



Modélisation de l'impact/interaction de blocs rocheux sur merlon

Stiven CUERVO

Journée technique CFMR « travaux en montagne »

19/11/2015

1. Introduction à la problématique de modélisation d'impact sur merlon

- 1.1 Méthodes existantes
- 1.2 Avantages et inconvénients
- 1.3 Enjeux actuels

2. Développements

- 2.1 Méthodes discrètes
- 2.2 Méthodes continues

3. Applications

- 3.1 Merlon de Meillerie, Haute Savoie
- 3.2 Merlon Perrières
- 3.3 Recherche et développement : analyse multi-impact

4. Conclusions et travaux en cours





**Merlon : Ouvrage
passive qui vise à
absorber l'énergie de
masses
IMPORTANTES en
mouvement**



1. Introduction à la problématique de modélisation d'impacts sur merlon

1/3 Comment dimensionner ces ouvrages ?

7/80

Plusieurs volets, tous interdépendants

1

Etude de la dynamique de(s) bloc(s). Répondre à la question : où, combien de blocs, à quelle vitesse et sur quelle hauteur?

Définition de l'hauteur minimale

2

Etude du comportement de l'ouvrage sous impact dynamique. Répondre à la question : est l'ouvrage suffisante pour contenir l'impact ?

Définition de l'épaisseur

3

Etude de la stabilité (interne + externe) : répondre aux question : est l'ouvrage stable ? Est le talus stable ?

1/3 Comment dimensionner ces ouvrages ?

8/80

Plusieurs volets, tous interdépendants

1

Etude de la dynamique de(s) bloc(s). Répondre à la question : où, combien de blocs, à quelle vitesse et sur quelle hauteur?

Définition de l' hauteur

2

Etude du comportement de l'ouvrage sous impact dynamique. Répondre à la question : est l'ouvrage suffisante pour contenir l'impact ?

Définition de l'épaisseur

3

Etude de la stabilité (interne + externe) : répondre aux question : est l'ouvrage stable ? Est le talus stable ?

1/3 Méthodes existantes pour analyser la mécanique d'impact

9/80

But : comprendre la mécanique (effort/déformation) d'un merlon lors d'un (ou plusieurs) impacts de blocs rocheux.

1/3 Méthodes existantes pour analyser la mécanique d'impact

10/80

But : comprendre la mécanique (effort/déformation) d'un merlon lors d'un (ou plusieurs) impacts de blocs rocheux.

Voie expérimentale. Environ 10 campagnes bien documentées

1/3 Méthodes existantes pour analyser la mécanique d'impact

11/80

But : comprendre la mécanique (effort/déformation) d'un merlon lors d'un (ou plusieurs) impacts de blocs rocheux.

Voie expérimentale. Environ 10 campagnes bien documentées

Plus part des test réalisés entre 1993 et 2010.

Burroughs, Hensen et Jiang 1993. 18 test avec des énergies jusqu'à 1500 kJ.
Les blocs ont roulé au long d'une pente avant d'impacter l'ouvrage.

Yoshida & Nomura 1998. 9 test avec énergies jusqu'à 2700 kJ. Merlon renforcé par géotextiles.

Fukui 2002. Energie maximale 120 kJ. Chute verticale d'un bloc de 4t sur différentes configurations de merlon.

Polito 2003. Peila et al. 2007. Energie maximale 4000 kJ.

Lorentz 2006. Energie maximale 45 kJ. Chute vertical de blocs en béton sur une structure sandwich.

Lambert et al. 2010. Energie maximale 2000 kJ. Impact d'un bloc sphérique sur un ouvrage de structure cellulaire.

Maccaferri et al. 2010. Energies autours de 100 kJ.

1/3 Méthodes existantes pour analyser la mécanique d'impact

12/80

But : comprendre la mécanique (effort/déformation) d'un merlon lors d'un (ou plusieurs) impacts de blocs rocheux.

Voie expérimentale. Au moins 10 campagnes bien documentées

Plus part des test réalisés entre 1993 et 2010.

Burroughs, Hensen et Jiang 1993. 18 test avec des énergies jusqu'à 1500 kJ. Les blocs ont roulé au long d'une pente avant d'impacter l'ouvrage.

Yoshida & Nomura 1998. 9 test avec énergies jusqu'à 2700 kJ. Merlon renforcé par géotextiles.

Fukui 2002. Energie maximale 120 kJ. Chute verticale d'un bloc de 4t sur différentes configurations de merlon.

Polito 2003. Peila et al. 2007. Energie maximale 4000 kJ.

Lorentz 2006. Energie maximale 45 kJ. Chute vertical de blocs en béton sur une structure sandwich.

Lambert et al. 2010. Energie maximale 2000 kJ. Impact d'un bloc sphérique sur un ouvrage de structure cellulaire.

Maccaferri et al. 2010. Energies autours de 100 kJ.

1/3 Polito 2003. Peila et al. 2007. Energie maximale 4000 kJ.

13/80

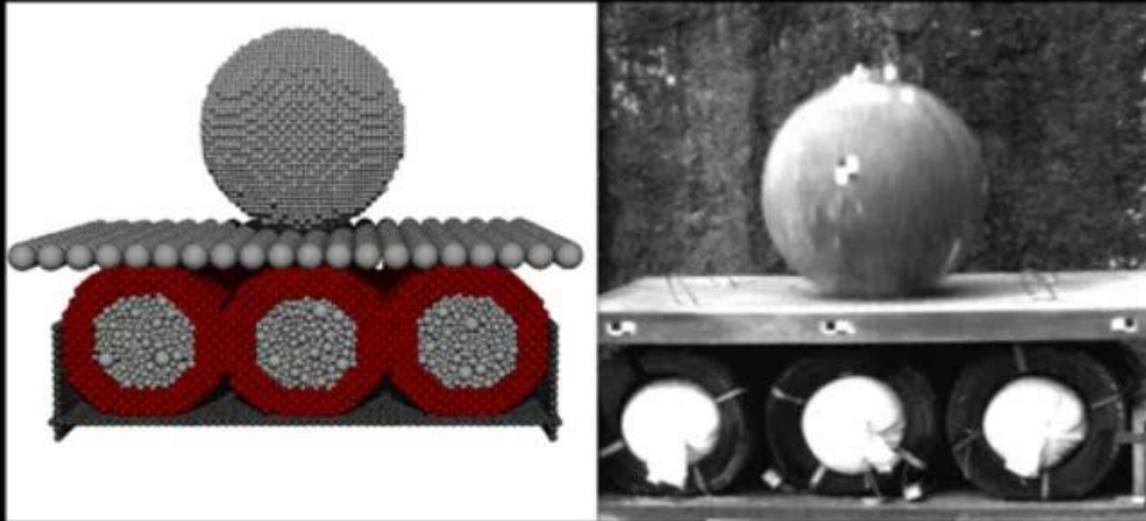


1/3 De l'expérimental vers le numérique

14/80

Les expériences sur site réelle permettent principalement de :

- ✓ Valider une configuration donnée
- ✓ Comprendre quelques mécanismes macroscopiques
- ✓ Valider des modèles numériques
- ✓ Estimer des lois empiriques



1/3 Méthodes existantes pour analyser la mécanique d'impact

15/80

But : comprendre la mécanique (effort/déformation) d'un merlon lors d'un (ou plusieurs) impacts de blocs rocheux.

Voie numérique

1/3 Méthodes existantes pour analyser la mécanique d'impact

16/80

But : comprendre la mécanique (effort/déformation) d'un merlon lors d'un (ou plusieurs) impacts de blocs rocheux.

Voie numérique

Méthodes discrètes

Méthodes continues

Méthodes couplées **

SDEC (3SR & IMSRN)
PFC (Itasca)
YADE (Irstea & 3SR)

Maccaferri
(ABAQUS/explicit)
FLAC3D (Itasca)
MPMbox (IMSRN & 3SR)
CESAR-LCPC

Irstea, 3SR & Egis

Méthodes continues.

Peu adaptées aux problèmes de grandes déformations.

Difficultés dans les ruptures par cisaillement. Nécessite des rhéologies sophistiquées (des fois peu réalistes) pour tenir compte de plusieurs phénomènes (ex. rupture).

Calculs très rapides. Facile utilisation en BE.

VS

Méthodes discrètes:

Mieux adapté pour caractériser les phénomènes locaux (grandes déformations, ruptures, réarrangement granulaire sans faire appel à des lois complexes.

Difficulté de modéliser les interactions entre deux structures différentes : ex. géotextile/granulats

Calculs longs.

Sur la modélisation
numérique

Avantages :

Possibilité d'analyser d'autres configurations géométriques sans avoir besoin de la tester expérimentalement. -> possibilité de prédire le comportement.

Etudes paramétriques -> optimisation.

Accès à des données microscopiques : efforts dans le merlon, progression des ruptures, efforts sur les fondations, etc.

Sur la modélisation
numérique

Avantages :

Possibilité d'analyser d'autres configurations géométriques sans avoir besoin de la tester expérimentalement. -> possibilité de prédire le comportement.

Etudes paramétriques -> optimisation.

Accès à des données microscopiques : efforts dans le merlon, progression des ruptures, efforts sur les fondations, etc.

Désavantages :

Forte dépendance de l'utilisateur. Un modèle numérique peut-être assimilé à un jouet.

Difficulté à définir les paramètres.

Contraintes informatiques ? Cela évolue !

Valider les modèles actuels sur d'autres configurations (développer d'autres modèles ??)

Développer plus de lois de comportements.

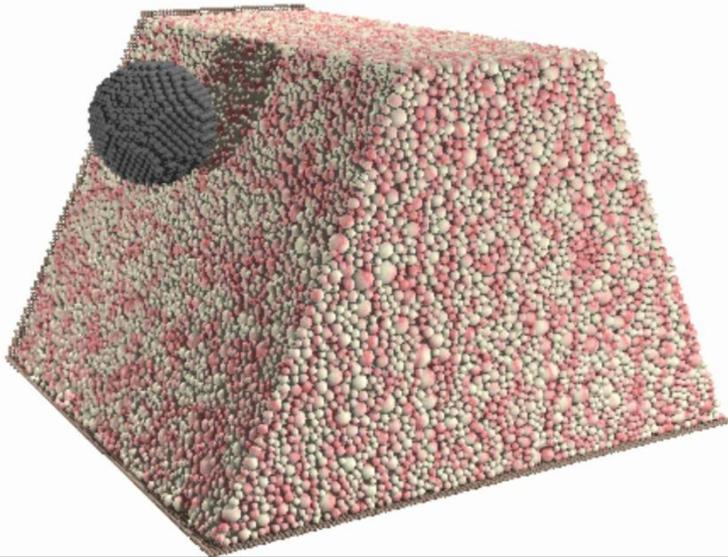
Réglementer/guider le dimensionnement des merlons (début projet Rempare -> projet C2ROP)

2. R&D : Développements IMSRN

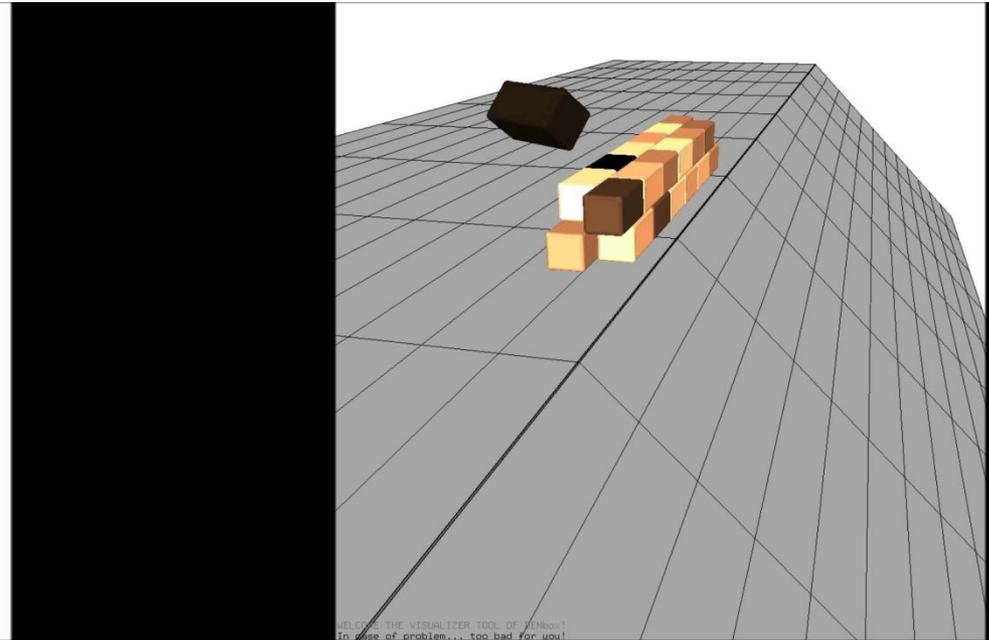
Méthodes discrètes pour les
éboulements et chute de blocs (depuis
2006)

Méthodes continues pour les
glissements de terrain et les coulées de
boues (depuis 2014)

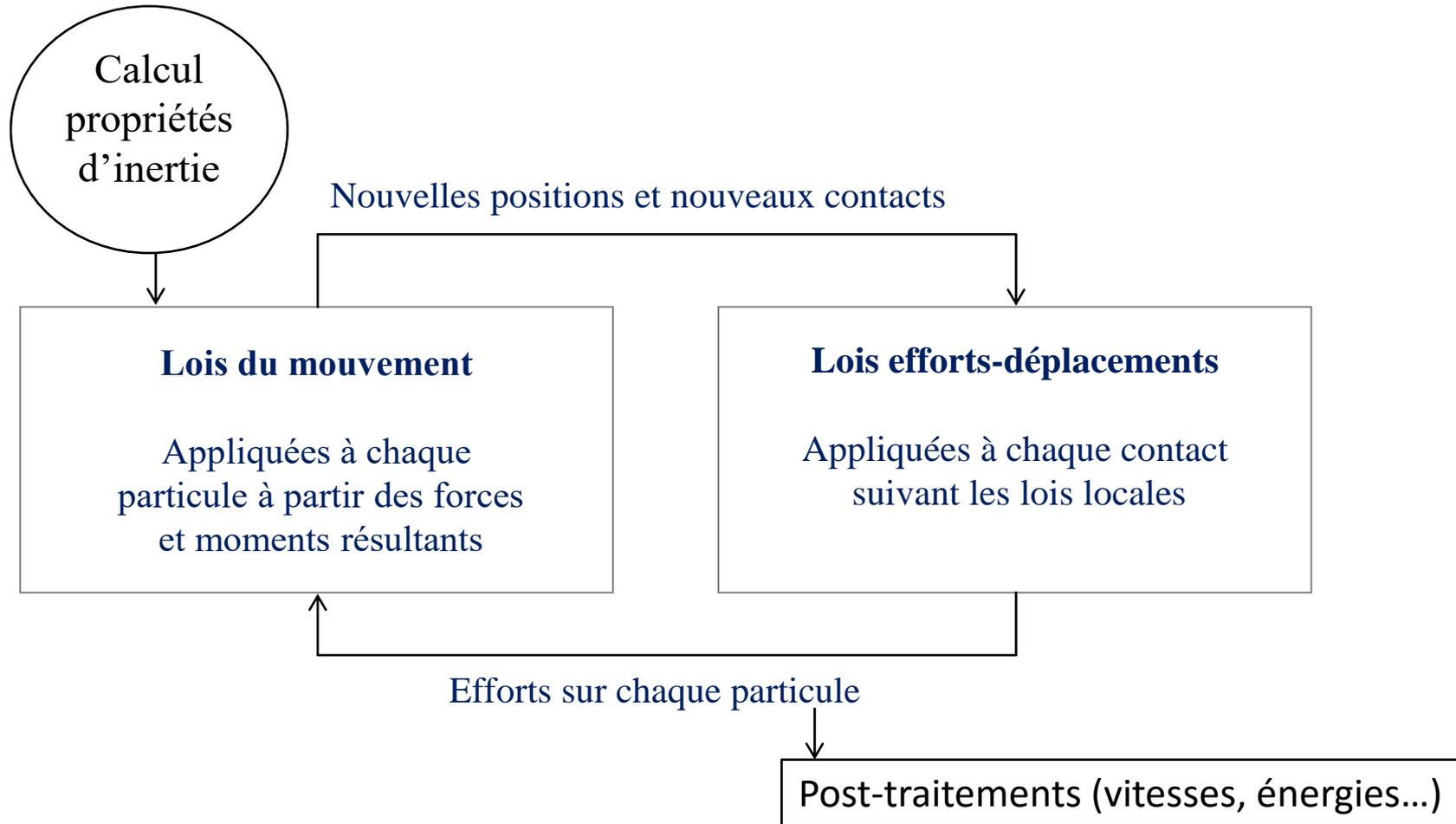
Modéliser la totalité de l'ouvrage comme un assemblage de particules



Merlon en remblais renforcé
(SDEC – 2 thèses financées)



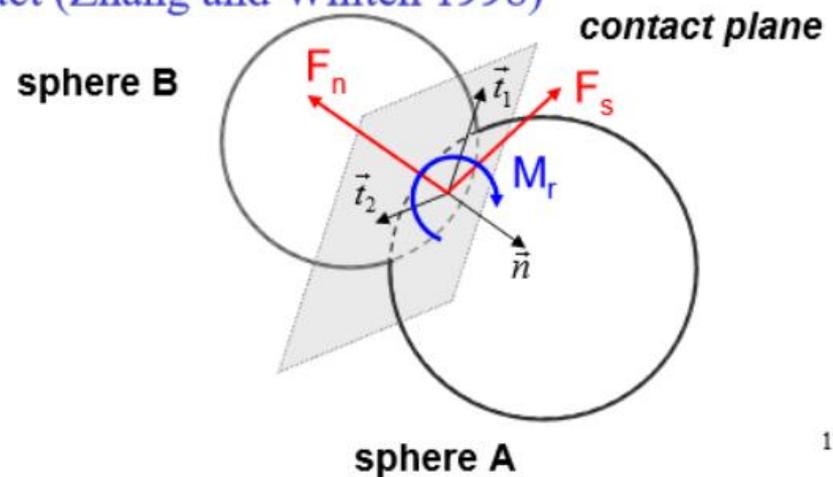
Enrochement sec
(DEMbox – 1 thèse financée)



Plusieurs lois de comportement : lois cohésives/visqueuses

24/80

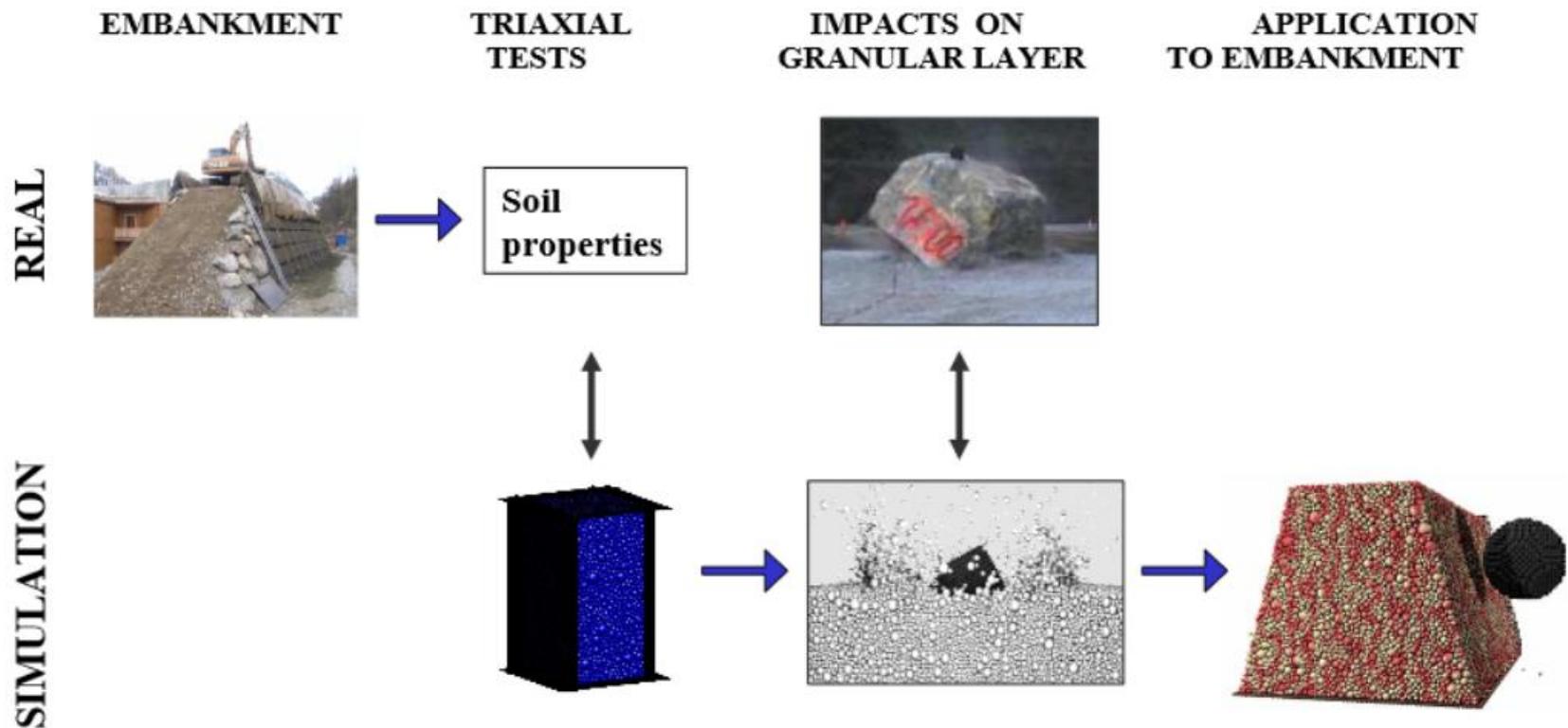
- Use of the software **SDEC** (Donzé et al. 1997):
 - Spherical elements,
 - Rigid and homogenous elements,
 - Newton's second law resolute with explicit scheme,
 - Force-Displacement formulation for interaction,
 - Mohr Coulomb criterion
 - Rolling resistance at contact: M.T.L (Plassiard 2007)
 - Non linear viscous damping at contact (Zhang and Whiten 1998)



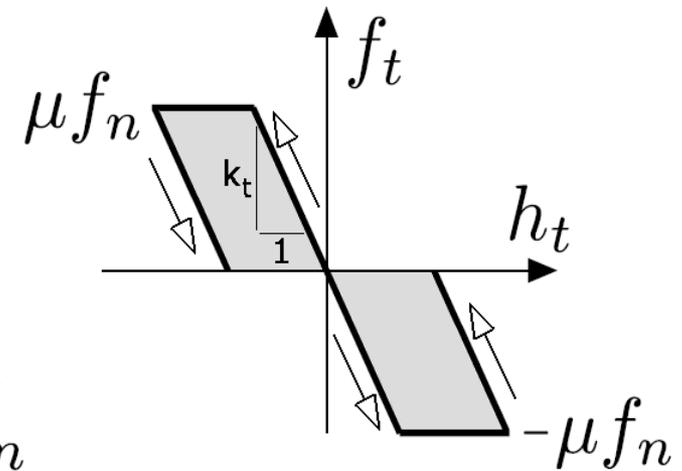
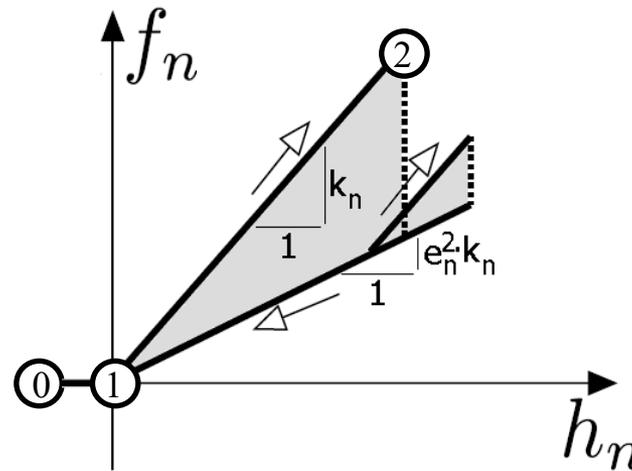
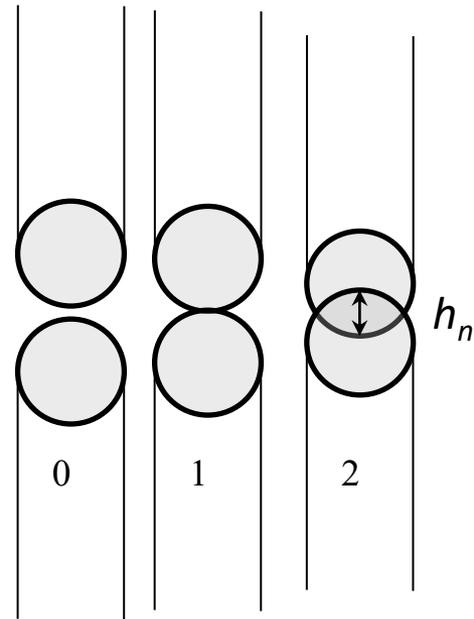
Plusieurs lois de comportement : lois cohésives/visqueuses

25/80

- Simplified model: Structure is represented by a **homogenous embankment**:
- Step by step calibration of the local parameters (Plassiard 2007)



Loi dissipative d'impact et de frottement

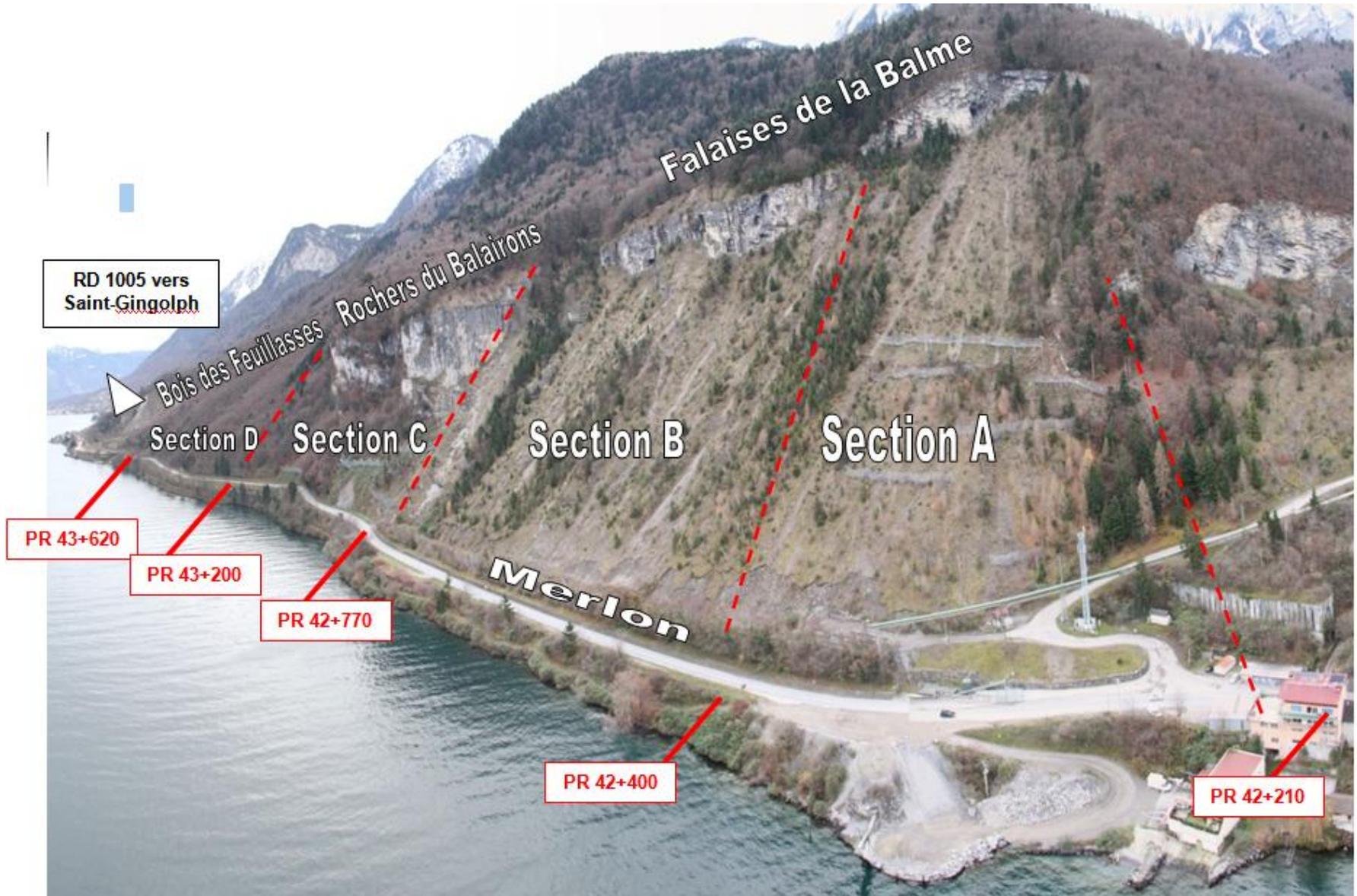


e_n^2 représente le taux d'énergie cinétique dissipée lors d'un choc.

Frottement statique.

[Cuervo 2015]

3. Quelques applications



GENEVE/LEMAN

MEILLERIE ▼ FAITS DIVERS

10/01/1995

La montagne s'écroule la carrière disparaît

Plus de 100 000 mètres cubes de pierres et de rochers se sont détachés de la montagne, hier matin, et ont englouti les installations de la principale carrière de la commune

Il était 7 h 50, hier matin, lorsque tout un pan de la montagne, qui surplombe les installations de la carrière de la Rhôna, s'est effondré. Un éboulement spectaculaire qui aurait été provoqué par le dégel et qui a presque totalement recouvert la carrière des Etalins. Un site exploité par l'entreprise Sagdranse, plus connue à Meillerie sous le nom de "la Rhôna".

En quelques secondes, plus de 100 000 mètres cubes de pierres et de rochers se sont abattus sur les installations de la carrière, détruisant, dans leur déferlement, les concasseurs, le tapis roulant, les engins d'extraction et de charge-

ment, les baraquements et un important matériel.

Par chance, cet éboulement imprévisible a eu lieu quelques minutes avant que les ouvriers prennent leur poste de travail.

Une fois l'alerte donnée, d'importants moyens ont été dépêchés sur place. Dans le cadre d'une opération coordonnée par la direction départementale des services d'incendie et de secours, les pompiers de Thonon-les-Bains et d'Evian, aux ordres du commandant Kaiser et du capitaine Morand, ont pris, avec l'aide des gendarmes de la brigade territoriale de Saint-Gingolph, les premières mesures pour porter secours à d'éventuelles victimes et délimiter un périmètre de risque.

Premier impératif des pompiers, gendarmes et agents de l'équipement présents sur place : assurer la sécurité de la route nationale 5, qui serpente en contre-bas de la montagne, au pied d'une pente à 15 %. Hier après-midi, une équipe de géologues s'est rendue sur les lieux pour étudier les risques et probabilités d'éboulement des autres couches de la montagne.

Les experts présents sur place semblaient d'accord sur les origines du sinistre, à savoir le dégel. Tous les spécialistes présents tentaient de répondre, de manière pratique, à deux autres questions : est-ce que la RN 5, située à une distance de 80 à 160 mètres de la falaise, risque d'être engloutie par un second ébou-

lement ? Comment purger ce qu'il reste ?

Le verdict des experts devrait permettre aux autorités de prendre les mesures qui s'imposent. Un éboulement non contrôlé pourrait avoir de graves conséquences pour tous ceux qui empruntent la RN 5.

Dix salariés au chômage technique

Cet éboulement, totalement imprévisible, aurait pu être plus dramatique s'il s'était produit pendant les heures de travail. A Meillerie, de nombreux habitants parlent carrément d'un miracle, en raison même de l'heure de l'incident. A quelques



Plus de 100 000 mètres cubes de pierres et de rochers ont détruit toutes les installations de la Rhôna.

minutes près, une dizaine d'ouvriers auraient pu être ensevelis sous les 100 000 mètres cubes de pierres et de rochers qui se sont subitement écrasés sur la carrière. Les dégâts matériels sont considérables. D'importants délais seront nécessaires pour tout remettre en état. Pour l'instant, les responsables de la carrière et les pouvoirs publics attendent le diagnostic des experts avant de procéder aux opérations de dégageement.

Au niveau économique, une dizaine

d'ouvriers vont être mis au chômage technique.

Côté officiel, les gendarmes ont ouvert une enquête, et on notait sur place la présence du capitaine Laurent Thimotée, commandant de la compagnie de l'arrondissement de Thonon-les-Bains. Et les mesures qui pourraient être prises seront, bien entendu, fonction des recommandations émises par les experts.

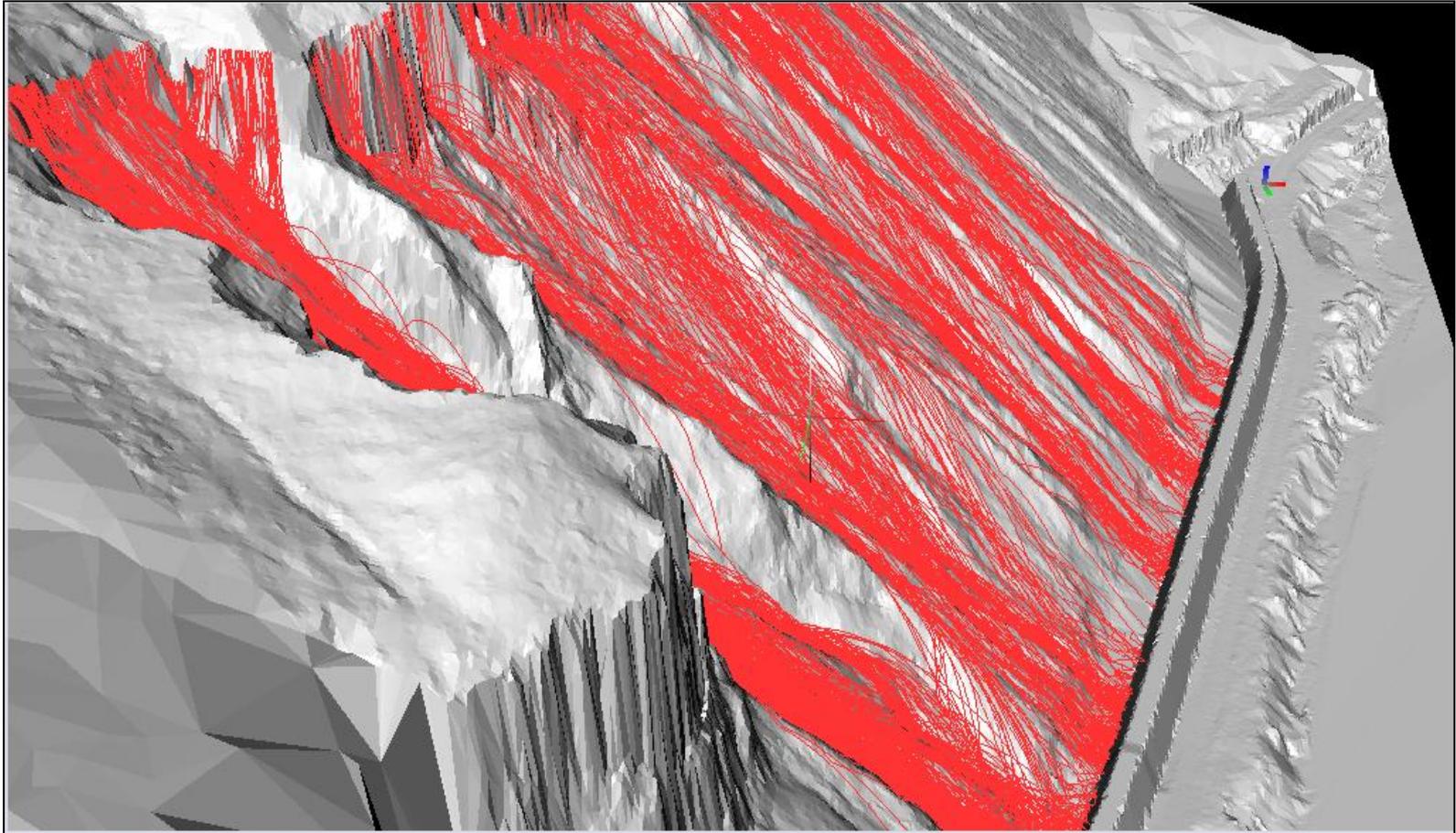
Francis GRUZELLE
avec Jean-Claude COLDER
et René BOUVET ■

Plusieurs épisodes rocheux entre 1990 et 2010. Inefficacité de l'ouvrage constaté.

Meilleirie : étude de la propagation des blocs

30/80

Modèle trajectographique KAYASS3D (IMSRN)



Représentation d'une sélection de 5000 trajectoires en vue latérale depuis la section C. On observe un très bon fonctionnement du merlon pour les trajectoires modélisées.

Meilleirie : modélisation de l'impact

31/80

Suite aux études trajectographiques :

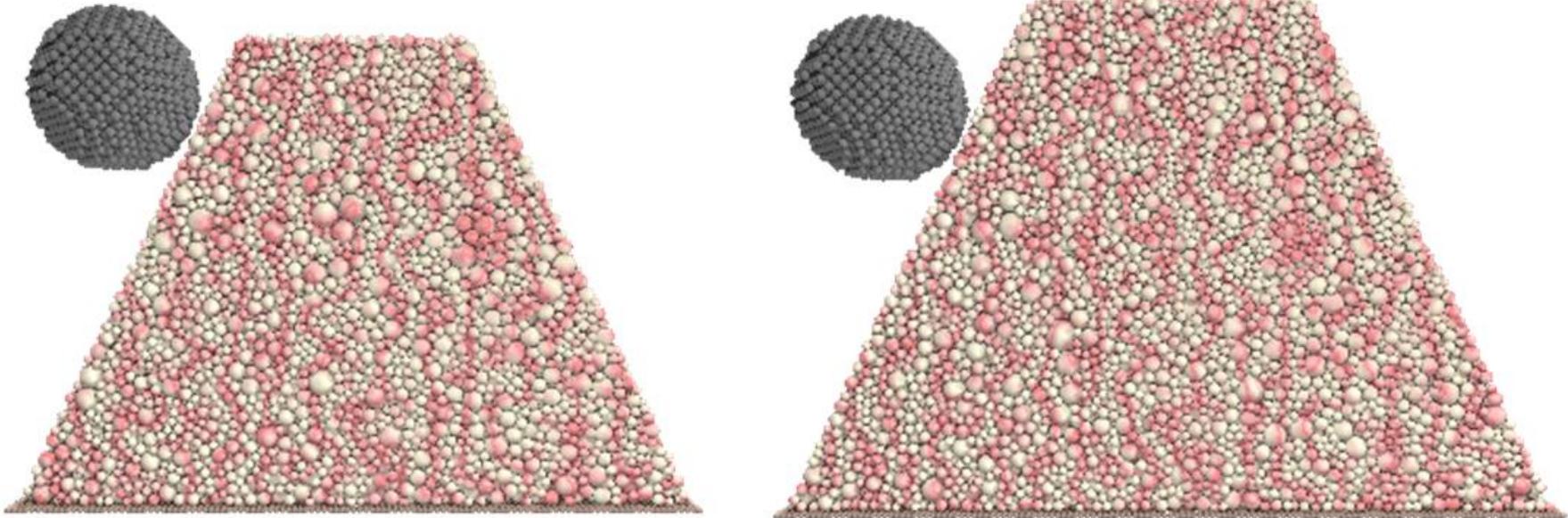
$$V = 25 \text{ m/s}$$

$$H = 11 \text{ m}$$

$$\text{Vol} = 20 \text{ m}^3$$

$$H_{\text{impact}} = 8 \text{ m}$$

$$L_{\text{crête}} = 5.5 \text{ m}$$



Comparaison géométrique à l'échelle des deux configurations testées : gauche : crête 5m, hauteur 10m.
Droite : crête 5m50, hauteur 11m. Pour les deux configurations, l'hauteur d'impact reste égale à 8m.

Meilleirie : modélisation de l'impact

32/80

Suite aux études trajectographiques :

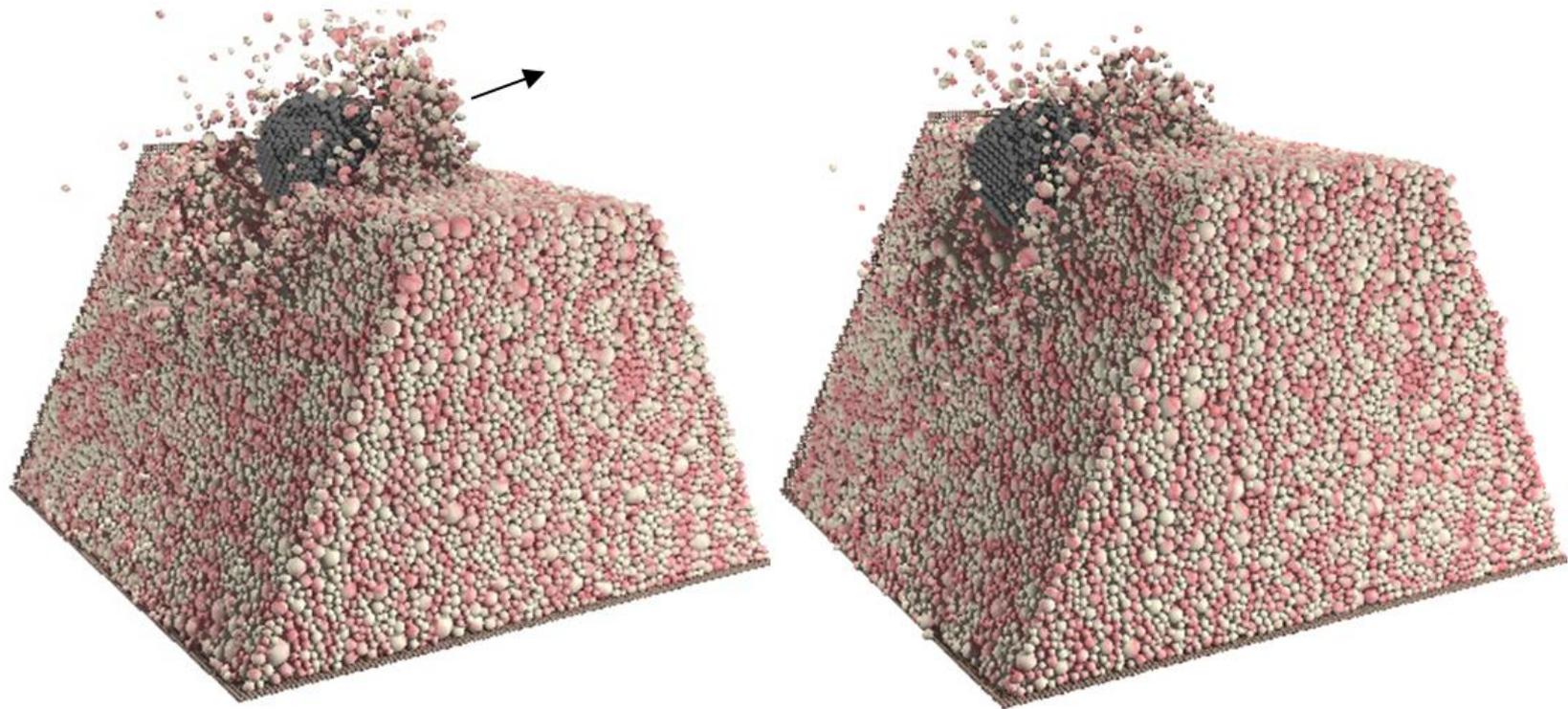
$$V = 25 \text{ m/s}$$

$$H = 10 \text{ et } 11 \text{ m}$$

$$\text{Vol} = 20 \text{ m}^3$$

$$H_{\text{impact}} = 8 \text{ m}$$

$$L_{\text{crête}} = 5 \text{ et } 5.5 \text{ m}$$

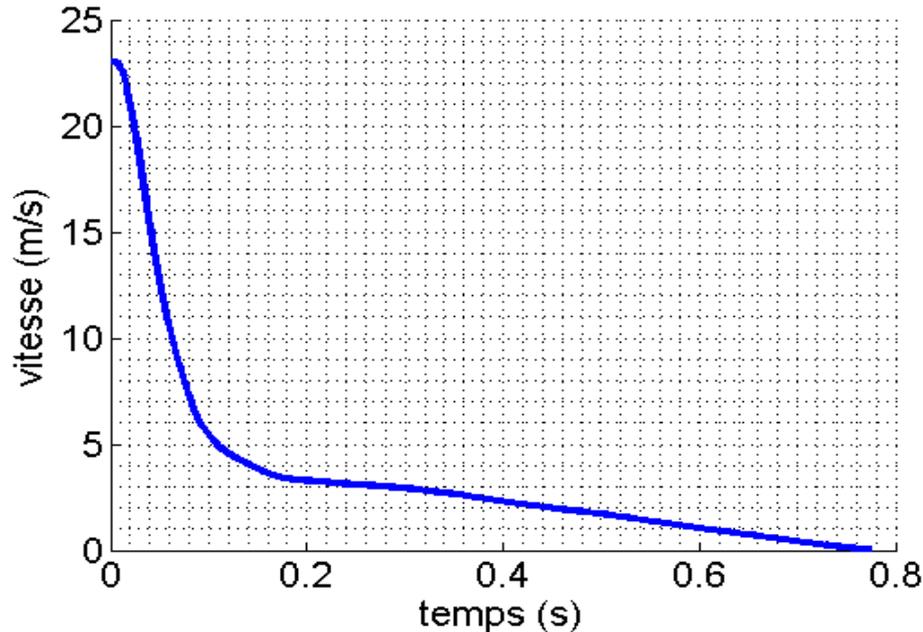


Franchissement de l'ouvrage par la crête, configuration $H = 11 \text{ m}$ retenue.

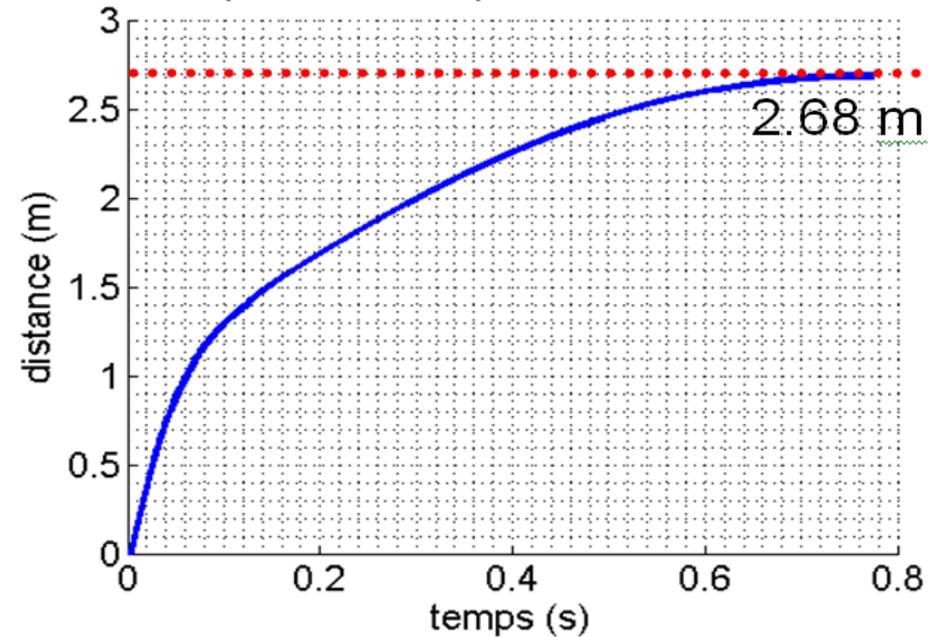
Meilleirie : accès à des informations importantes

33/80

Vitesse du bloc en X



profondeur de penetration du bloc

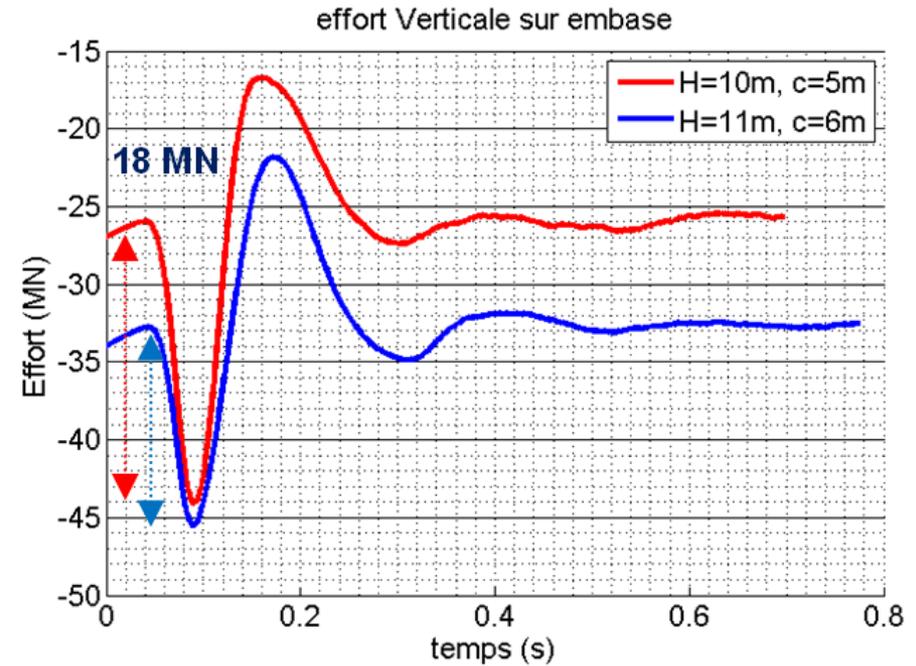
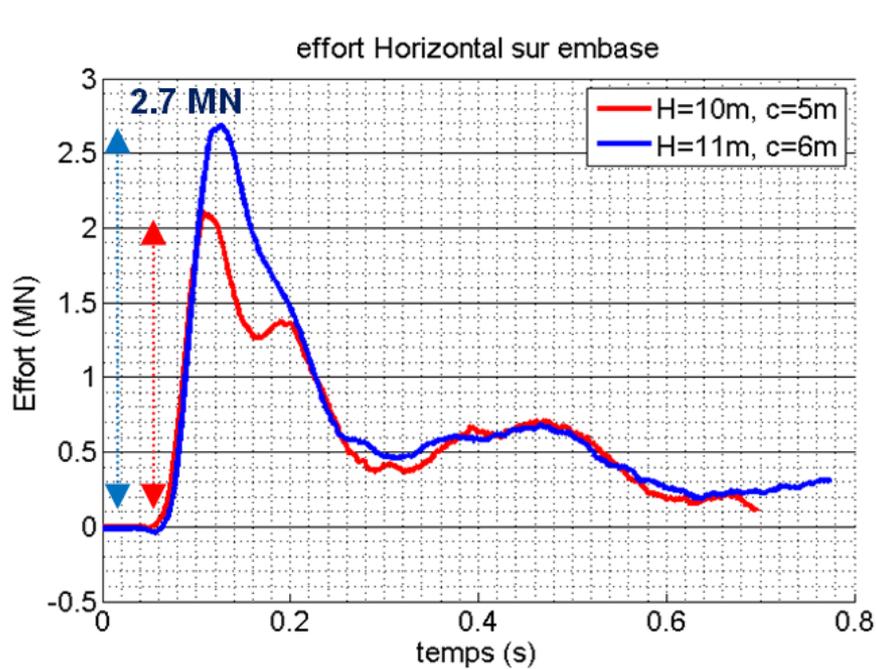


Impact jusqu'à l'arrêt dure moins d'une seconde.

Profondeur maximale du bloc dans le merlon de 2 fois le diamètre du bloc impacteur.

Meilleirie : accès à des informations importantes

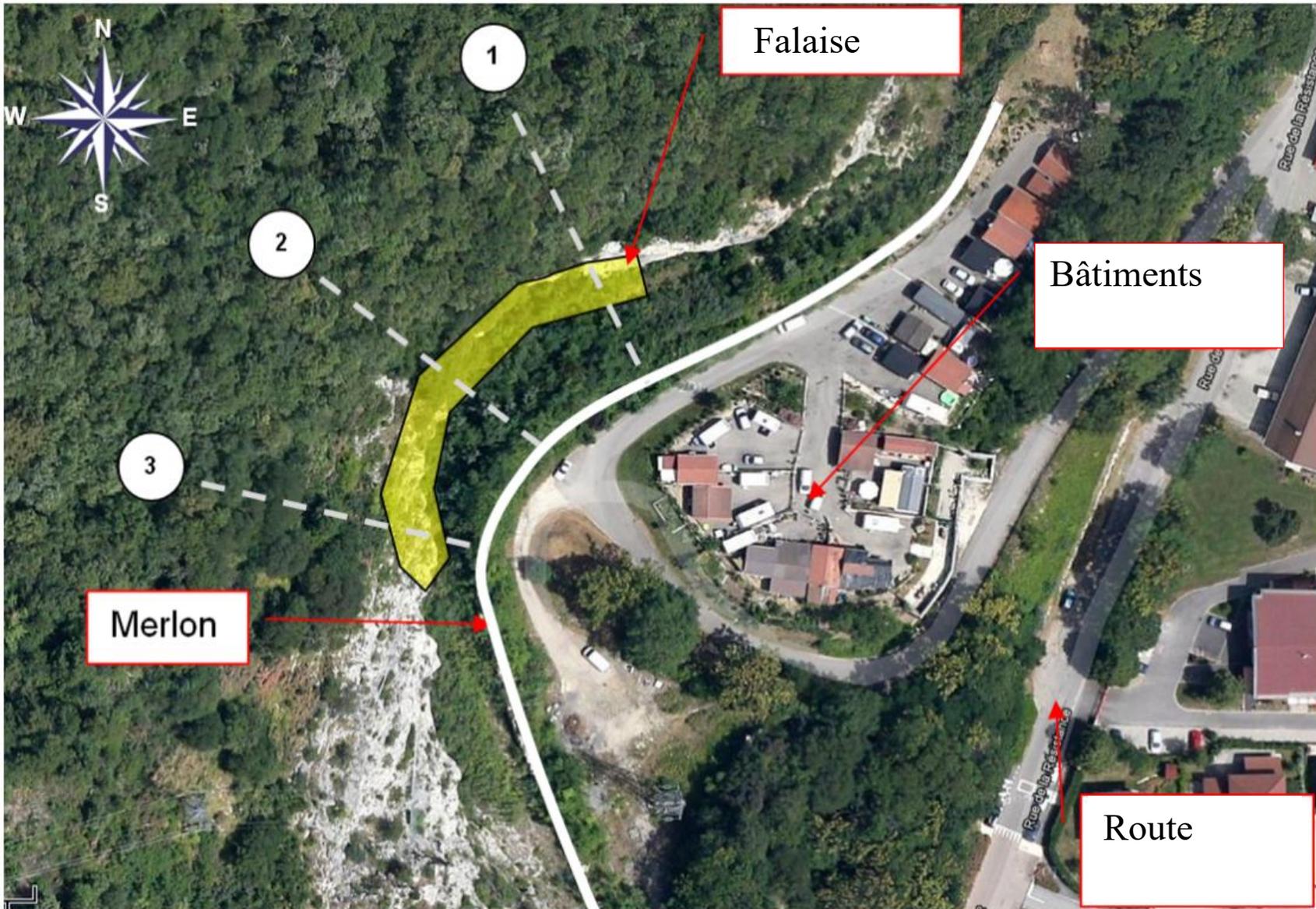
34/80



Efforts dynamiques aux fondations maximum 18 MN.

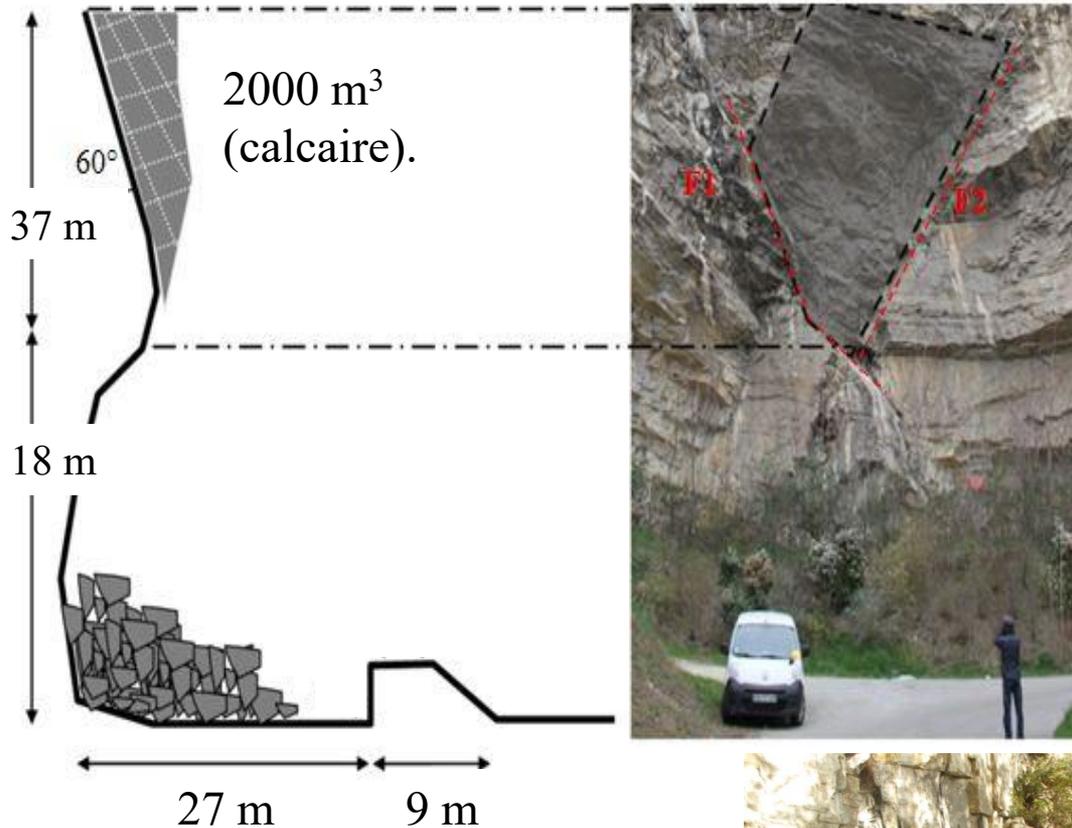
FALAISE DE PERRIERES - GRENOBLE

Perrières



Perrières

37/80



Paramètres de contact déduits sur le terrain et par expertise IMSRN.

$$\mu_{BB} \text{ et } \mu_{BS} = 0.7$$

$$e_n^2 \text{ Bloc-Sol} = 0.1 \text{ (calcaire)}$$

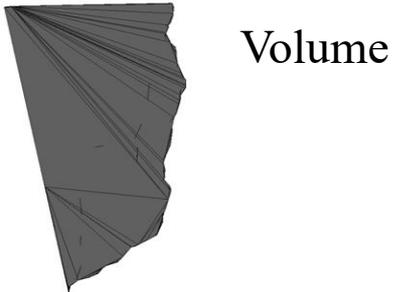
$$e_n^2 \text{ Bloc-Bloc} = 0.2$$



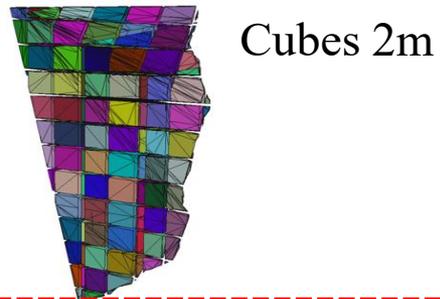
Blocométrie 1 m et 2 m

Discontinuité	Direction et pendage
F1	1°N/66°
F2	105°N/76°

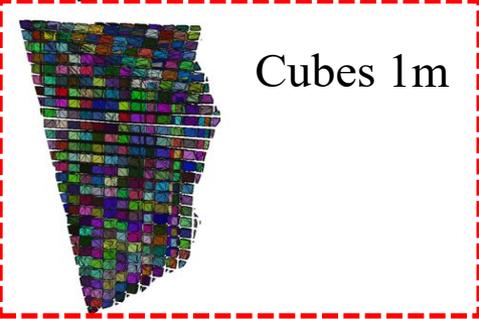
Perrières: configurations numériques analysées



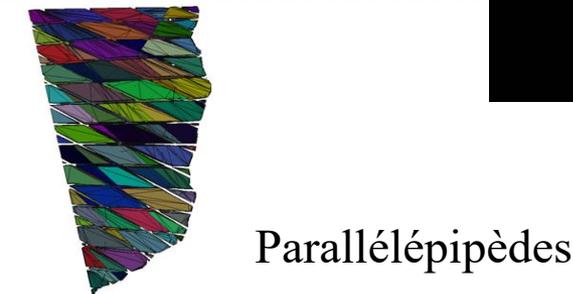
Volume



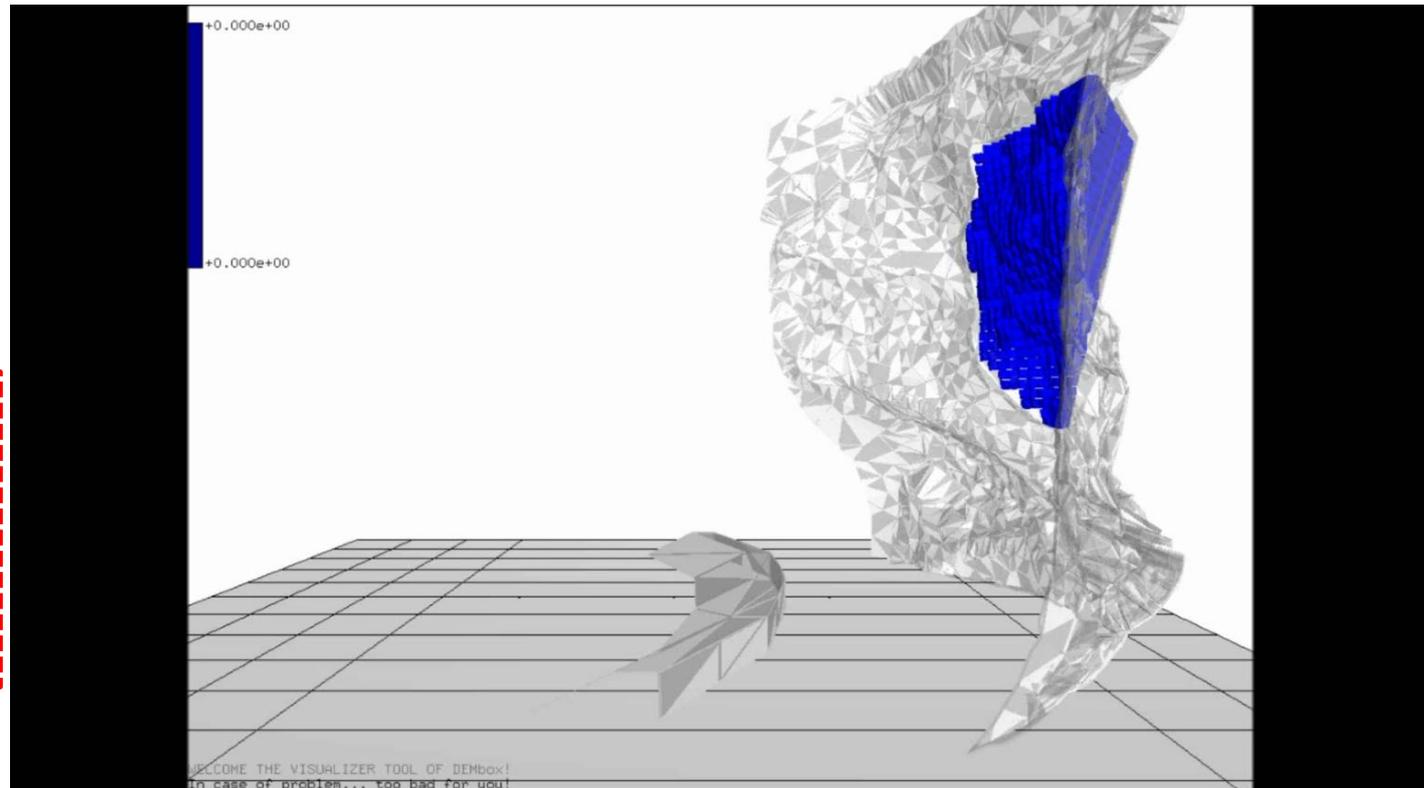
Cubes 2m



Cubes 1m



Parallélépipèdes

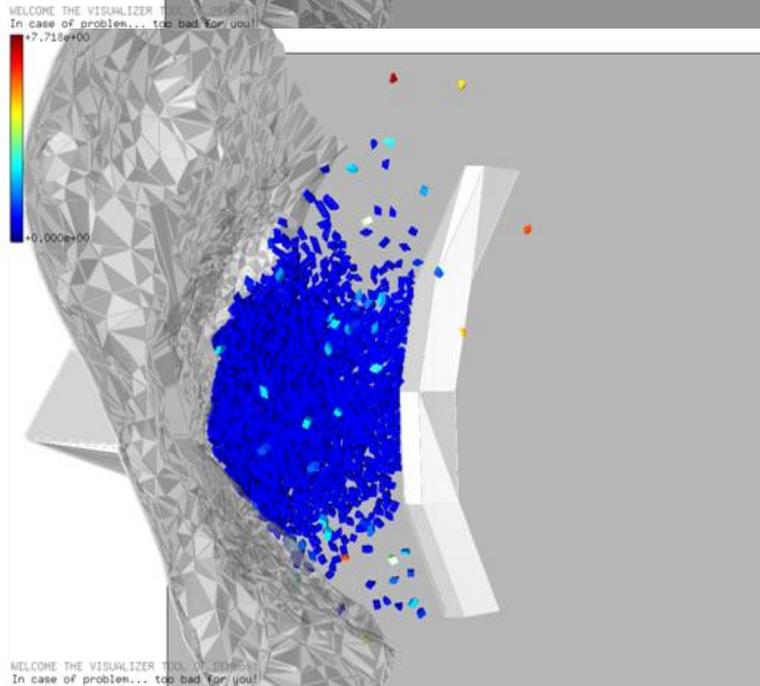
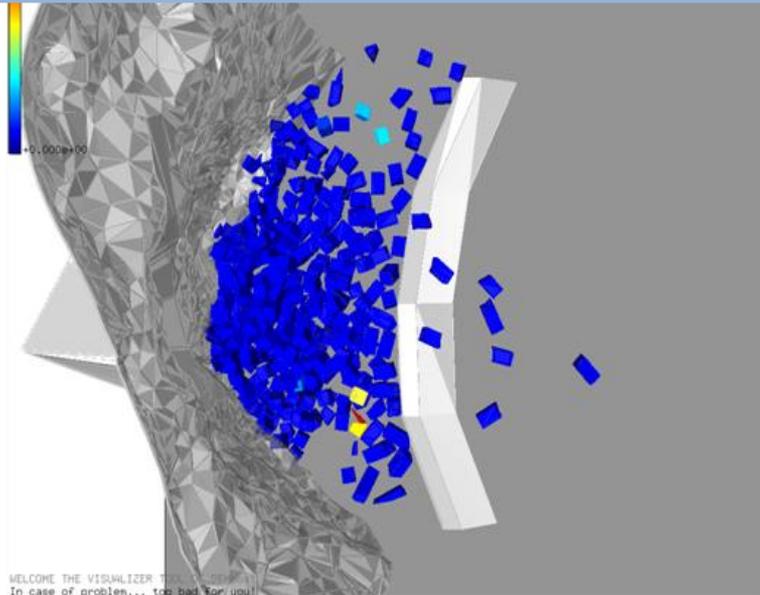


Perrières: configurations numériques analysées

39/80



Cubes 2m



Cubes 1m

Comblement de l'ouvrage directement proportionnel à la taille des blocs, pas seulement du volume total.

Étalement latéral pour toutes les configurations de l'ordre de 2.5 fois la largeur de la zone de départ.

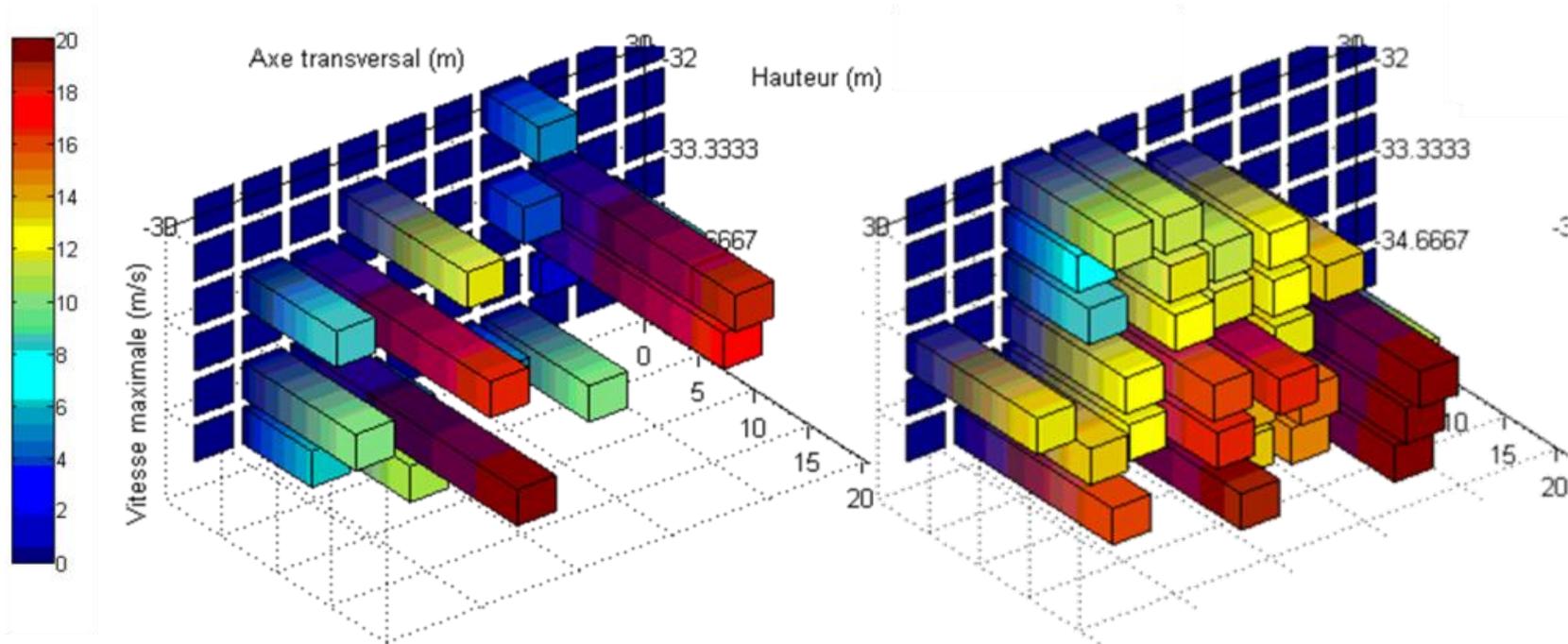
Perrières : Interaction éboulements en masse/merlon

40/80

Bloc 2m

Blocs 1 m

Vitesses (m/s)

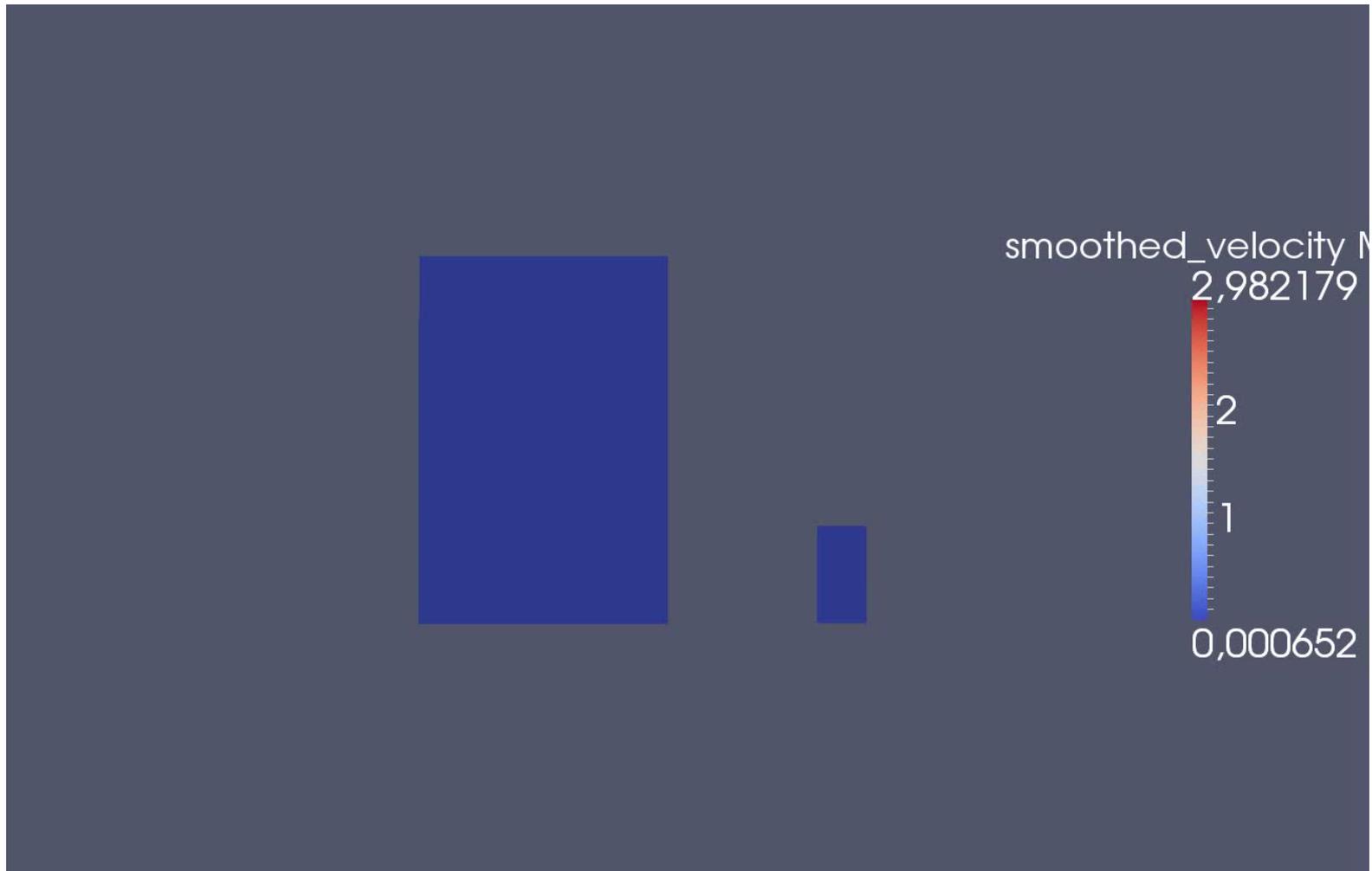


Magnitude des vitesses semblent indépendantes des formes (énergie fonction des masses).

Peu d'influence des impacts successifs sur la capacité de l'ouvrage.

4/4 Recherche & développement : modèles continus pour les coulées de boues

41/80



Méthode MPM. Thèse Fabio Gracia 2014 – 2017
3SR/IMSRN

4. Conclusions et travaux en cours

SDEC, logiciel « opérationnel » pour le dimensionnement des merlons en remblais renforcé.

Accès à des informations très précises à l'intérieur de l'ouvrage et bonne représentation des surfaces de rupture, Exemple : forces transmises aux fondations.

Possibilité de déduire l'influence d'impacts successifs en analysant la propagation des éboulements en masse (logiciel DEMBOX thèse Cuervo 2015).

Amélioration du caractère prédictif du modèle discret avec des applications différents (exemple : prise en compte de matrices cimentés pour les encochement)

Mise à point d'un modèle continu adapté aux problèmes de grandes déformations (thèse CIFRE IMSRN en cours pour les interactions coulées de boues + solides / ouvrages).

Projet C2ROP : benchmark logiciel + plusieurs test en vraie grandeur prévus !! Grande possibilité pour tester nos modèles et ceux des partenaires dans des situations bien maitrisées.

Merci de votre attention



Ingénierie des Mouvements
de Sol et des *Risques Naturels*

--

Stiven CUERVO
680 rue Aristide Bergès
38330 Montbonnot

fixe +33 (0) 476 52 90
port +33 (0) 649 41 58 37

stiven.cuervo@imsrn.com