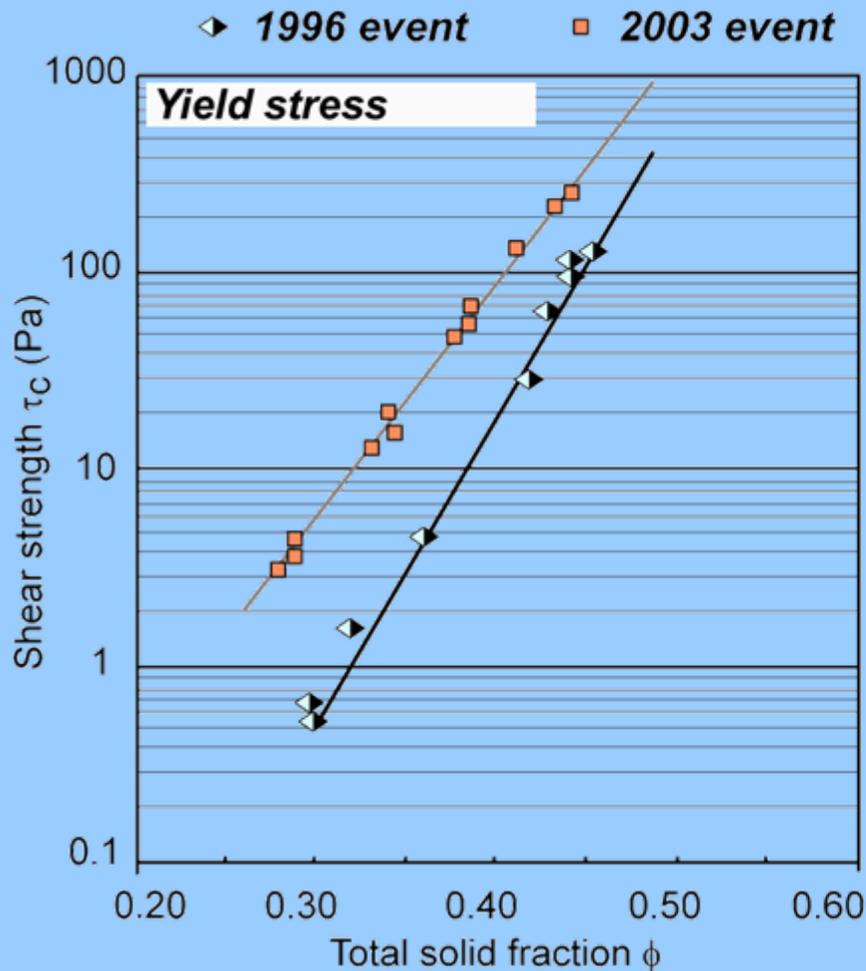
➔ Tested volume: **0.002 m<sup>3</sup>** of material (0-20 mm)

➔ Total solid fractions ranging between **0.35 and 0.50** were tested for each material

## Flume tests: results

- ➔ **Yield stress** was determined using the formula given by **Coussot et al. (1996)**, taking into account the **asymptotic flow depth** and the **shape of the lateral levee**.
- ➔ **Inclined plane tests were quite reproducible:** difference as low as **5%** were recorded from one test to another.
- ➔ As for the slump tests, the « **relative error** » fluctuates around a mean value close to **0.15**.

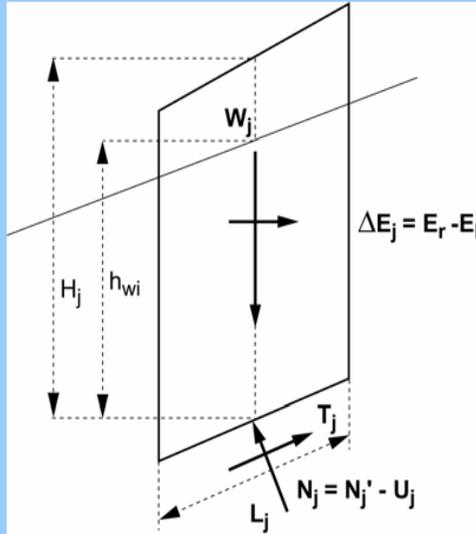




- The 2003 debris-flow exhibits a non thixotropic visco-plastic behaviour well fitted by a Herschel-Bulkley or a Bingham model ;

## Modèle de propagation JDFM-1D (van Asch et al., 2005)

### Numerical scheme :



### • Force and moment equilibrium:

- calculated with Janbu's simplified equilibrium model to take into account non symmetrical interslices forces;

$$F_{(t)} = \left( \frac{\sum S}{\sum T} \right) = \frac{\sum \left[ c' L + \left( W_t - \left( U_{\text{normal}}^{(t)} + U_{\text{excess}}^{(t-1)} \right) \tan \phi' \right) / n_{\alpha} \right]}{\sum W_t \tan \alpha}$$

$$n_{\alpha} = \cos^2 \alpha \left( 1 + \tan \alpha \frac{\tan \phi'}{F_{(t-1)}} \right)$$

- because Janbu's equation contains F on both sides, the forces vertical and parallel to the slip surface are solved iteratively at each time step (static calculation);

### • Motion:

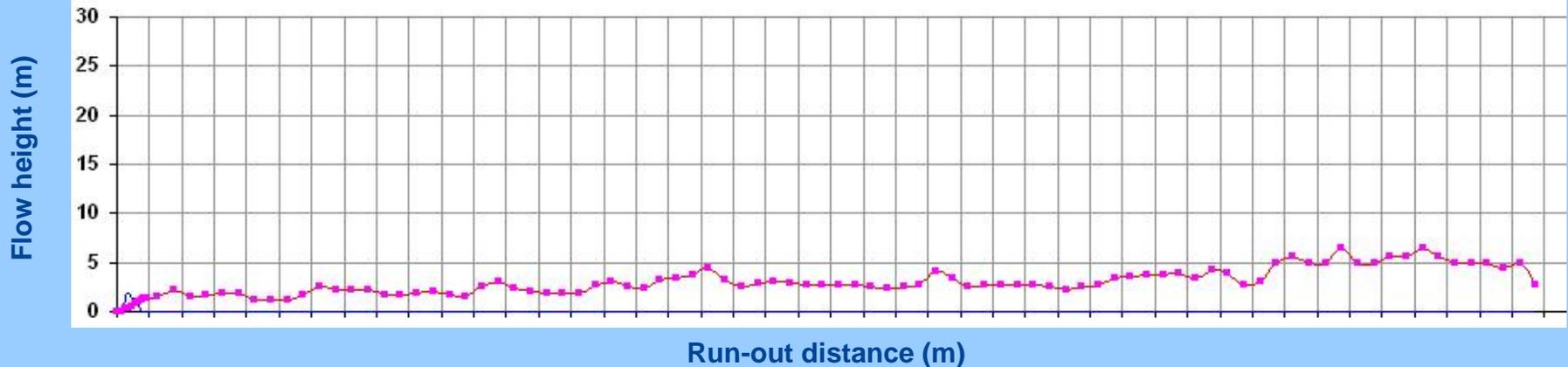
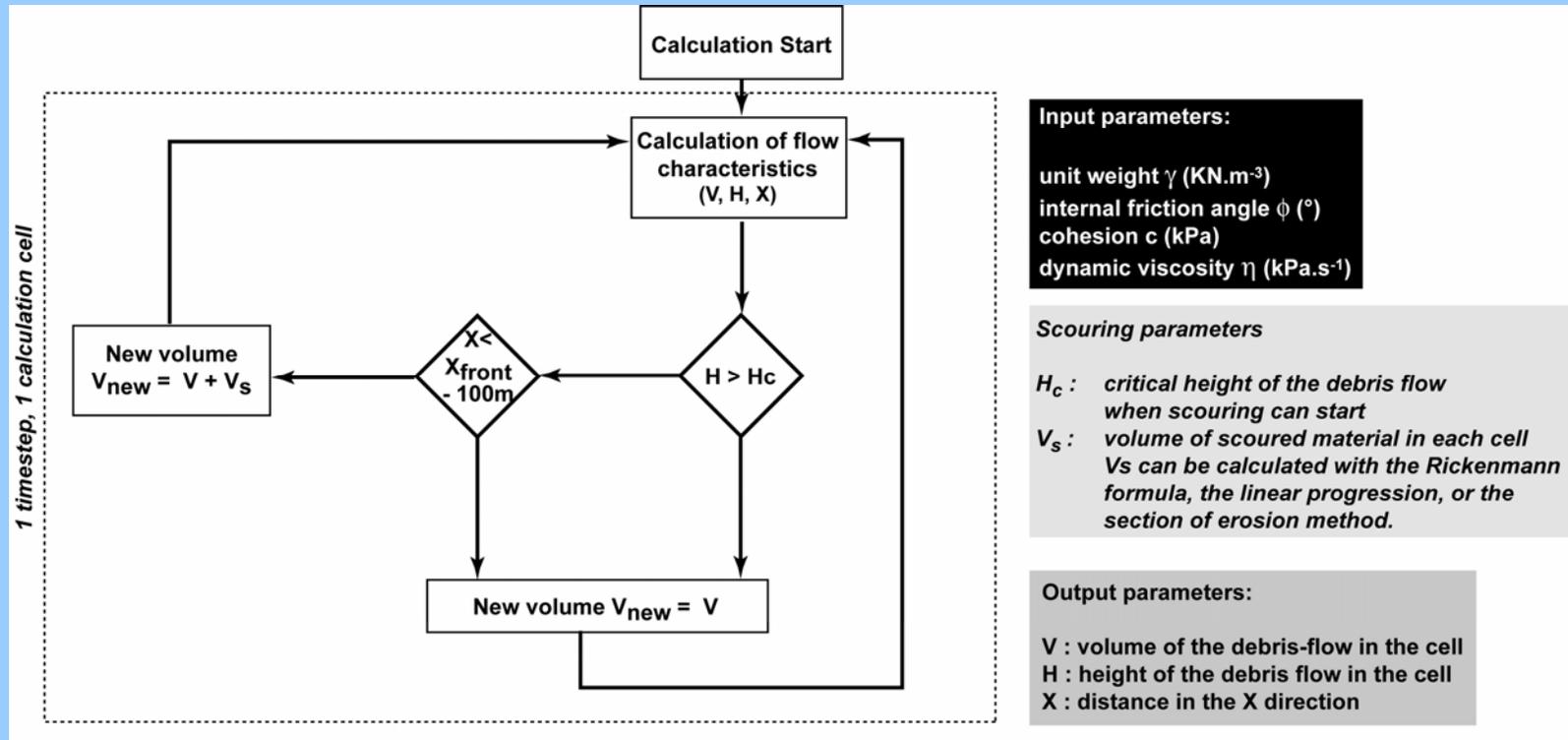
- given the length of each slice, a volume of displaced material is calculated assuming a velocity profile which increases with flow depth and a viscous shear band;
- changes in forces are calculated in the direction of the principal stresses at the slip surface;

### • Pore pressure variation during run-out:

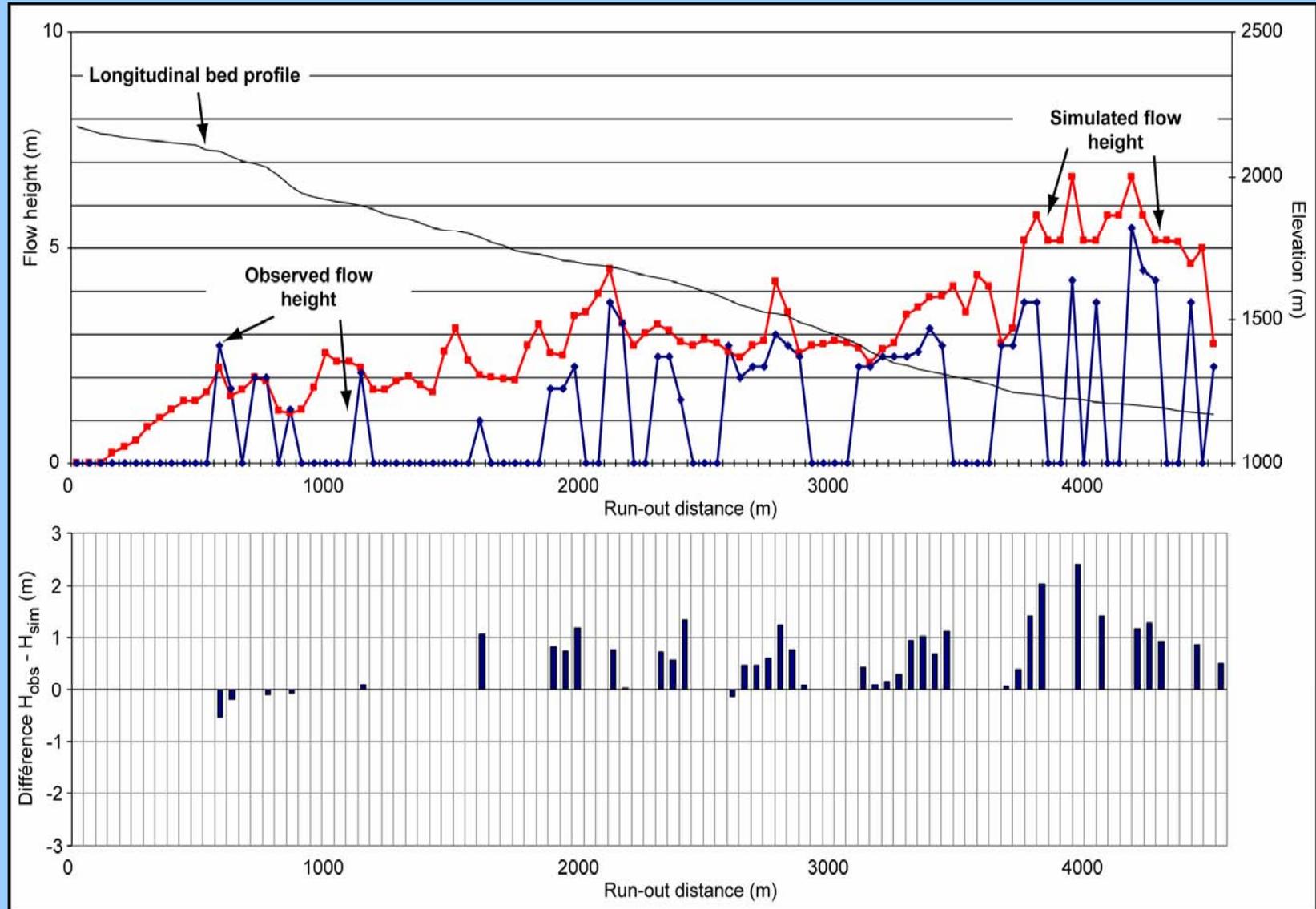
- for each time step, dissipation of **excess pore pressure** is estimated by Terzaghi's theory of consolidation by assuming a fractional dissipation coefficient.

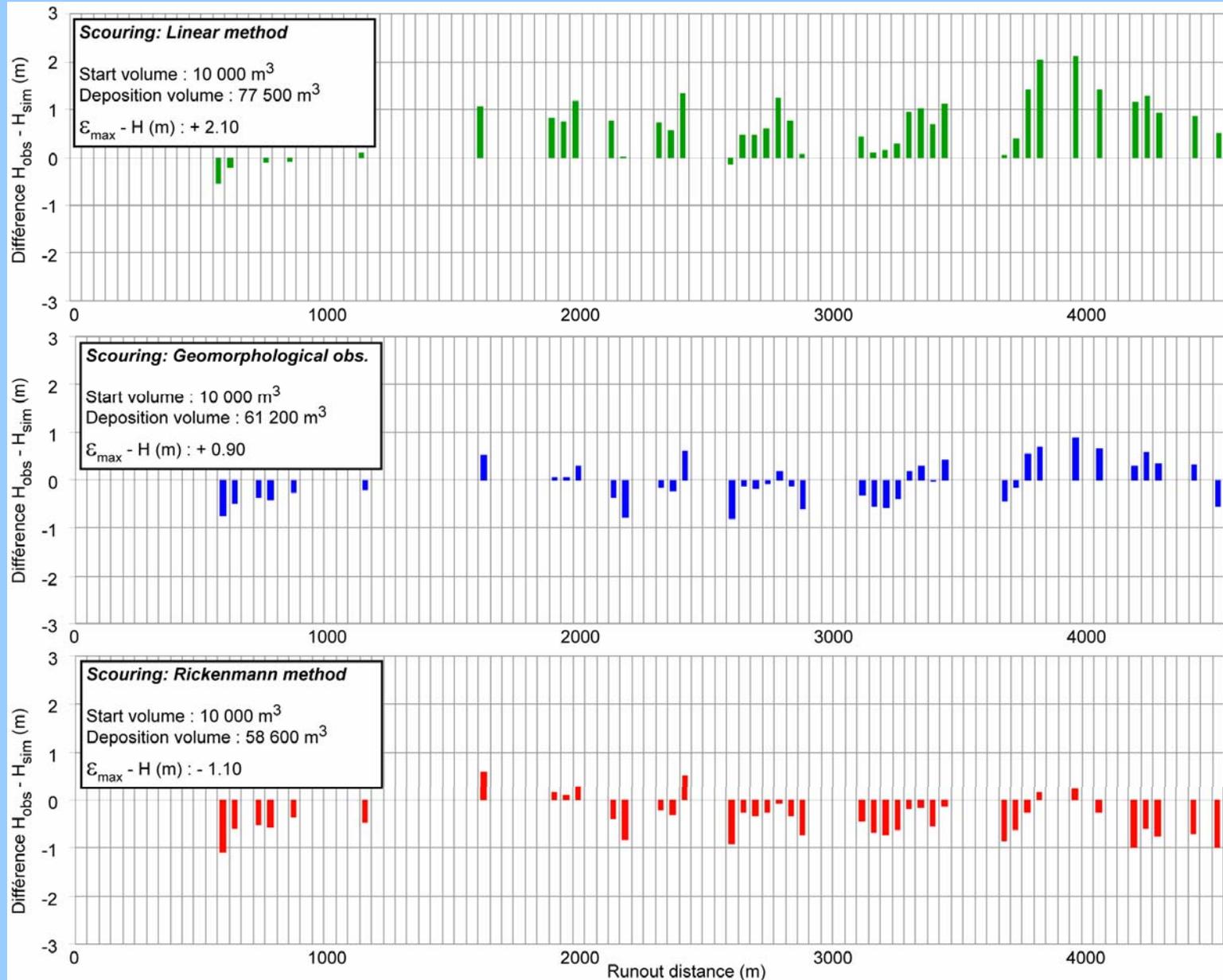
$$p_u^{\text{excess}} = p_u \frac{\gamma_w}{\gamma_s}$$

$$p_u^{\text{excess}}(t=i) = p_u^{\text{excess}}(t=0) - F_r p_u^{\text{excess}}(t=0)$$



## Calage du modèle de propagation sur la lave de 2003





## Le modèle d'étalement : Cemagref 2D (Laigle et al., 2003)

- Modèle 2-D de type déterministe, avec comme hypothèse un corps de lave supposé monophasique et homogène
- Modèle basé sur l'adaptation des équations de Barré de St-Venant ;

### Barré de St-Venant adapté

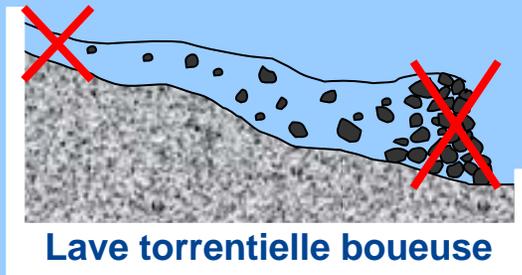
$$\rightarrow \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0$$

$$\rightarrow \begin{cases} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial \left[ h\delta\bar{u}^2 + \frac{gh^2 \cos \theta_{xy}}{2} \right]}{\partial x} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = gh \sin(\theta_x) - \frac{\bar{u}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho} \\ \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial \left[ h\delta\bar{v}^2 + \frac{gh^2 \cos \theta_{xy}}{2} \right]}{\partial y} = gh \sin(\theta_y) - \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho} \end{cases}$$

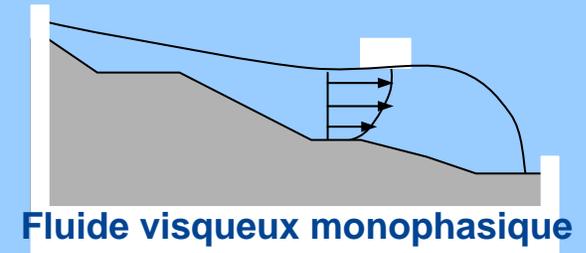
$$\rightarrow \tau_p = \tau_c \left[ 1 + 1,93 \left[ \frac{\tau_c}{K} \left( \frac{h}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \right)^{1/3} \right]^{-0,9} \right]$$

## Le modèle d'étalement : Cemagref 2D

### Hypothèse / Domaine de validité :



modélisée par  
simplification



### ... sont négligés :

- le front et la queue de la lave ;
- la rugosité du lit ;
- les phénomènes de dépôts ou de reprise.

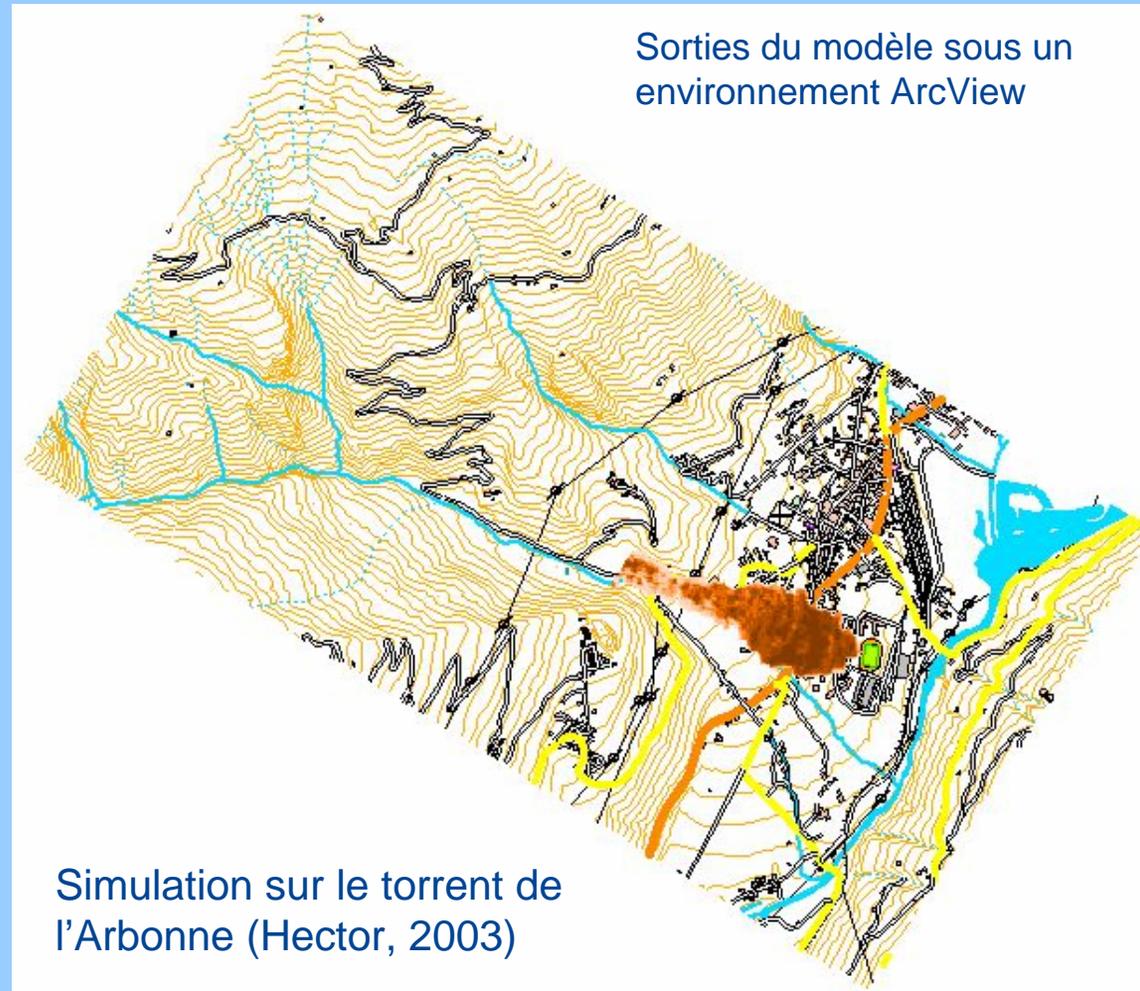
### Caractéristiques :

- fluide continu, homogène, incompressible et aux propriétés constantes dans le temps ;
- régime d'écoulement laminaire ;
- distribution hydrostatique de  $P$ .

## Le modèle d'étalement : Cemagref 2D

### Données d'entrée du modèle :

- Topographie du site : MNT
- Caractéristiques hydrauliques de l'événement (hydrogramme)
- Caractéristiques physiques du matériau constitutif de la lave : densité et paramètres rhéologiques ( $\rightarrow \tau_c / \rho$  et  $K / \tau_c$ )



T = 100 secs



Modèle d'étalement Cemagref 2D

T = 200 secs



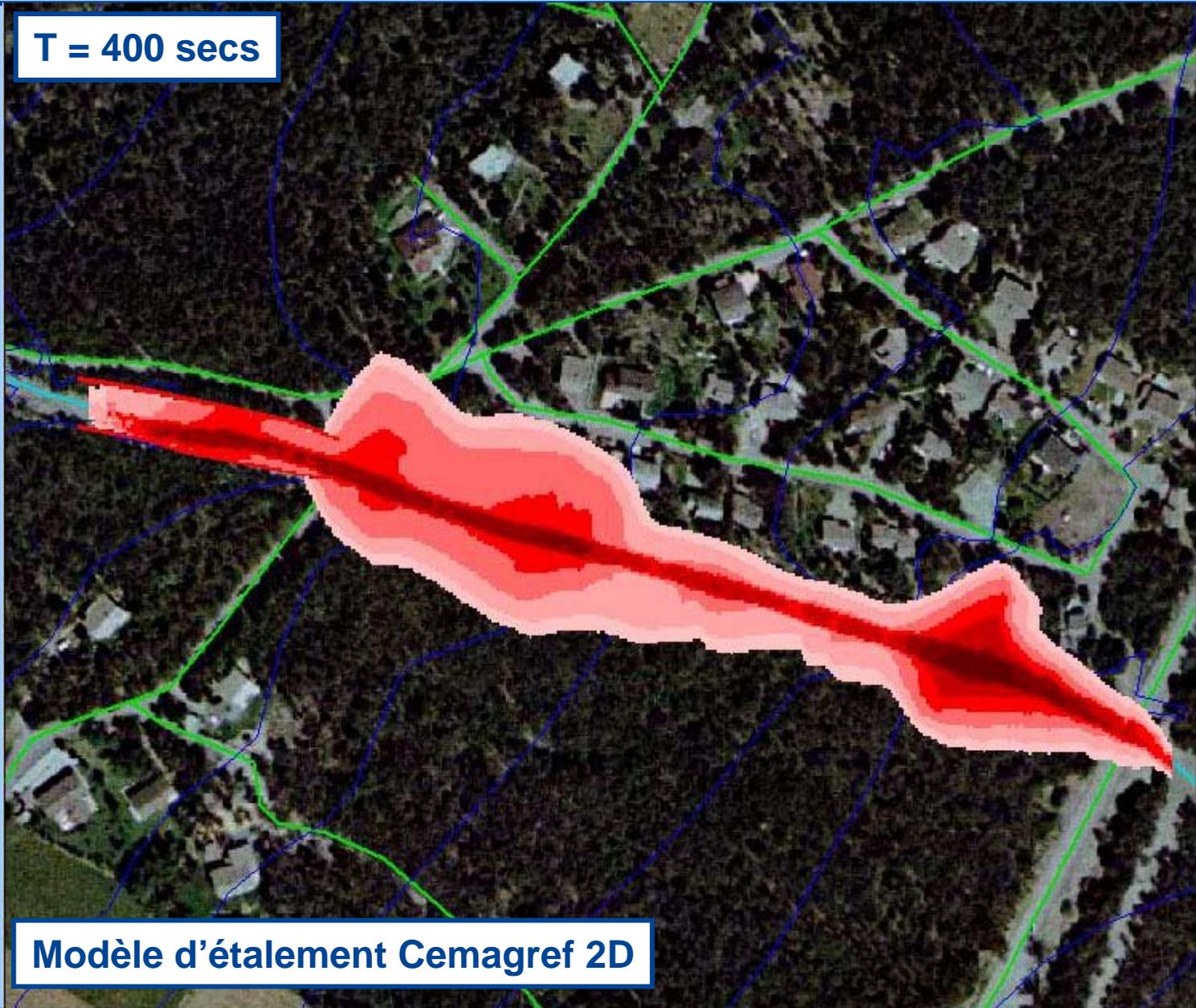
Modèle d'étalement Cemagref 2D

T = 300 secs



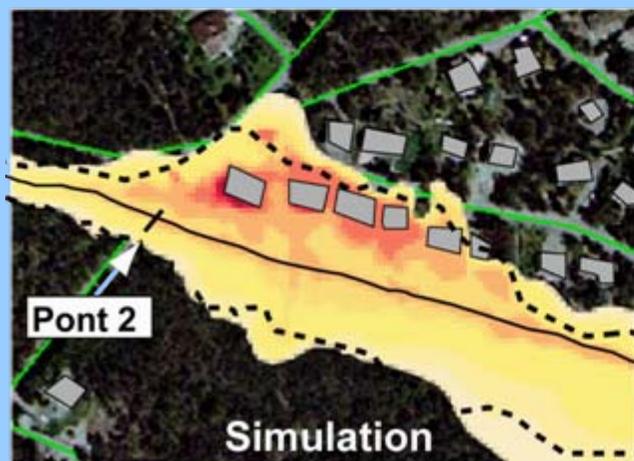
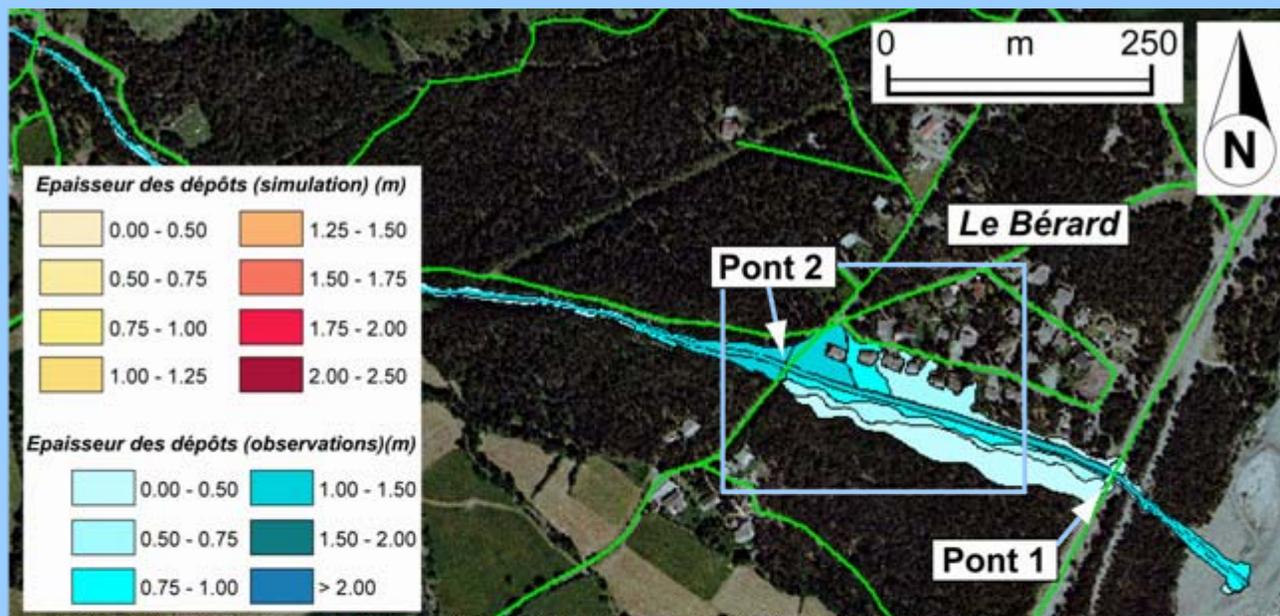
Modèle d'étalement Cemagref 2D

T = 400 secs

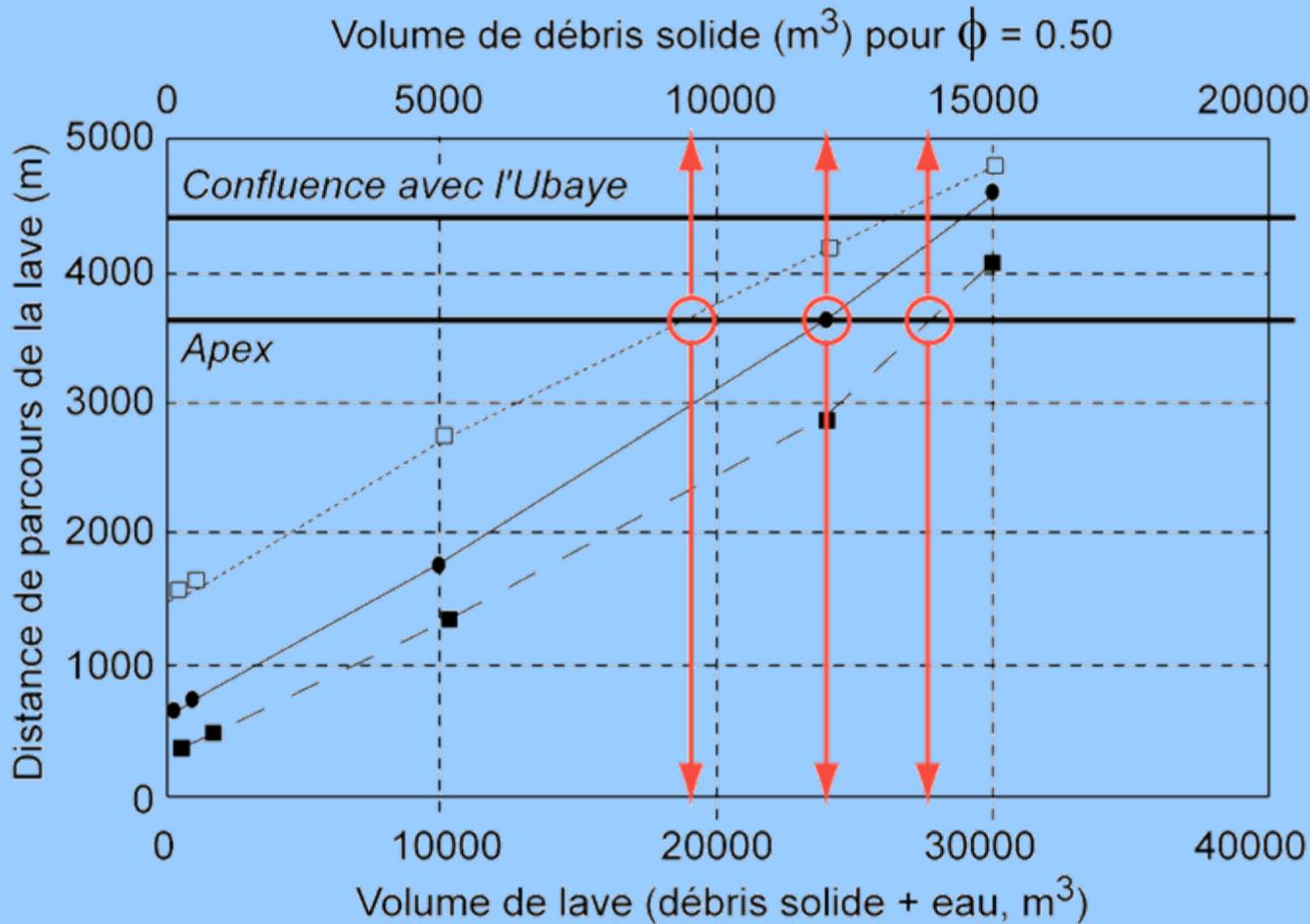


Modèle d'étalement Cemagref 2D

## Calage du modèle d'étalement sur la lave de 2003 (MNT 1 m)



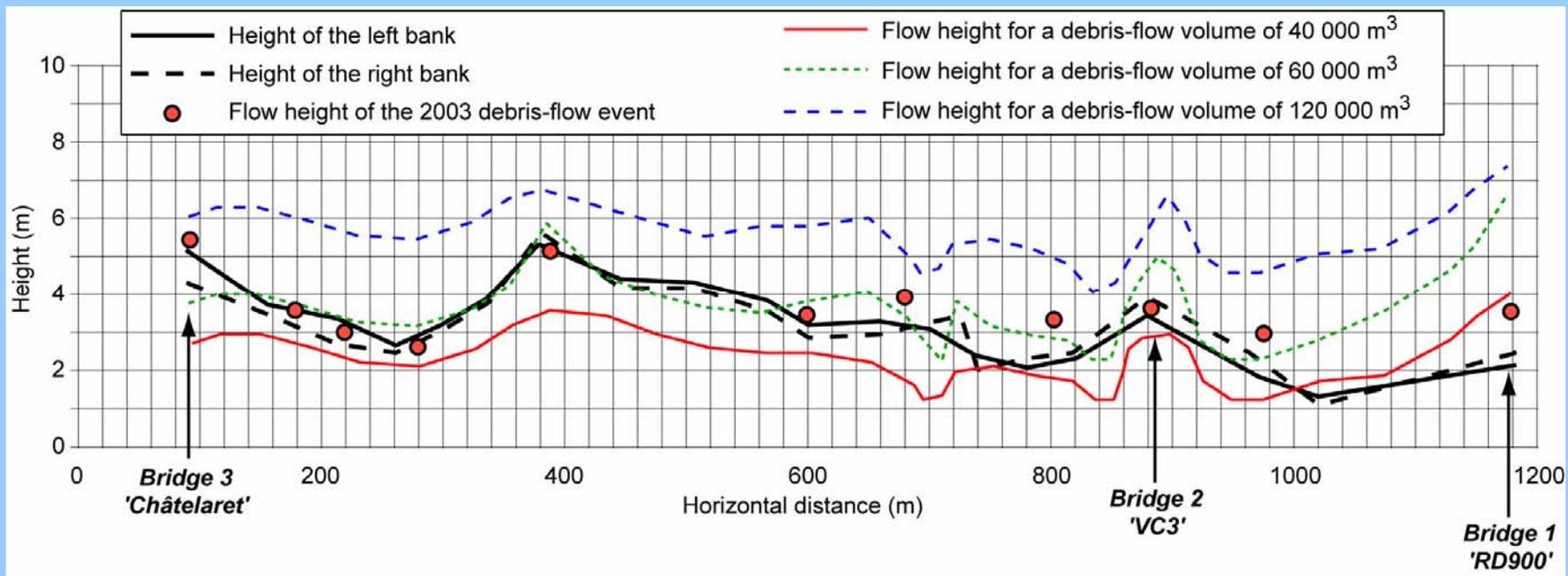
## Définition des volumes minimaux pour atteindre le cône (zones habitées)



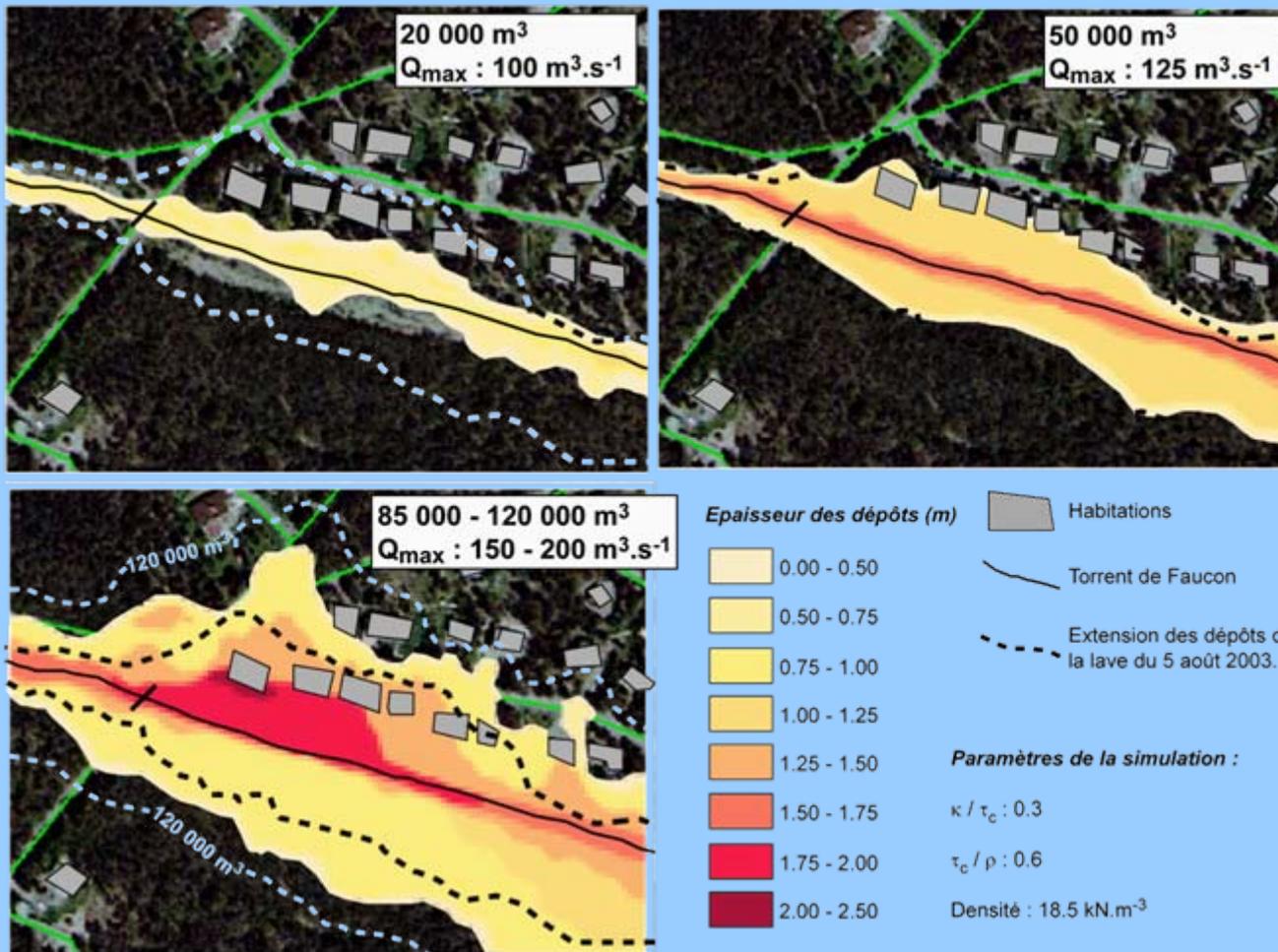
Volume minimal pour atteindre le cône :

15 000  $m^3$  (fluide) à  
 30 000  $m^3$  (visqueux)  
 de lave (matériaux  
 solide + eau)

## Définition des volumes minimaux pour provoquer des débordements sur le cône (zones habitées)



## Définition des volumes minimaux pour provoquer des débordements sur le cône (zones habitées)



Volume minimal pour provoquer des débordements :

- Débordement significatif à partir de **50 000 m<sup>3</sup>** ;

- Bonne correspondance entre les volumes définis par le modèle 1D et le modèle 2D ;

- ➡ Caractérisation rhéologique est pertinente si elle est menée sur **l'ensemble du spectre granulométrique en croisant plusieurs méthodes** (rhéométrie, slump tests, flume tests, etc.) ;
- ➡ **Transposition** rhéologie laboratoire – terrain reste difficile ➡ poursuivre les travaux en laboratoire et sur des événements de laves ;
- ➡ Modèles numériques (**calés et validés en laboratoire et sur des cas réels !**) utilisés en chaîne peuvent être des outils d'aide à la décision pour la gestion de l'aléa ;
- ➡ ... mais il faut poursuivre les **opérations de calage/validation** sur des **événements bien renseignés** ;
- ➡ Inciter les recherches à l'échelle du laboratoire, du terrain et de la modélisation numérique sur **un modèle physique 'global' (qui intègre les 3 phases) et facilement transposable** en favorisant les contacts entre les numériciens, les mécaniciens des sols et des fluides et les géomorphologues ;
- ➡ Modèle global ➡ Intégration des **phénomènes d'érosion/dépôt pendant la propagation** et possibilité de **changer le comportement** du matériau en cours de propagation