

8<sup>èmes</sup> Journées

Fiabilité des  
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,  
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX  
ECCOREV  
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



# Evaluation des aléas dans le cadre d'une étude de dangers prototype des digues de protection contre les crues torrentielles

D. Laigle, P. Mériaux, D. Richard



UR Erosion Torrentielle Neige et Avalanches – Grenoble  
UR Ouvrages Hydrauliques – Aix-en-Provence

# Un système d'endiguement à l'environnement complexe

- ✓ **En amont, un bassin versant montagnard (6 km<sup>2</sup>), avec :**
  - **Des aléas naturels :**
    - Crues torrentielles (laves, charriage)
    - Glissement de terrain
    - Avalanches...
  - **Une correction active RTM (seuils, drainage,...)**
- ✓ **En aval, des enjeux sur un cône de déjection, des ponts...**



# Phénomènes torrentiels : le charriage torrentiel

- ✓ En crue, très forte charge solide
- ✓ Forte dépendance aux apports solides du bassin versant
- ✓ Charriage génère:
  - Engravements
  - Incision du lit et érosion latérale



Exemples d'affouillement et d'engravement massif par du charriage

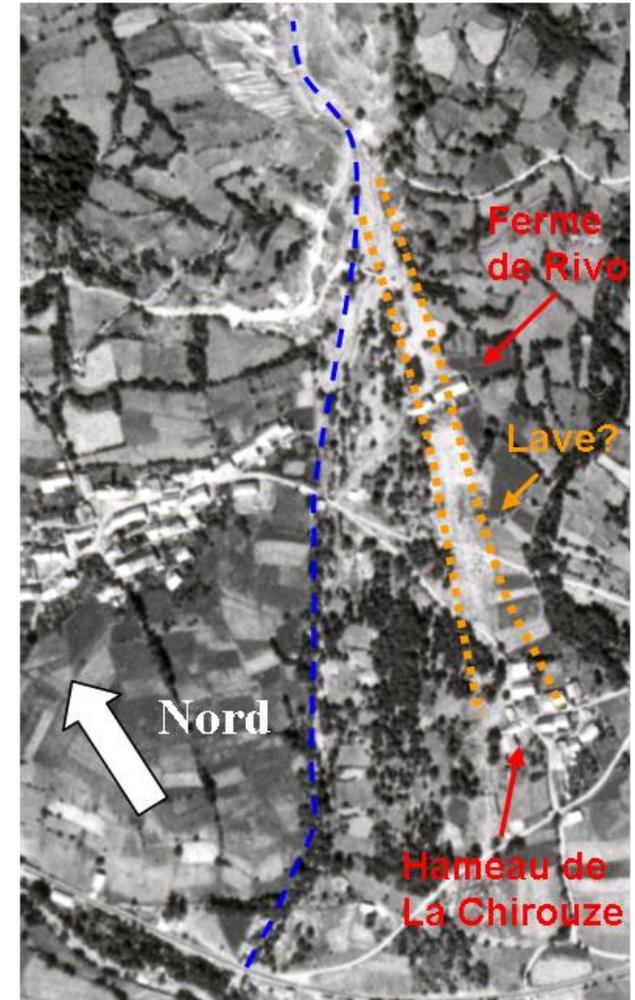
# Phénomènes torrentiels : les laves torrentielles

- ✓ Propagation rapide (qq. m/s)
- ✓ Écoulement épais (qq. m)
- ✓ matériau très concentré (1/4 eau 3/4 solide) avec des blocs



*La rue principale de la CHIROUZE*

Trajet supposé de la lave de 1948  
(photo aérienne 1952)



# Caractéristiques du système étudié

- ✓ **900 m de digues** (de classe C)
- ✓ de constitution variable : mixte (béton ou enrochements + remblai) ou remblai homogène
- ✓ découpées en **9 tronçons « homogènes »**
- ✓ réparties, **rive droite et/ou rive gauche**, le long des **750 m du cours** du torrent sur son cône de déjection
  
- ✓ **Méthodologie EDD :**
  - ✓ Contraintes dues aux phénomènes torrentiels
  - ✓ Analyse fonctionnelle
  - ✓ Résistance des digues
  - ✓ Scénarios de défaillance
  - ✓ Criticité de ces scénarios



# Identification et caractérisation des risques

## Scénarios de « crues » (sollicitations) :

- Crues « d'eaux claires »
- Charriage avec incision
- Charriage avec engravement
- Lave torrentielle
- Corps flottants

## Modes de défaillance des ouvrages :

- ✓ Rupture de la digue
- ✓ Surverse (avec ou sans ouverture de brèche)
- Affouillement de pied (incision du lit ou érosion latérale)
- Impact (blocs, flottants)
- Débordement (y/c contournement de digue)

# Etude des aléas : objectifs et méthode

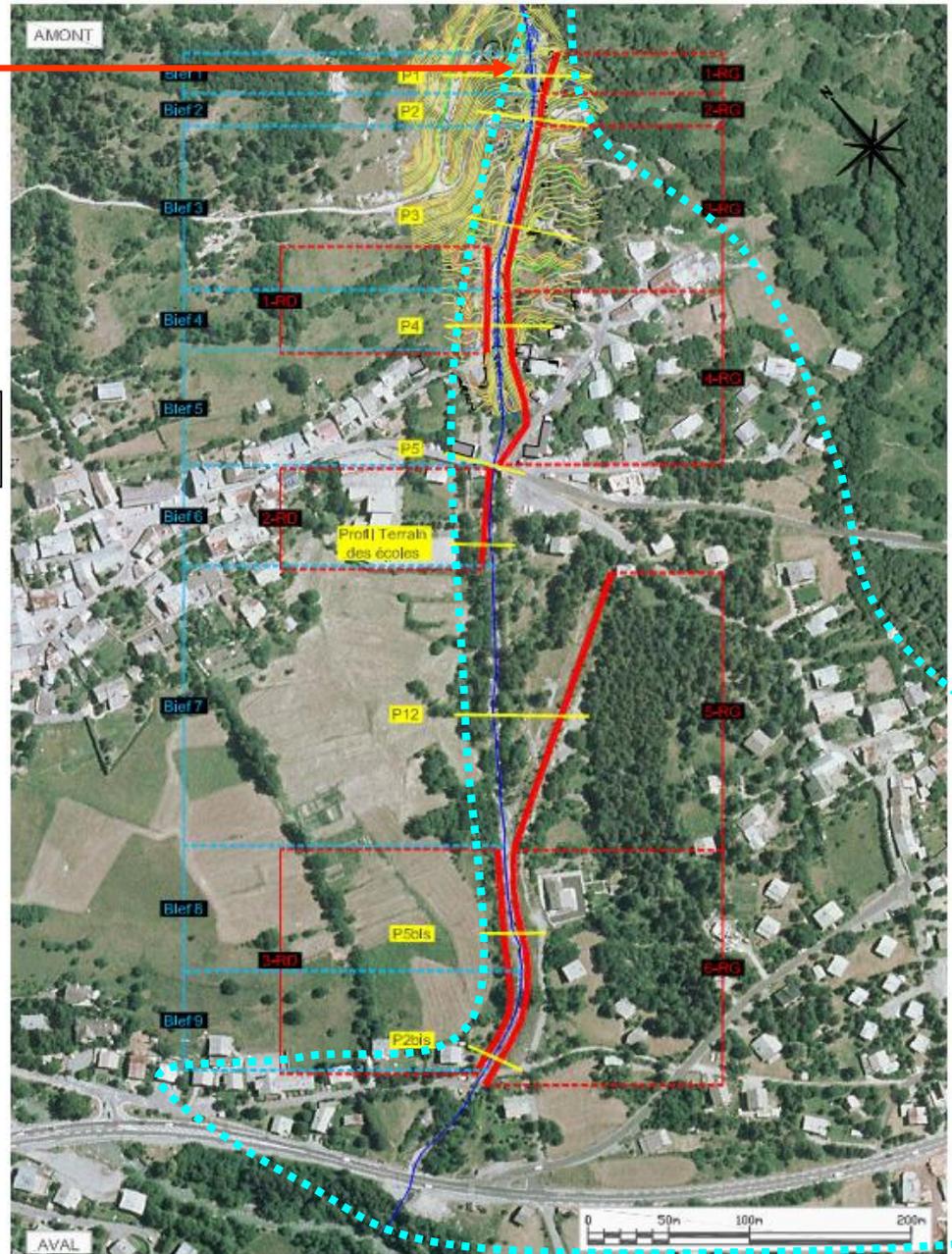
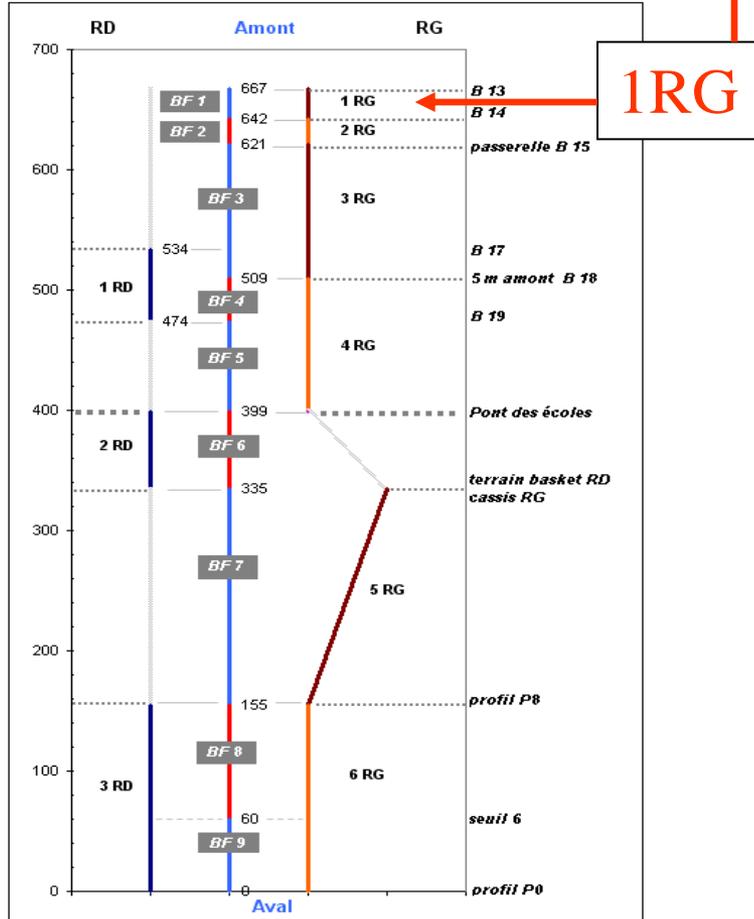
## ✓ Objectifs

- Contexte : absence d'étude préalable du bassin versant et de diagnostic des digues
- Évaluation des contraintes appliquées aux digues
- Identification des points faibles du système

## ✓ Méthode

- Évaluation de la capacité de transit du chenal en limite de débordement
- Découpage du chenal en 9 biefs « homogènes »
- Application « experte » de formules simples (eau claire, charriage engravements ou incision, laves torrentielles)
- Évaluation qualitative de la probabilité d'occurrence des phénomènes à la limite du débordement

# Vue en plan du système d'endiguement



# Méthodologie : écoulement liquide faiblement chargé

- La formule de Rickenmann (1990)
  - Vitesse  $U$  (m/s), pente  $I$  (m/m), rayon hydraulique  $R_H$  (m) et granulométrie ( $d_{90}$ ) :

$$U = 1,5 R_H \sqrt{\frac{g}{d_{90}}} I^{0,21}$$

- La formule d'écoulement en régime critique:

$$U = \sqrt{gh}$$

- On garde l'hypothèse la plus défavorable en termes de débit transité
- On compare au débits de l'étude hydrologique ( $Q_{10}$ ,  $Q_{100}$ ..)

# Méthodologie : laves torrentielles

- La formule de Coussot (1994)

- Vitesse  $U$  (m/s), pente  $I$  (m/m), épaisseur de l'écoulement  $h$ , rayon hydraulique  $R_H$ , la masse volumique  $\rho$  et paramètres rhéologiques :  $\tau_c$  et  $K$ .

$$U = \left(\frac{\tau_c}{K}\right)^3 h \left[ \frac{1}{A} \left( \frac{\rho g R_H \sin(I)}{\tau_c} - 1 \right) \right]^{10/3}$$

- Deux hypothèses traitées :

- Lave fluide (coulée de boue sans front) :  $\tau_c / \rho = 1,0$
- Lave torrentielle avec front granulaire :  $\tau_c / \rho = 1,5$

# Méthodologie : engravements / incisions

- **Évaluation du seuil de début de transport : formule de Bathurst** (débit par unité de largeur) :

$$q_c = 0,15\sqrt{g} d_{50}^{3/2} I^{-1,12}$$

- **Évaluation de la capacité de transport : formule de Meunier :**

$$Q_s / Q_l = 8,2 I^2$$

- **Les engravements peuvent être significatifs :**
  - Si la pente diminue (raccordement entre deux biefs)
  - L'apport solide amont est suffisant
- **En pratique, hypothèse d'une zone de régulation amont de pente  $\pm 13\%$  (corrigée par des seuils) (spécifique du site)**

# Résultats « aléas » : 2 exemples

|          | Phénomène considéré                |                          |  |   |
|----------|------------------------------------|--------------------------|--|---|
| Bief     | Crue liquide                       | Lave torrentielle fluide | Lave torrentielle visqueuse  | Charriage : engravement / incision  |
| Bief n°1 | <b>Transit crue &gt; millénale</b> | <b>Transit</b>           | <b>Débordement préférentiel en rive droite mais un débordement en rive gauche (sans retour au chenal) ne peut être exclu</b> | <b>Jugé non significatif</b>  |
| Bief n°6 | <b>Transit crue &gt; millénale</b> | <b>Transit</b>           | <b>Non traité : hypothèse d'un blocage inévitable au pont des écoles</b>   | <b>Engravement dommageable possible seulement si apport massif de matériau (débordement préférentiel en rive droite).<br/>Incision probable si déficit en matériau solide</b> |

# Synthèse du risque de défaillance: exemple du tronçon 1RG

| Processus causal              | Niveau de contraintes (imposé par le bief) | Niveau de résistance du tronçon de digue | Risque de défaillance du tronçon de digue |
|-------------------------------|--|--|---|
| Incision                      | Faible                                     | Moyen                                    | FAIBLE                                    |
| Erosion latérale              | Moyen                                      | Excellent                                | FAIBLE                                    |
| Choc résultant d'une lave     | Fort                                       | Excellent                                | FAIBLE                                    |
| Surverse de lave torrentielle | Fort                                       | Moyen                                    | FORT                                      |

# Conclusions

- ✓ **Complexité des phénomènes torrentiels et de l'environnement, d'où nécessité d'une analyse simplifiée largement fondée sur l'avis d'expert...**
- ✓ **...surtout si l'on ne dispose pas au préalable d'une étude du bassin versant torrentiel**
- ✓ **L'étude des aléas proposée ici a permis de répondre aux objectifs de l'EDD du torrent de la Salle-les-Alpes**
- ✓ **Généralisation de cette méthode à toutes les EDD en contexte torrentiel ?**

**Merci de votre attention**



# Synthèse des scénarios de défaillance à risque de survenance fort ou modéré

|      | Incision | Erosion latérale | Impact                    | Surverse  |
|------|----------|------------------|---------------------------|---|
| 1 RG |          |                  |                           | <b>Charriage</b><br><b>Laves torrentielles</b>                                  |
| 2 RG |          |                  | x<br><b>Blocs (laves)</b> | <b>Charriage</b><br>Laves torrentielles   |
| 3 RG | x        |                  |                           | Charriage<br>Laves torrentielles amont  |
| 4 RG | x        | x                | x                         | Charriage amont – <b>Charriage aval</b><br><b>Laves torrentielles profil P4</b> |
| 5 RG | x        | x<br><b>aval</b> | aval                      | <b>Charriage</b>  |
| 6 RG |          |                  |                           | <b>Charriage amont - Charriage aval</b>   |

|      |          |   |  |  |
|------|----------|---|--|--|
| 1 RD | x        |   |  | Charriage                                      |
| 2 RD | <b>x</b> | x |  | <b>Charriage</b><br><b>Laves torrentielles</b> |
| 3 RD | x        | x |  | <b>Charriage amont - Charriage aval</b>        |

*Synthèse des scénarios de défaillances à risque de survenance fort (en **rouge gras**) ou modéré (en **orange**) par tronçon de digue*