



ASSISES 3^e édition RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

La Réunion 2023



**Analyser, expérimenter et modéliser les
mouvements de terrain de grande ampleur de La
Réunion**

12 octobre 2023 – Domaine Moca

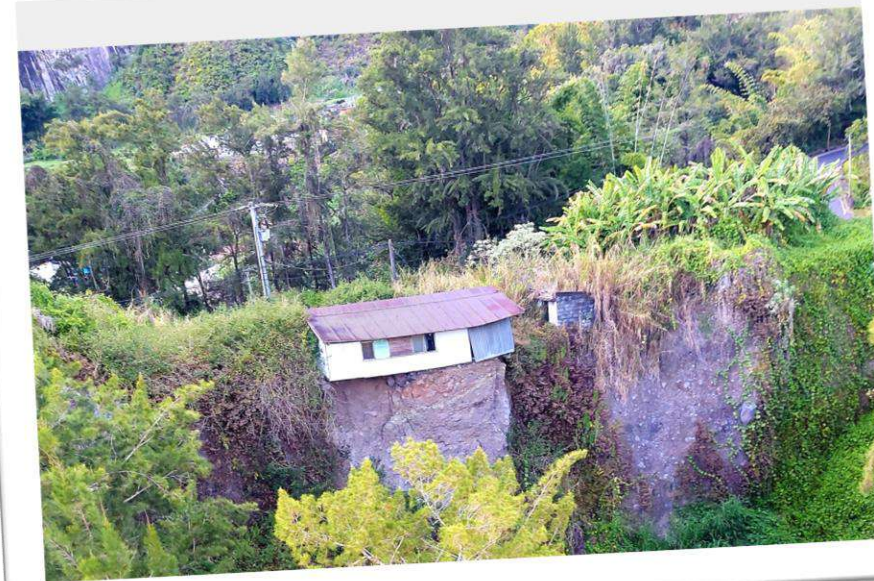
Aunay B., Rault C., Thiery Y., Chaput M., Reninger P. A., Michon L., Dewez T.J.B.



Un territoire marqué par les mouvements de terrain

- Phénomènes
 - Route de Salazie → coupures engendrées par des chutes de blocs ou des glissements de terrain
 - ✓ 15h – Piton des Experts
 - Secteurs en mouvement → désordres sur les infrastructures
 - Habitations et habitants exposés
- Prédiposition
 - Contexte géologique ⇔ formations déstructurées
 - Contexte géomorphologique ⇔ relief escarpé
 - Contexte pluviométrique

- Records mondiaux d'intensité de pluviométrie (hormis 48h – 2493 mm en Inde – 2489) - **Salazie**
 - **1140** - 1144 mm / 12h (Denise, 1966)
 - **3240** - 3930 mm / 72 h (Gamède, 2007)
 - 5678 mm / 10 jours (Hyacinthe, 1980)
 - **5242** mm / 12 jours (Hyacinthe, 1980)
 - 6083 mm / 15 jours (Hyacinthe, 1980)





Comment les terrains glissent ?

- Détection et suivi des glissements de terrain
- Glissements lents / rapides



Pourquoi les terrains glissent ?

- Fonctionnement – Cas particulier des déboulés



Solutions mises en œuvre / imaginées

ASSISES RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

3^e édition

La Réunion 2023



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité



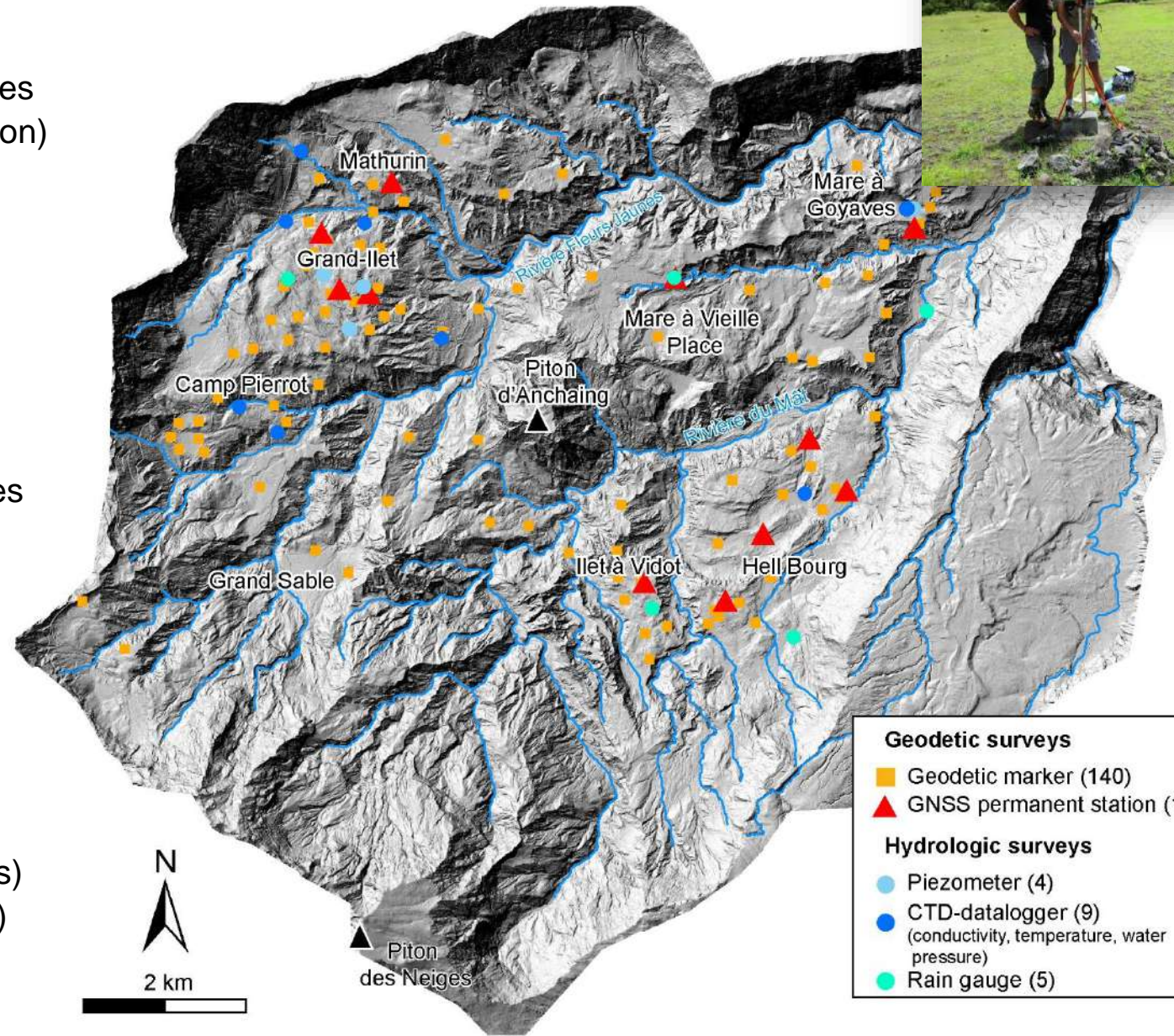
Géosciences pour une Terre durable

brgm

Détection et suivi des glissements de terrain

Suivi des déplacements des terrains

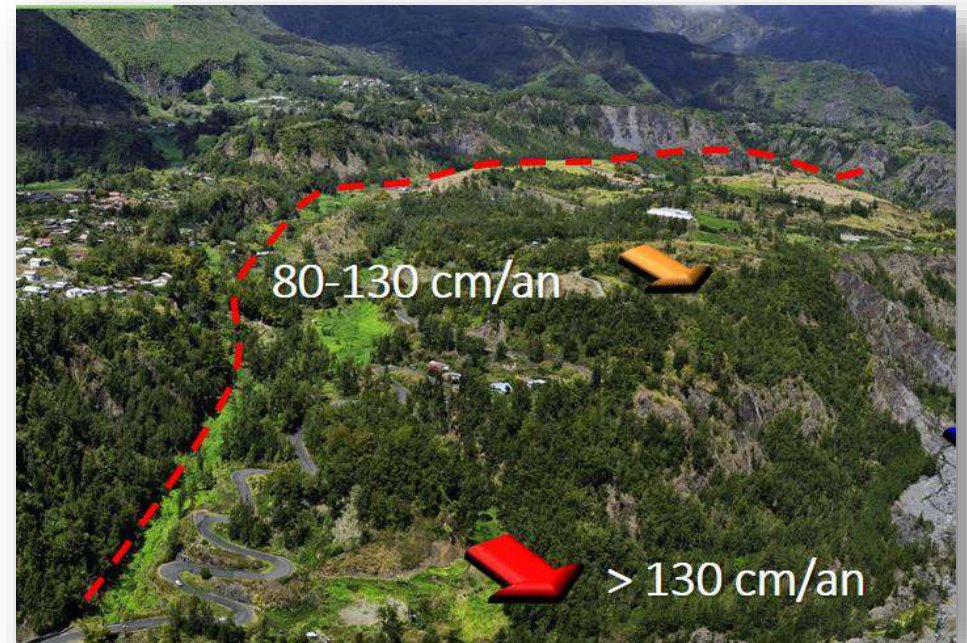
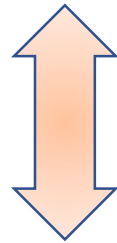
- **Suivi par GNSS**, initié en 2003
 - Précision centimétrique
 - Suivi spatial annuel → 140 bornes géodésiques
 - Suivi continu → 10 GNSS (GPS haute précision)
 - ✓ 2 GNSS en 2004
 - ✓ 1 MAG, 4 HB+FDRP, 1 IAVI, 3 GI, 1 IAVI
- **Suivi par modèle numérique de surface / terrain**
 - LiDAR
 - ✓ Résolution 50 cm
 - ✓ Levés 2015 (Région), 2019 & 2021
 - ✓ Déplacement + évolution de morphologies
 - Photographies historiques anciennes
 - ✓ Résolution métrique
 - ✓ 1950 → 2011
- Image Satellite Radar
- Suivi hydrométrique
 - 4 piézomètres (niveaux des eaux souterraines)
 - 9 stations hydrométriques (mares ou sources)



Deux dimensions temporelles

Glissements lents
Tout l'îlet se déplace de manière « continue »

Glissements rapides / catastrophiques
Glissements localisés et instantanés



ASSISES RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

3^e édition

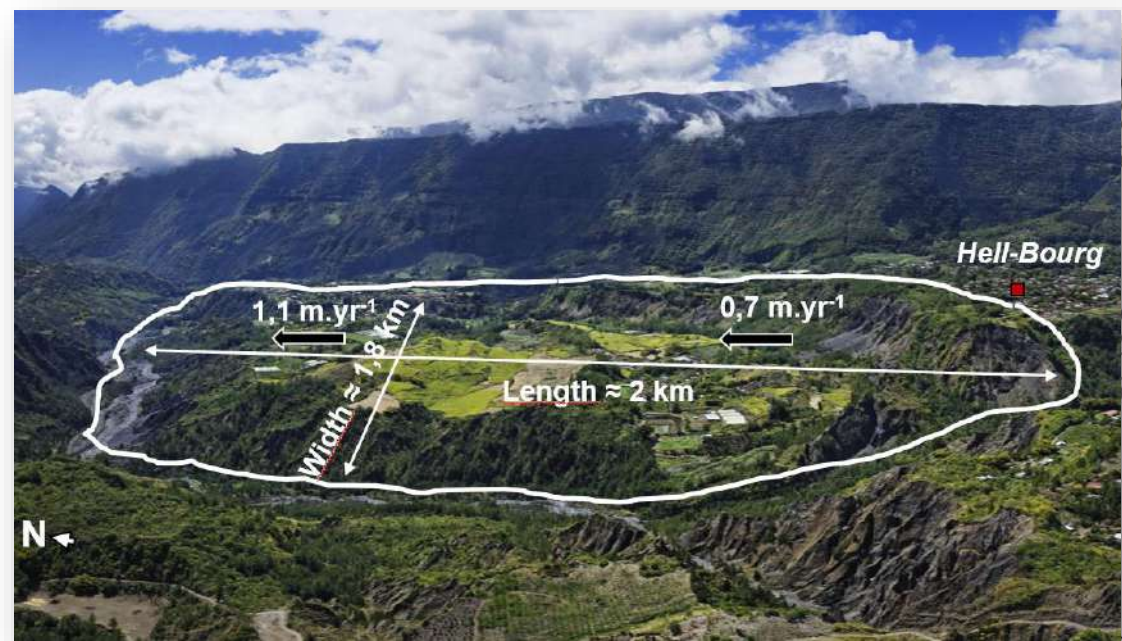
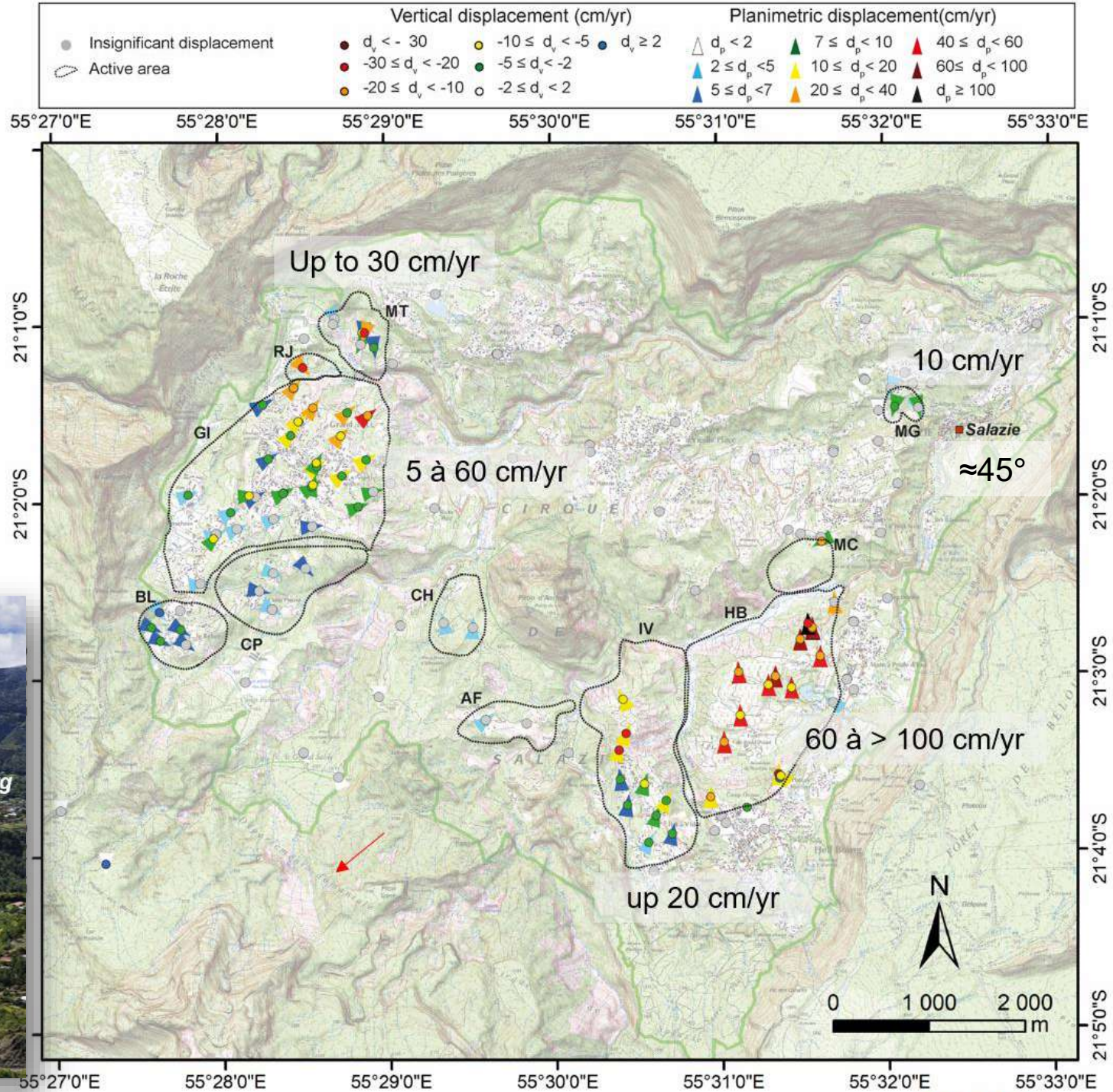
La Réunion 2023



Détection et suivi des glissements de terrain Glissements lents

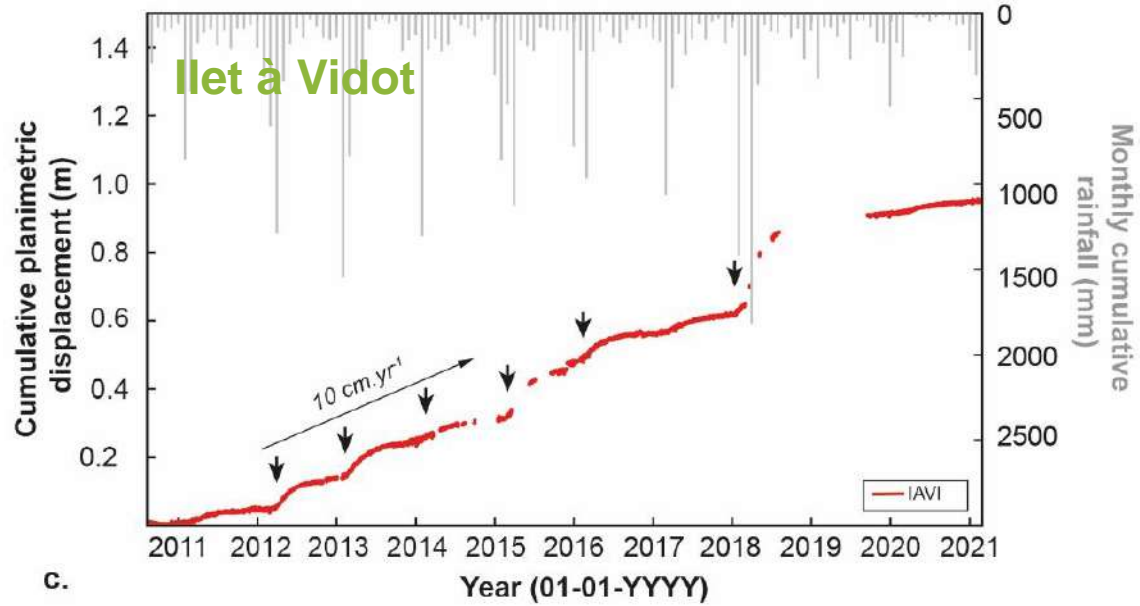
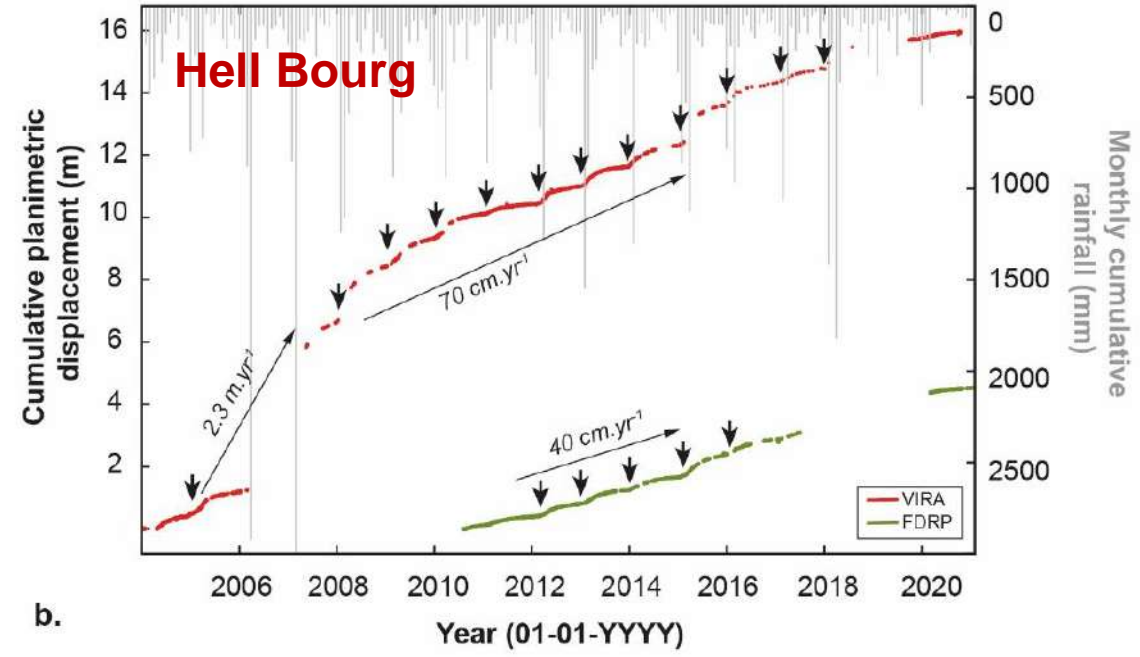
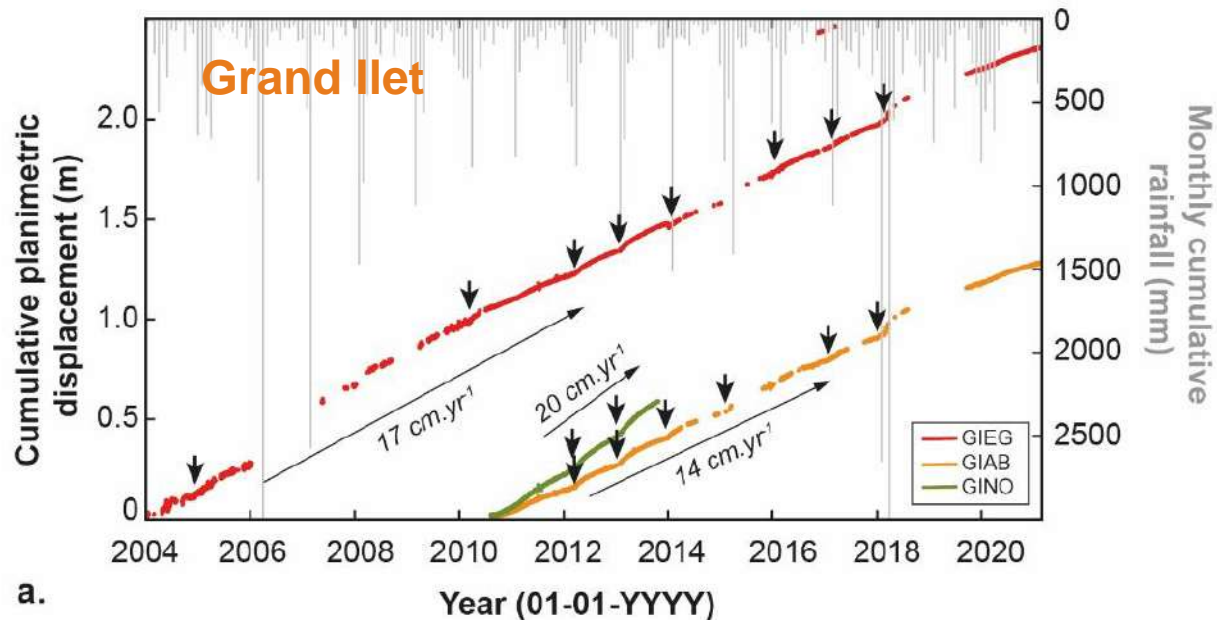
Localisation des glissements lents

- Surface \rightarrow 0,2 à 2,8 km²
- Pente \rightarrow 10° à 45°
- Volume \rightarrow jusqu'à 225 Mm³
- Vitesse moyenne : 5 cm/an à 1,15 m/an



Dynamique des glissements lents

- Déplacements continus des terrains
 - Pas d'arrêt du déplacement
 - Accélération après les pluies cycloniques
 - Ralentissement en saison sèche
- Réponse bimodale
 - Rapide (2-3 jours) \leftrightarrow recharge de l'aquifère
 - Lente (2-3 mois) \leftrightarrow tarissement de l'aquifère
 - Présente de fissures ouvertes \rightarrow drainage rapide des eaux de surface vers les eaux souterraines
 - ✓ Grand-Ilet \leftrightarrow 27% de BV sans exutoire
 - ✓ Modélisation réalisée dans le cadre de MvTerre-2



Quadrillage décamétrique
Fond orthophoto 2012 (IGN)
Batiments et route : BD-Topo2003



ASSISES RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

3^e édition

La Réunion 2023


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



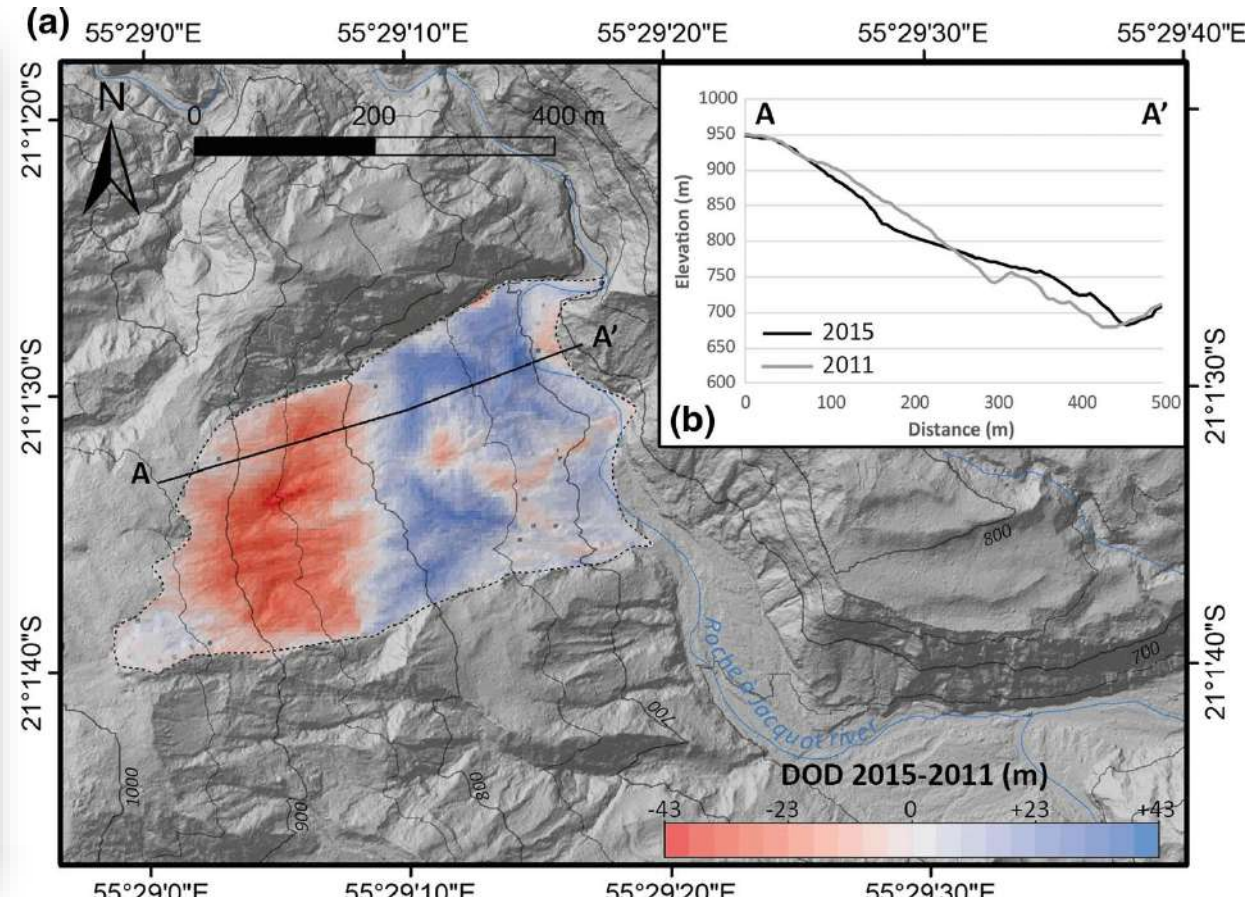
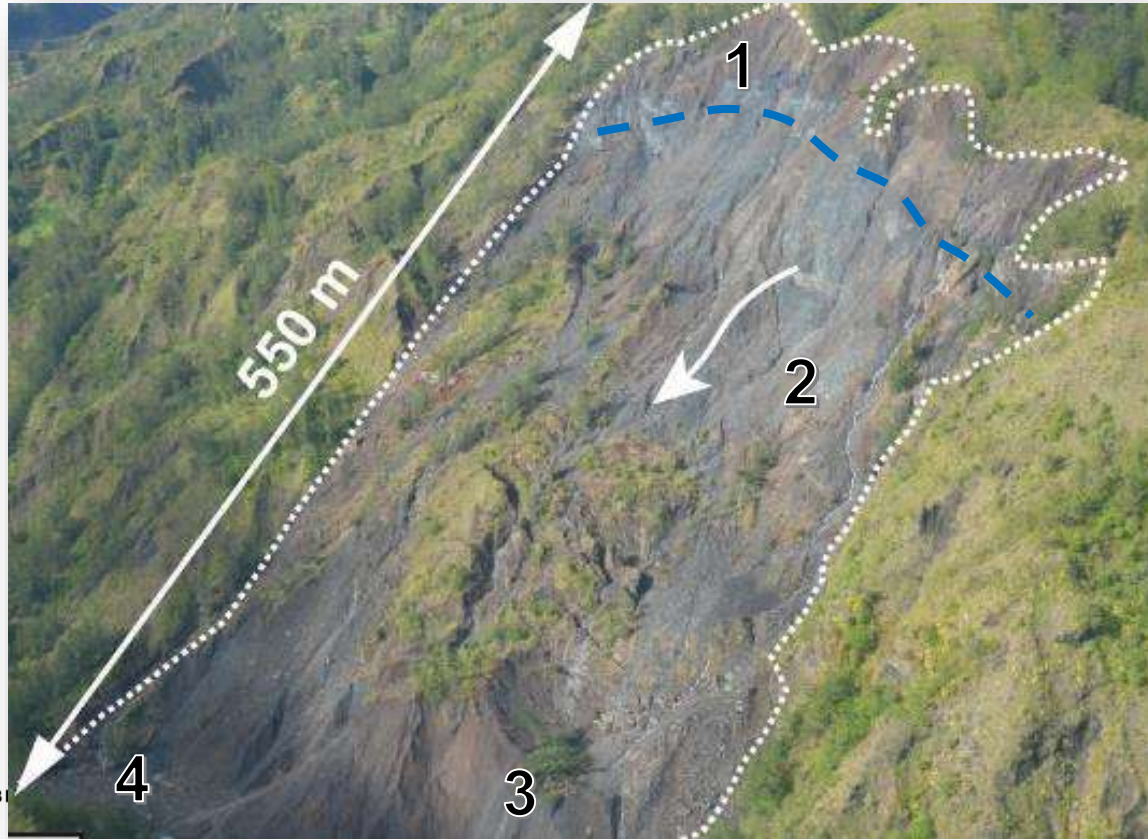
Géosciences pour une Terre durable

brgm

Détection et suivi des glissements de terrain Glissements rapides / catastrophiques

Glissements rapides – Ravine Roche à Jacquot

- Flanc Est du plateau de Grand-Ilet
- 1 Mm³ éboulé pendant le cyclone Bejisa (Janvier, 2014)
 - Phénomène instantané
- En relation avec le glissement lent de Grand-Ilet (225 Mm³)
- Comparaison des MNT (2015 vs. 2011)
 - Dépression / accumulation d'une épaisseur de 50 m de matériaux



ASSISES RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

3^e édition

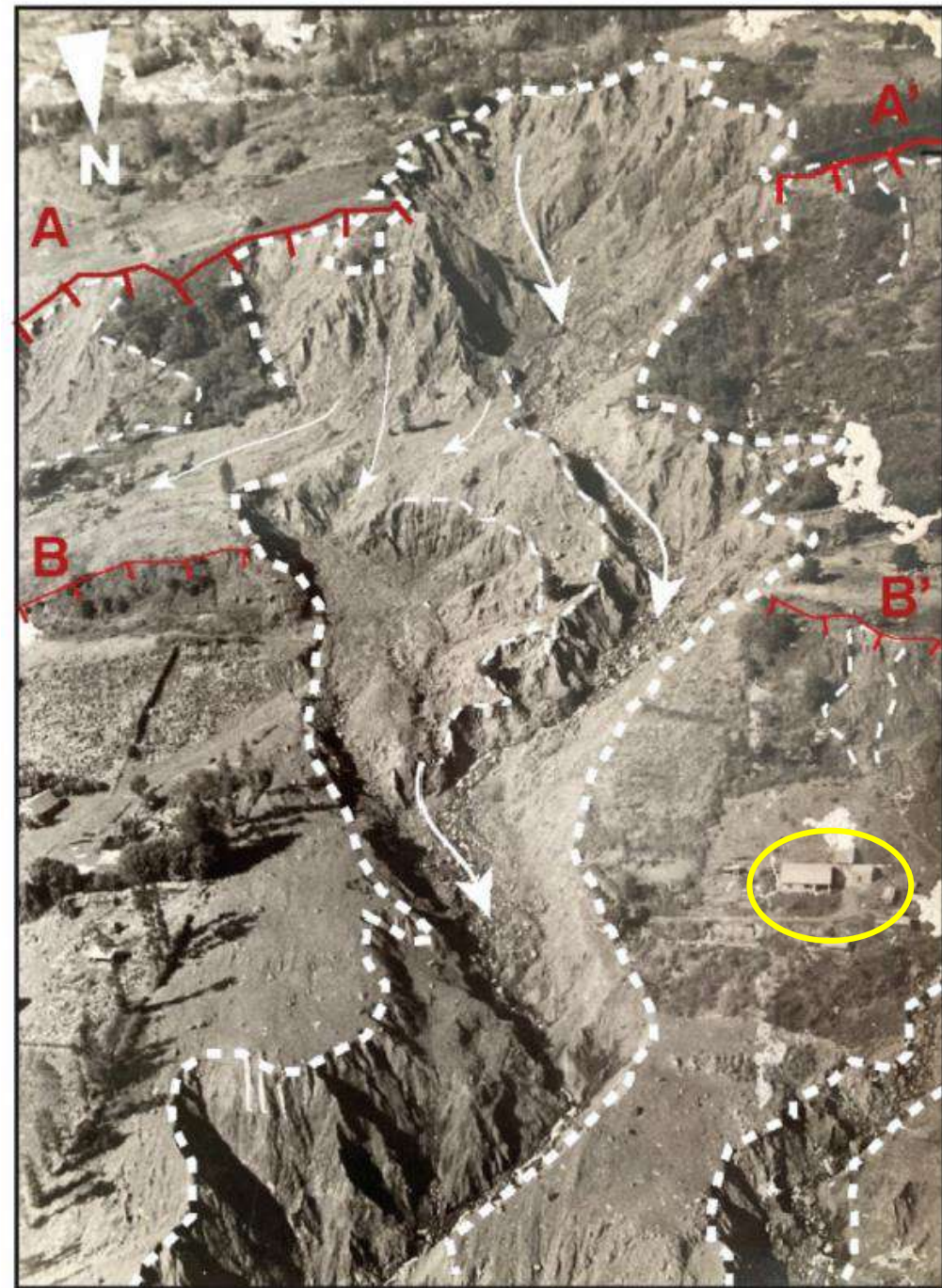
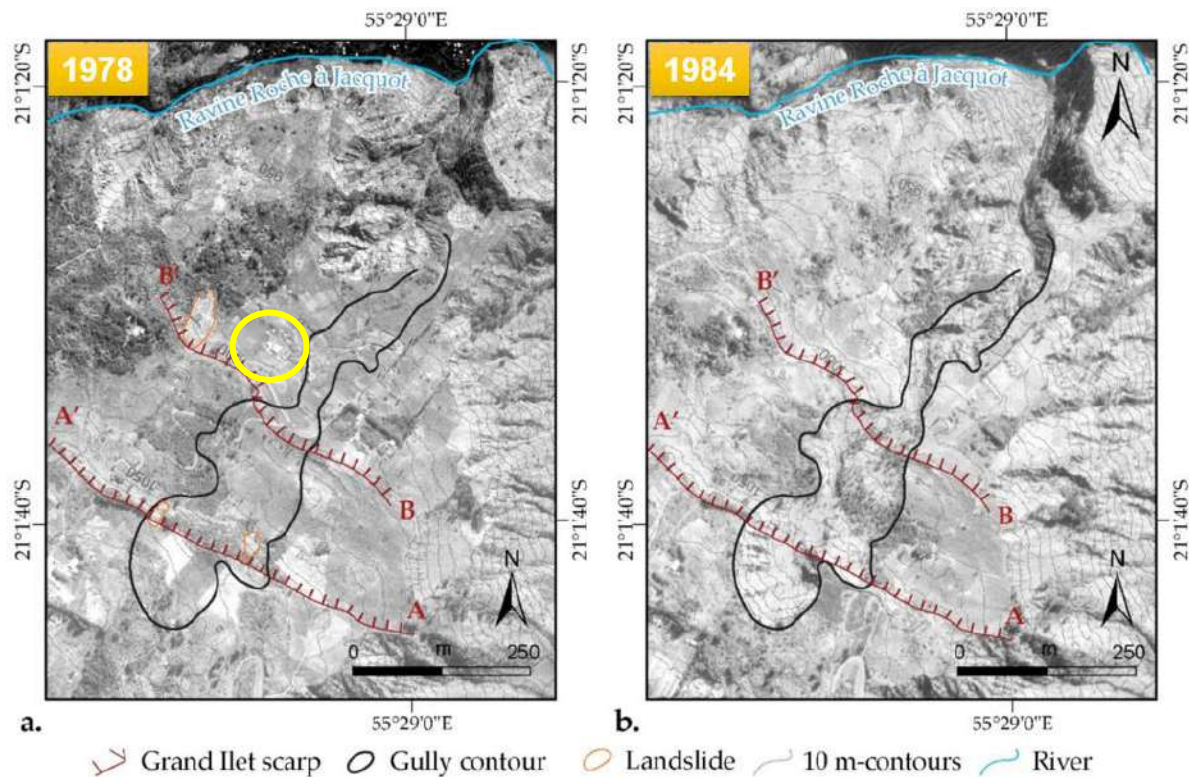
La Réunion 2023



Détection et suivi des glissements de terrain Fonctionnement du cas particulier des déboûlés

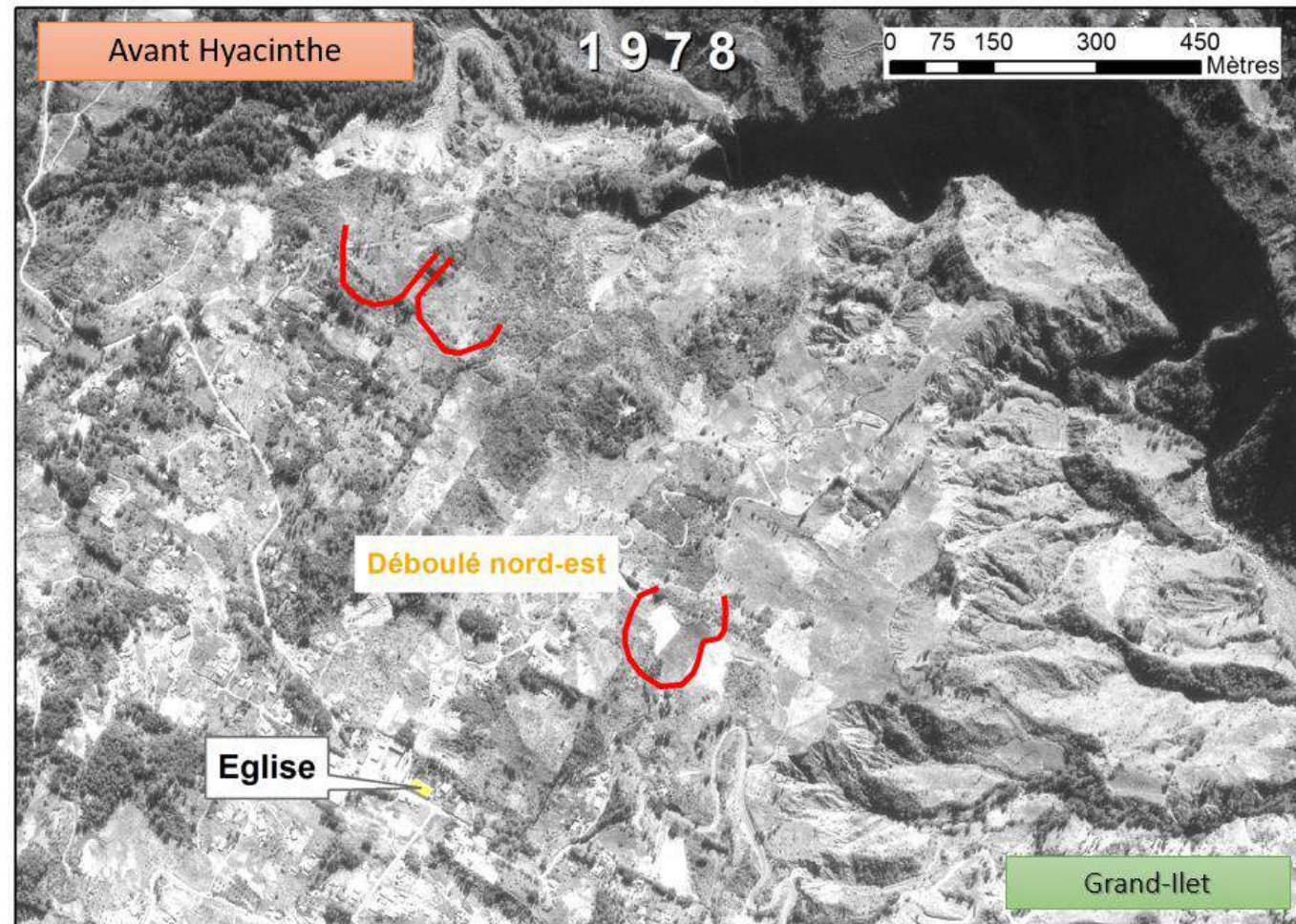
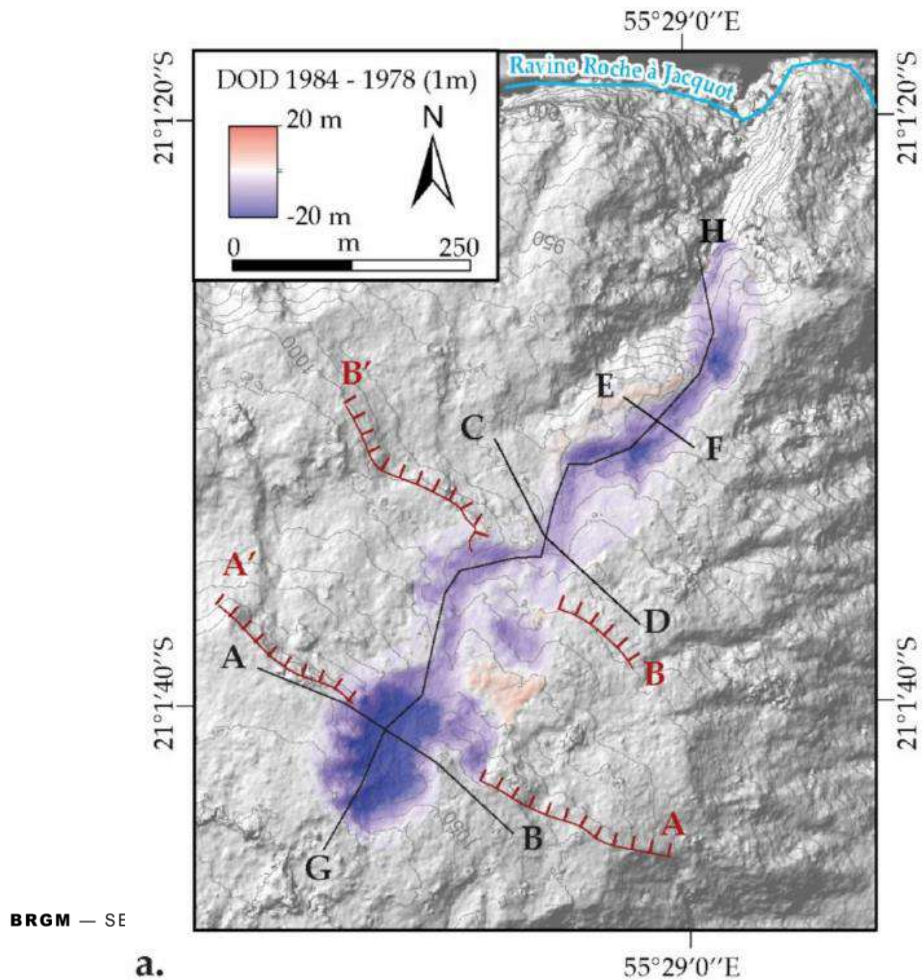
Reconstituer un événement qui s'est produit il y a plus de 40 ans ? ... avant que le secteur n'ait été étudié / instrumenté

- Déboulés de Grand-Ilet
- Différence de MNS reconstitués à partir de photo aériennes historiques
 - Topographie avant et après le cyclone Hyacinthe (1978 / 1984)
 - <https://remonterletemps.ign.fr/>



Reconstituer un événement qui s'est produit il y a plus de 40 ans ?

- **Topographie historique**
- Différence de MNS (1m de résolution)
- 79 000 m²
- Volume \approx 630 000 m³
- 700 m de long
- Entre 40 et 120 m de large
- 20 m de profondeur

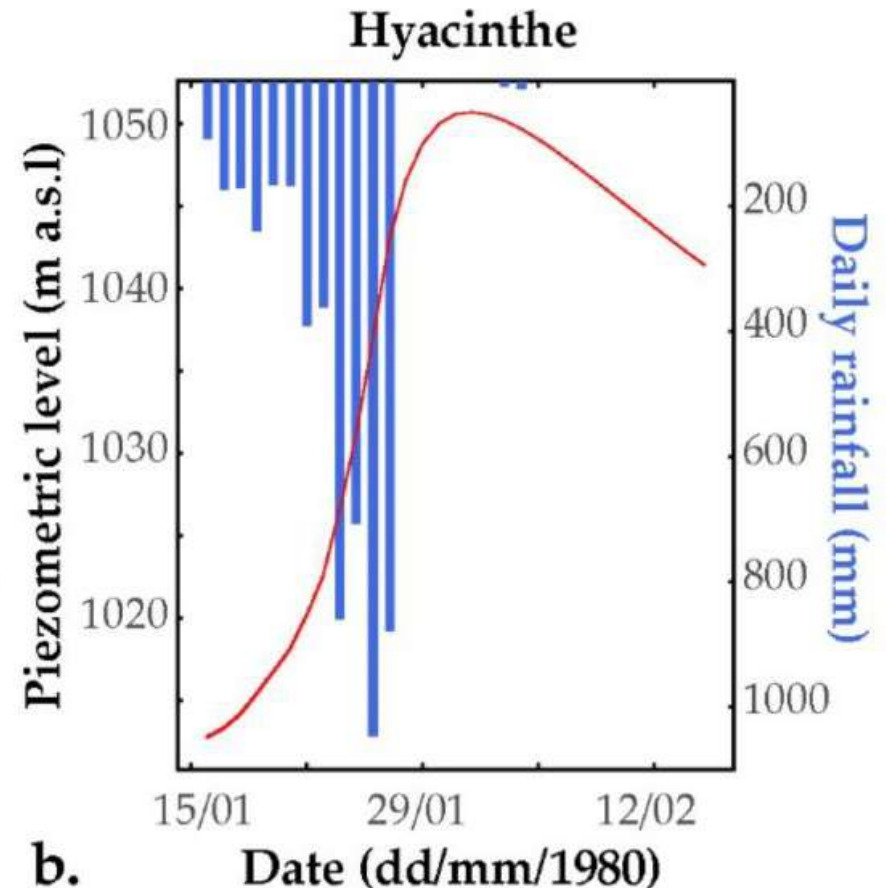
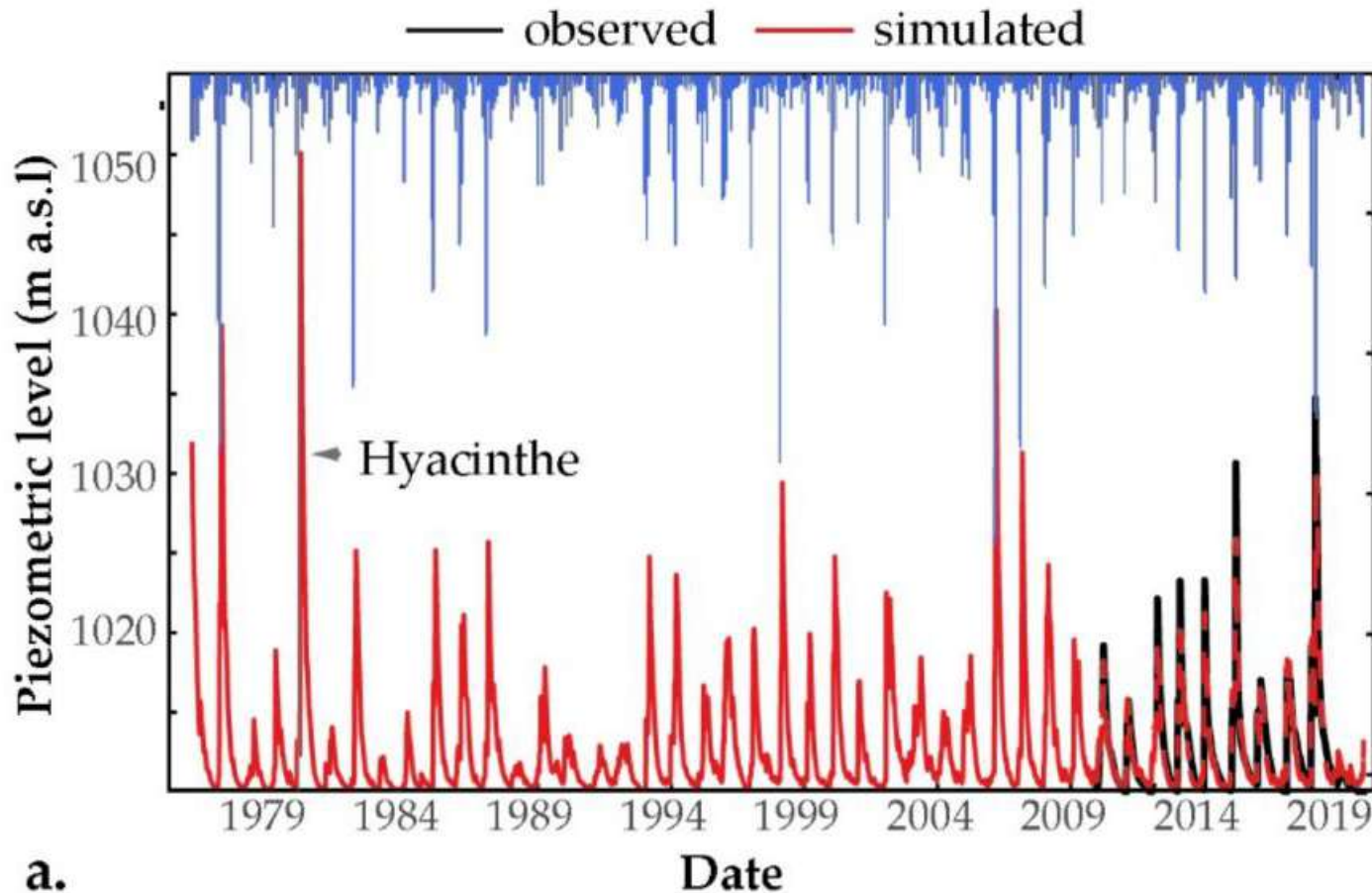


Reconstituer un événement qui s'est produit il y a plus de 40 ans ?

- **Niveau historique des eaux souterraines**

- Calibration 2010 – 2022 (Nash = 0.959)
- Retro-simulation sur 1978-2009

- Niveau d'eau pre-Hyacinthe → 1014 m
- Niveau d'eau max. → 1050 m
- Augmentation de 36 m de la charge hydraulique en 13 jours

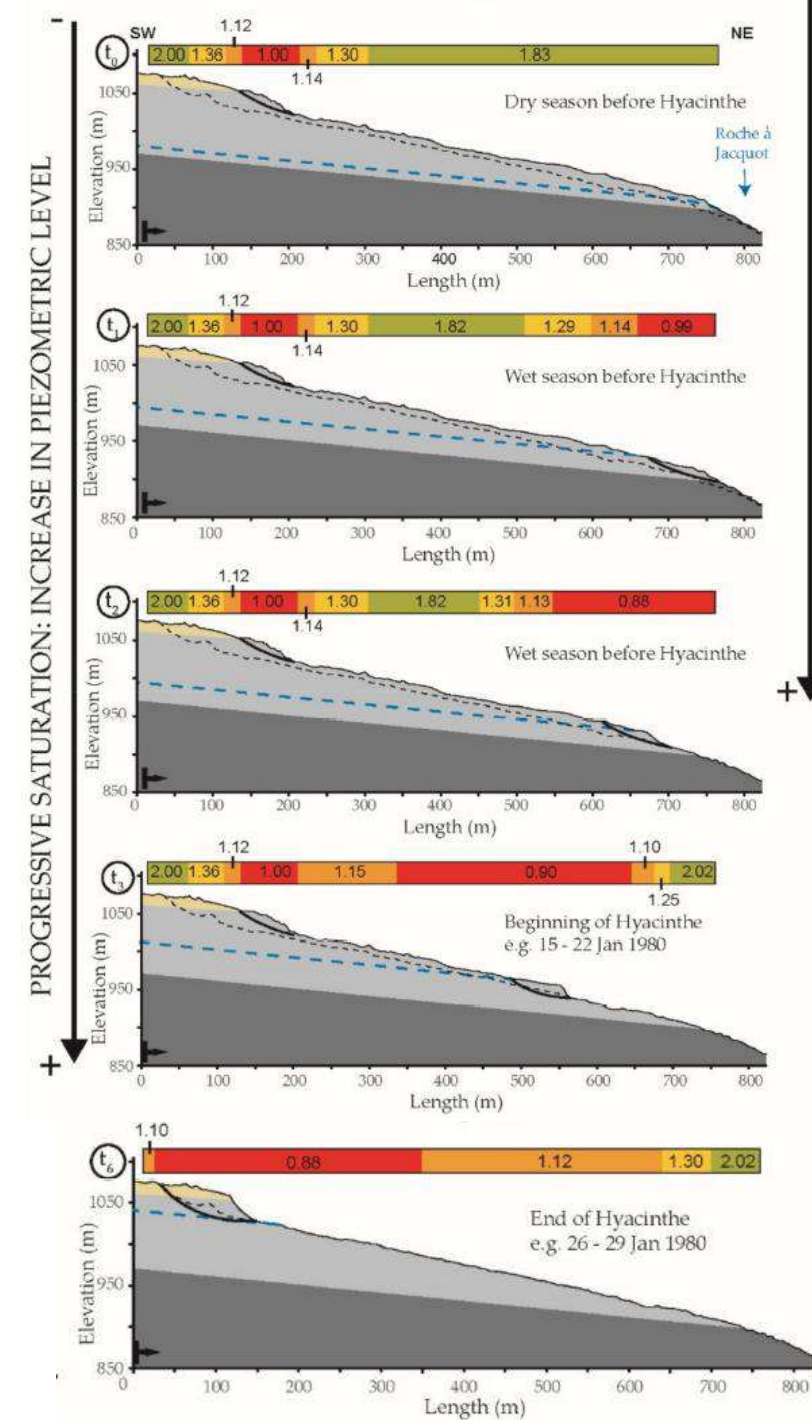


Reconstituer un événement qui s'est produit il y a plus de 40 ans ?



Augmentation de la piézométrie \Leftrightarrow augmentation de la pression de pore \Leftrightarrow baisse de la contrainte de cisaillement

- Hypothèse à tester
 - Augmentation de la piézométrie \Leftrightarrow déstabilisation des terrains
- Analyse rétrospective de la stabilité des terrains
 - Calcul à la rupture (limite d'équilibre)
 - Coefficient de sécurité (FoS)
- Données d'entrée
 - Topographie initiale + conditions hydrogéologiques
 - Poids volumique (γ_d), cohésion effective (C') et angle de frottement effectif (Φ')
- Approche itérative avec topographie évolutive (7 modélisations)
- Déboulés \Leftrightarrow effondrements régressifs successifs \Leftrightarrow augmentation piézométrique



ASSISES RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

3^e édition

La Réunion 2023


RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*

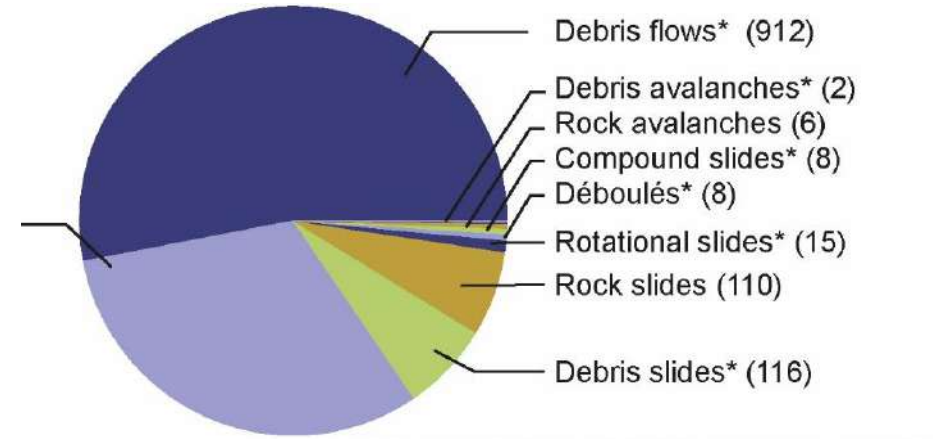
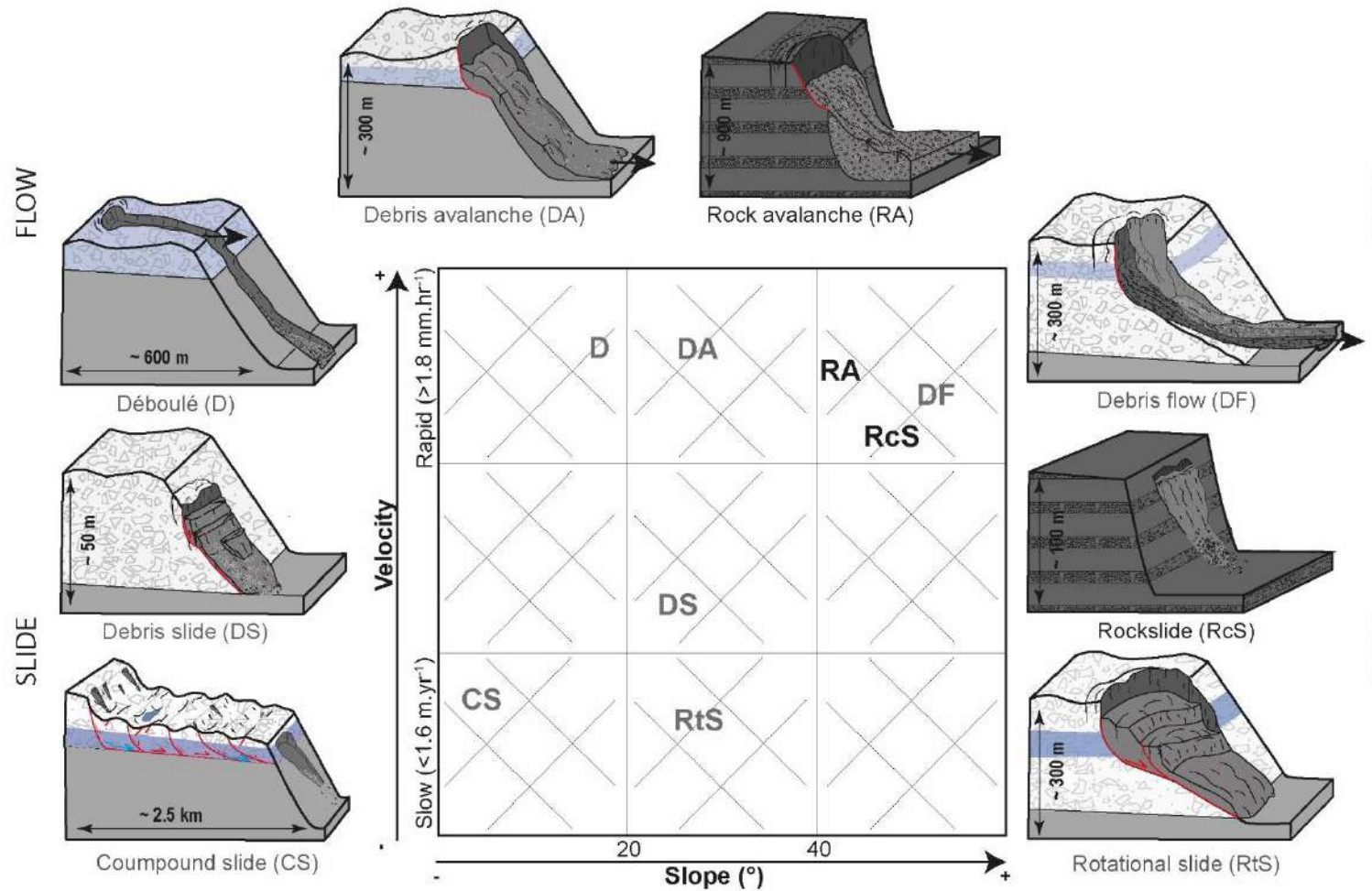


Géosciences pour une Terre durable

brgm

Typologie des mouvements de terrain de grande ampleur

Nouvelle typologie des glissements en milieu volcanique



*involving debris from old debris-avalanche deposits

Criteria used for differentiation

- **Mechanism** - Slide or flow
- **Material**
 - Debris : epiclastics
 - Rock : lava flow
- **Slope** - Gentle to steep
- **Velocity** - Slow and rapid
- **Volume** - Small to large
- **Water content** - Degree of saturation
- <https://doi.org/10.1029/2021JF006257>

Legend of sketches

Material

- Debris (from old epiclastic deposits)
- Substratum (consolidated epiclastic deposits, volcanic rock)
- Debris (from the landslide)
- Volcanic rock (lava flow)

Hydrogeology

- Saturation

Displacement

- Long run-out ($H/L \ll 1$)

Structure

- Failure surface

Legend of the center chart

Material

- AA Debris (from old epiclastic deposits)
- AA Rock

JGR Earth Surface

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2021JF006257

Key Points:

- The high density and diversity of landslide processes observed in the Cirque de Salazie make it an ideal

Landslide Processes Involved in Volcano Dismantling From Past to Present: The Remarkable Open-Air Laboratory of the Cirque de Salazie (Reunion Island)

C. Rault¹, Y. Thiery², M. Chaput¹, P. A. Reninger², T. J. B. Dewez², L. Michon^{3,4}, K. Samyn¹, and B. Aunay¹

ASSISES RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

3^e édition

La Réunion 2023



Quelles solutions pour ralentir le glissement de terrain de Grand-Ilet ?

Aunay B., Huber E., Badoux V.

GEOTEST

GÉOLOGIE / INGÉNIERIE /
GÉOPHYSIQUE /
ENVIRONNEMENT

Constat

- Les eaux souterraines sont le moteur du glissement de terrain de Grand-Ilet
- 225 Mm³ (500 à 600 millions de tonnes de matériaux) ≠ pas de solution géotechnique identifiée







Ralentir le glissement ⇔ Agir sur les souterraines

- Eviter l'infiltration des eaux souterraines (zone rurale ≠ imperméabilisation)
- Drainer les eaux souterraines



Evaluer l'effet du drainage sur le niveau des eaux souterraines

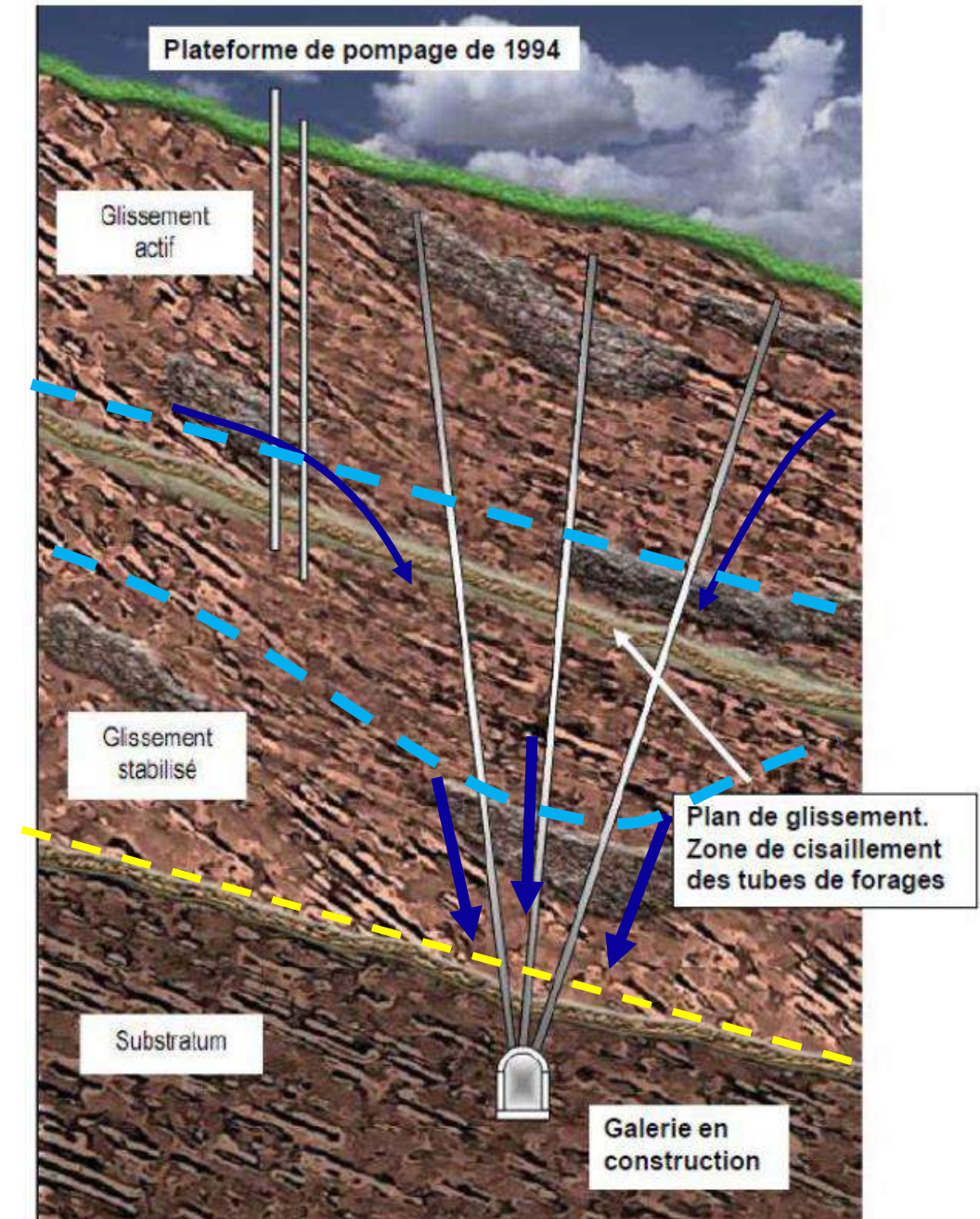
Drainage des eaux souterraines dans les glissements de terrain

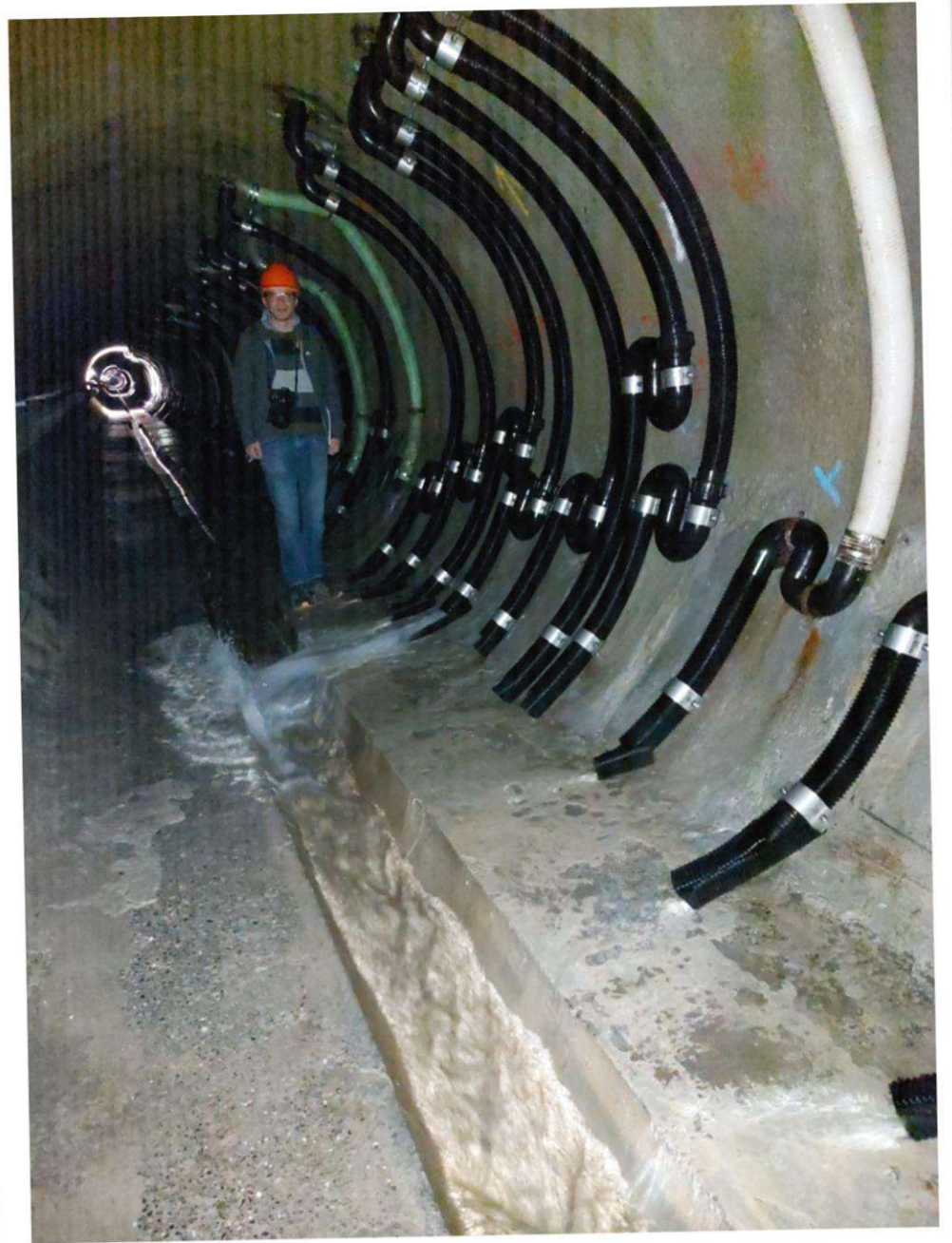
- Exemples de galeries drainantes en Suisse
 - Glissement de la Frasse
 - Glissement de Beckenried
 - Exemple d'une galerie drainante en Chine
 - Climat subtropical sous influence de la mousson
-  Observations → réduction significative des mouvements de terrain
- 20 cm/an à quelques cm/an
-  Augmentation du facteur de sécurité (calcul)
-  Entretien des galeries / entretien du réseau de drainage
-  Travaux de modélisation préliminaire



Principe théorique

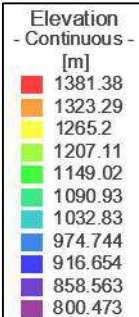
- Réalisation d'une galerie sub-horizontale dans la partie stable du glissement
- Réalisation de drains subverticaux depuis la galerie, vers la zone active du glissement de terrain
- Pour le cas de Grand-Ilet
 - Sources pérennes + suivi piézométrique
 - ✓ Présence d'un aquifère continu
 - ✓ Puissance décimétrique de l'aquifère



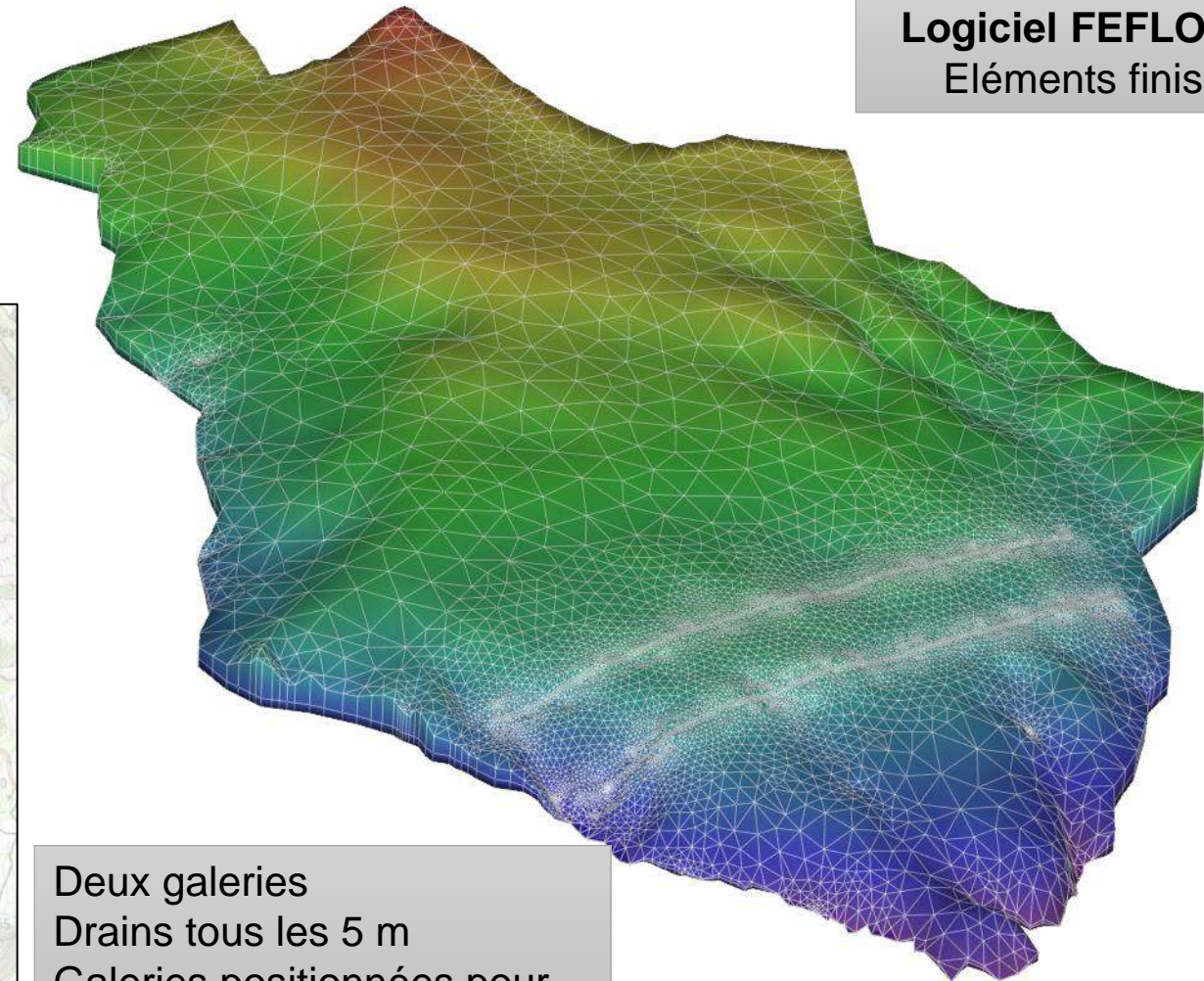


Modélisation hydrogéologique de l'effet d'une galerie

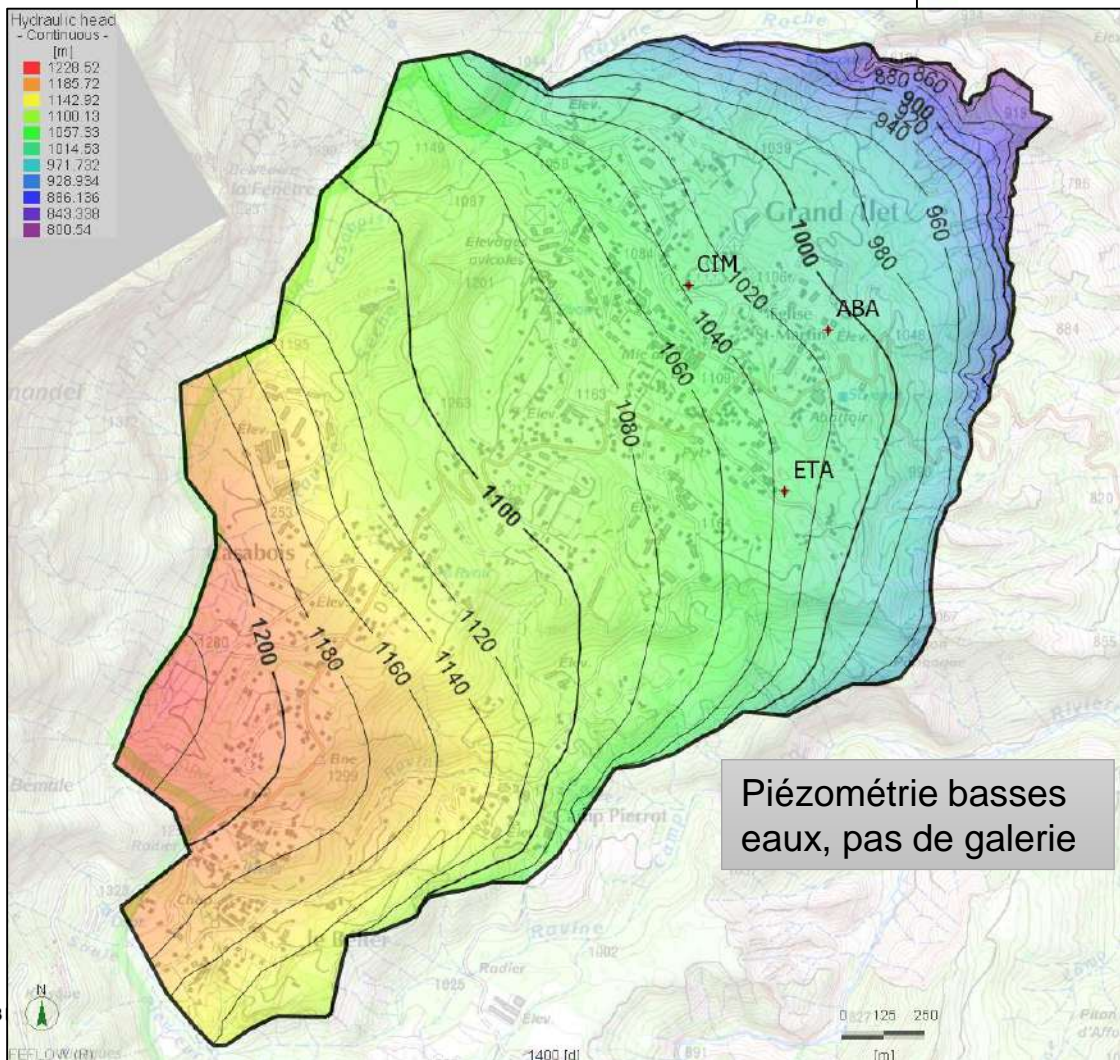
- Modélisation déterministe
- Géométrie de l'aquifère
- Maillage 3D



Logiciel FEFLOW
Éléments finis



Deux galeries
Drains tous les 5 m
Galeries positionnées pour un creusement depuis la RD

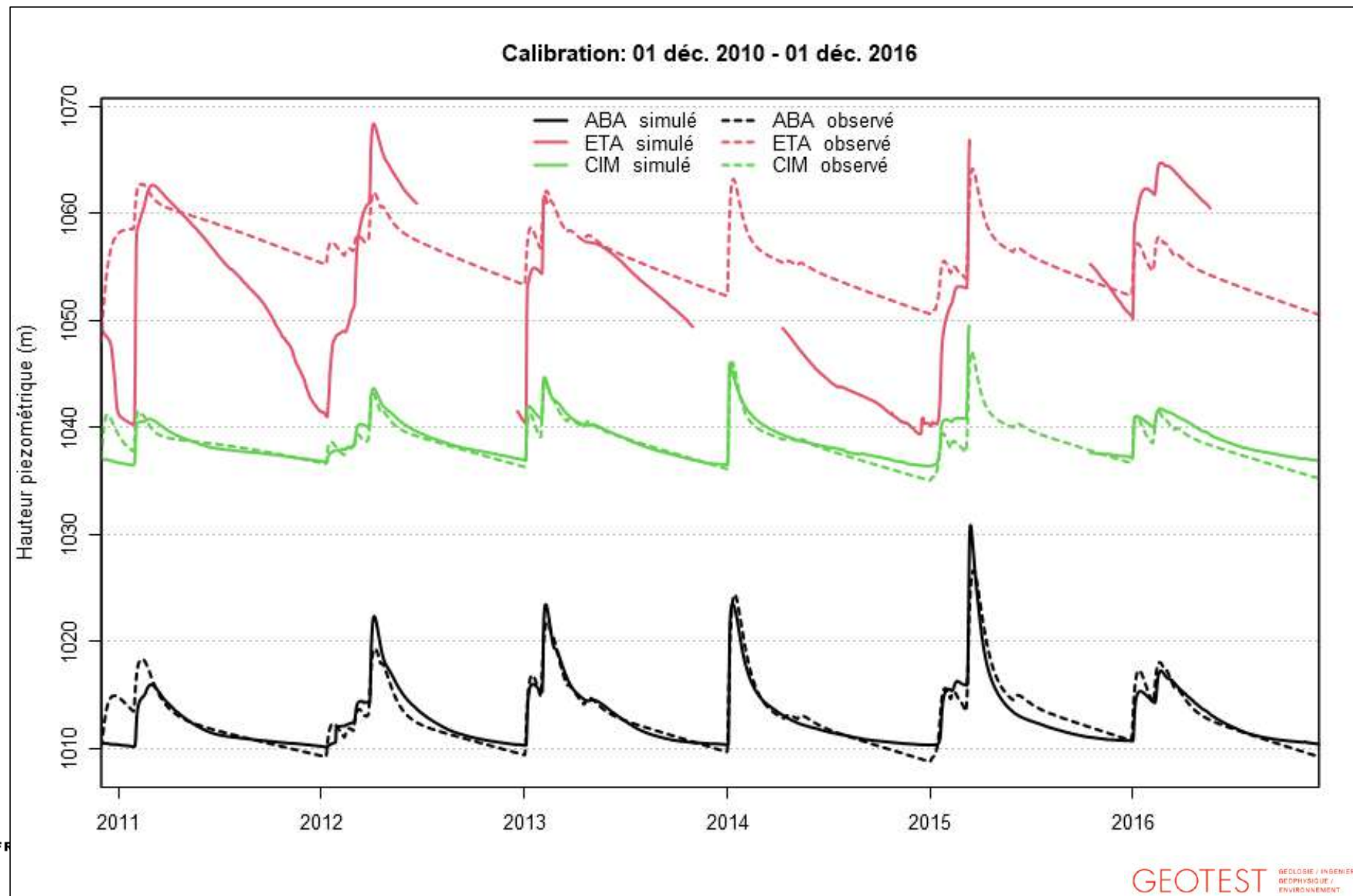


Piézométrie basses eaux, pas de galerie

- Pluviométrie
- Observations sur les 3 piézomètres et le débit des sources
- Perméabilité (K)
- Emmagasinement (S)

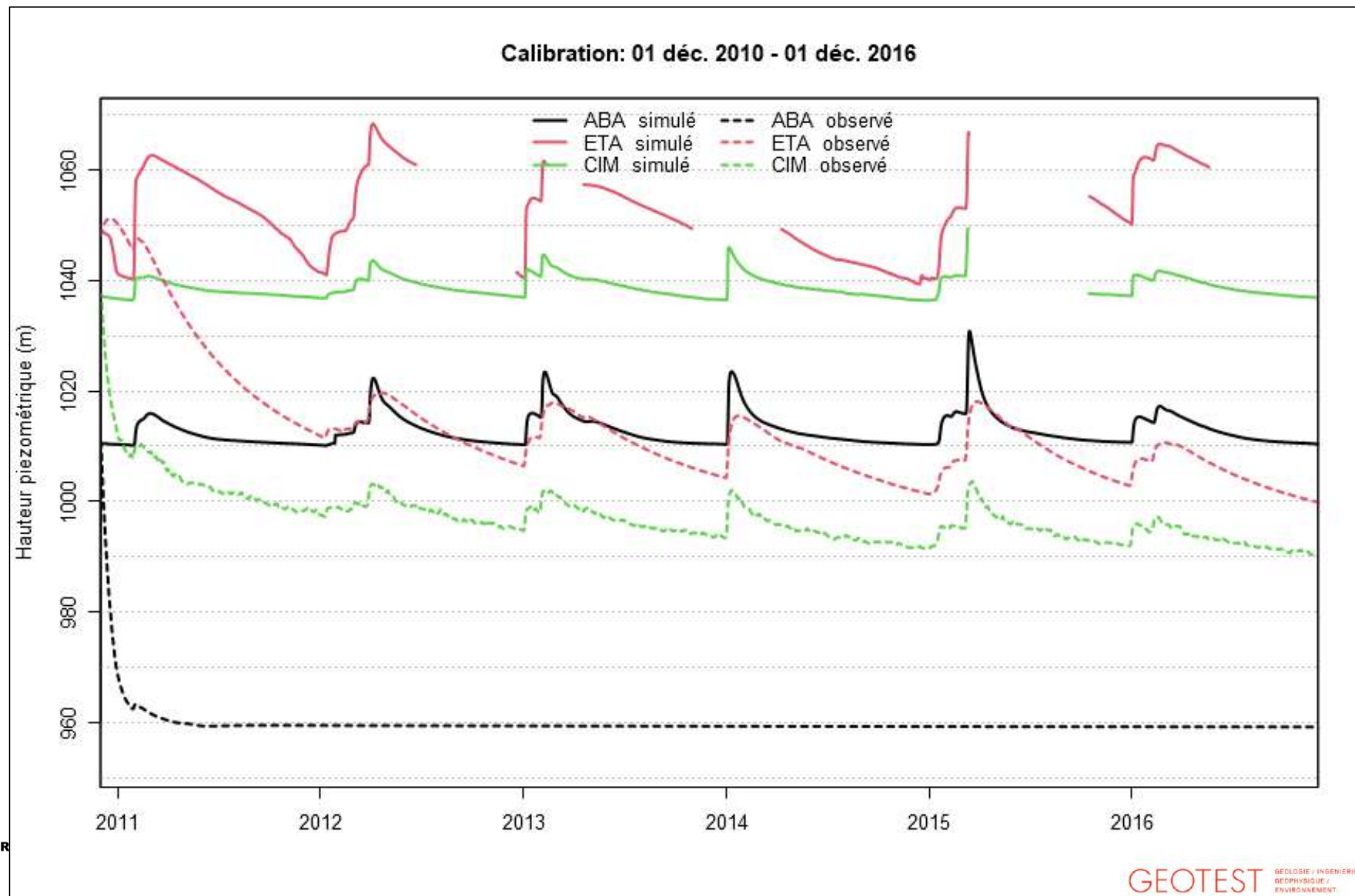
Modélisation transitoire sur 6 années – sans galerie

- Modélisation transitoire sur 6 années
- Niveau des eaux souterraines sur 3 piézomètres et calibration sur le débit des sources
- **Simulation numérique sans galerie**
- Simulation numérique avec galerie

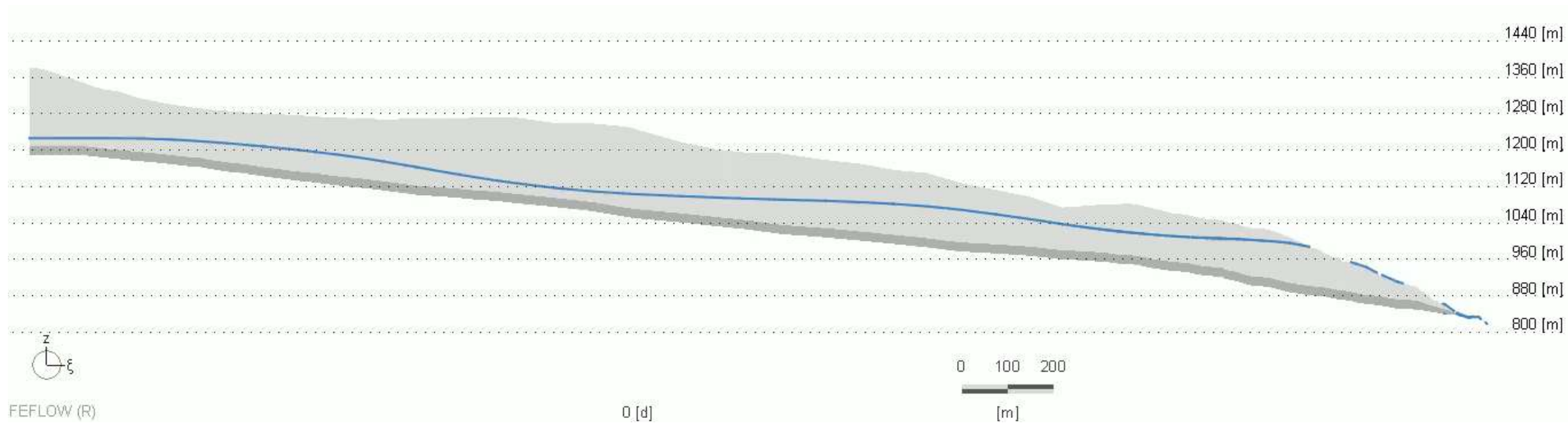


Modélisation transitoire sur 6 années – avec galerie

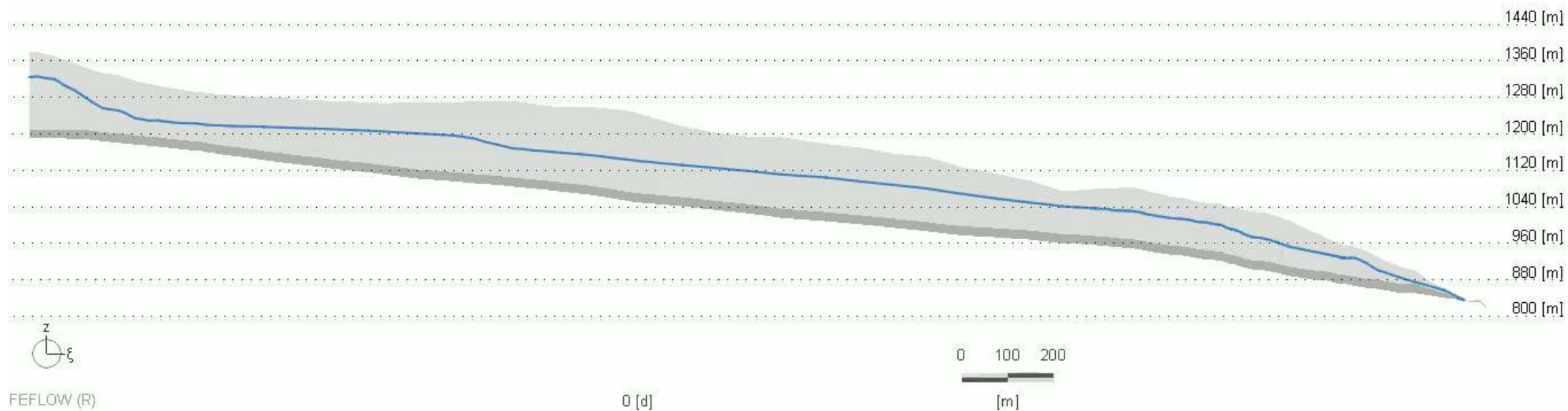
- Modélisation transitoire sur 6 années
- Niveau des eaux souterraines sur 3 piézomètres et calibration sur le débit des sources
- Simulation numérique sans galerie
- **Simulation numérique avec galerie**
- **Drainage significatif et rapide des eaux souterraines**



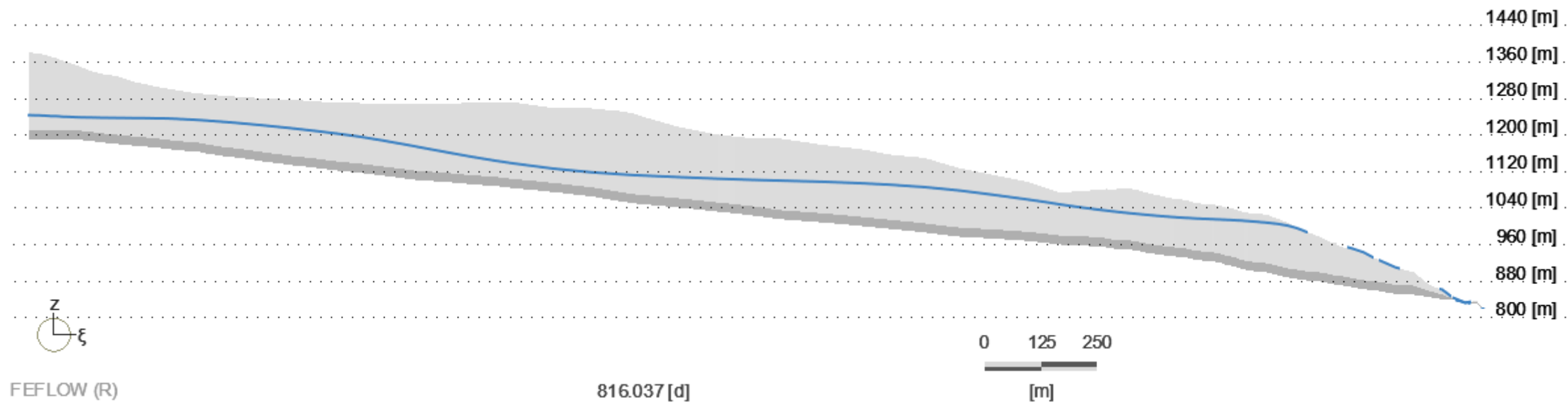
Sans galerie



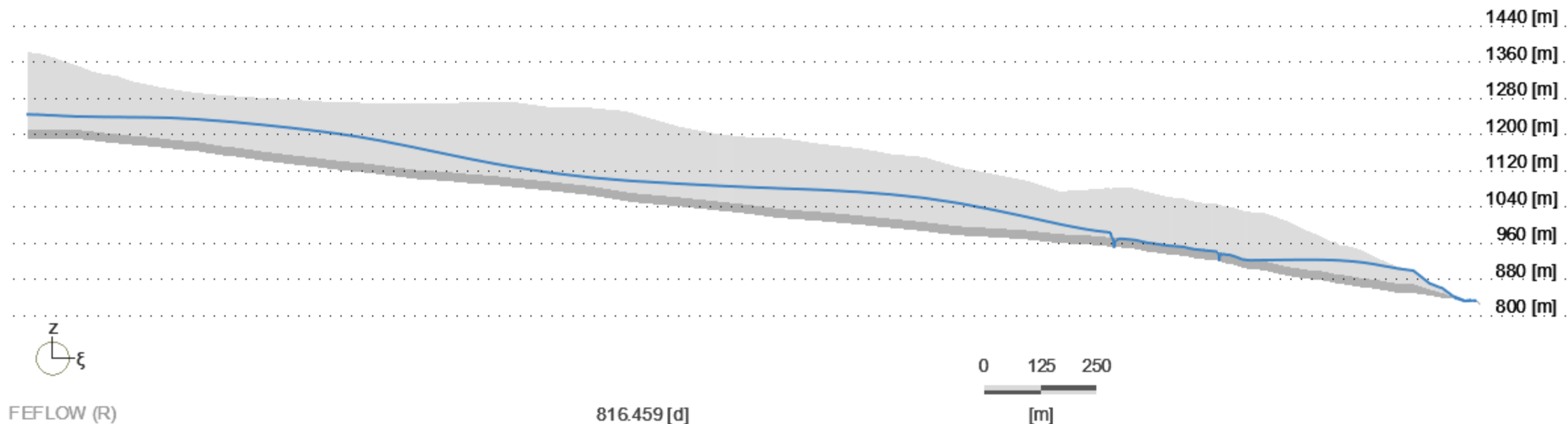
Avec galerie



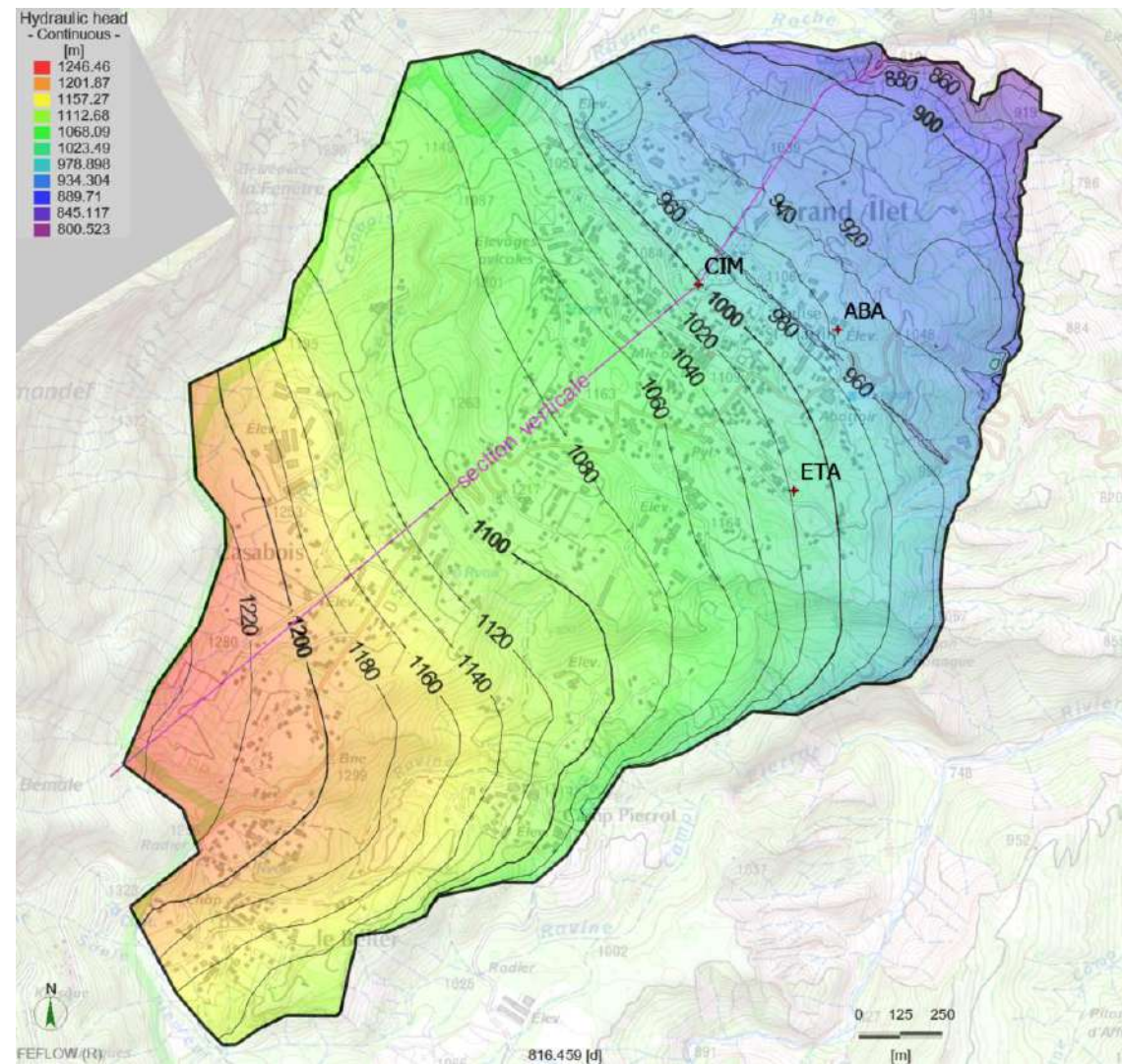
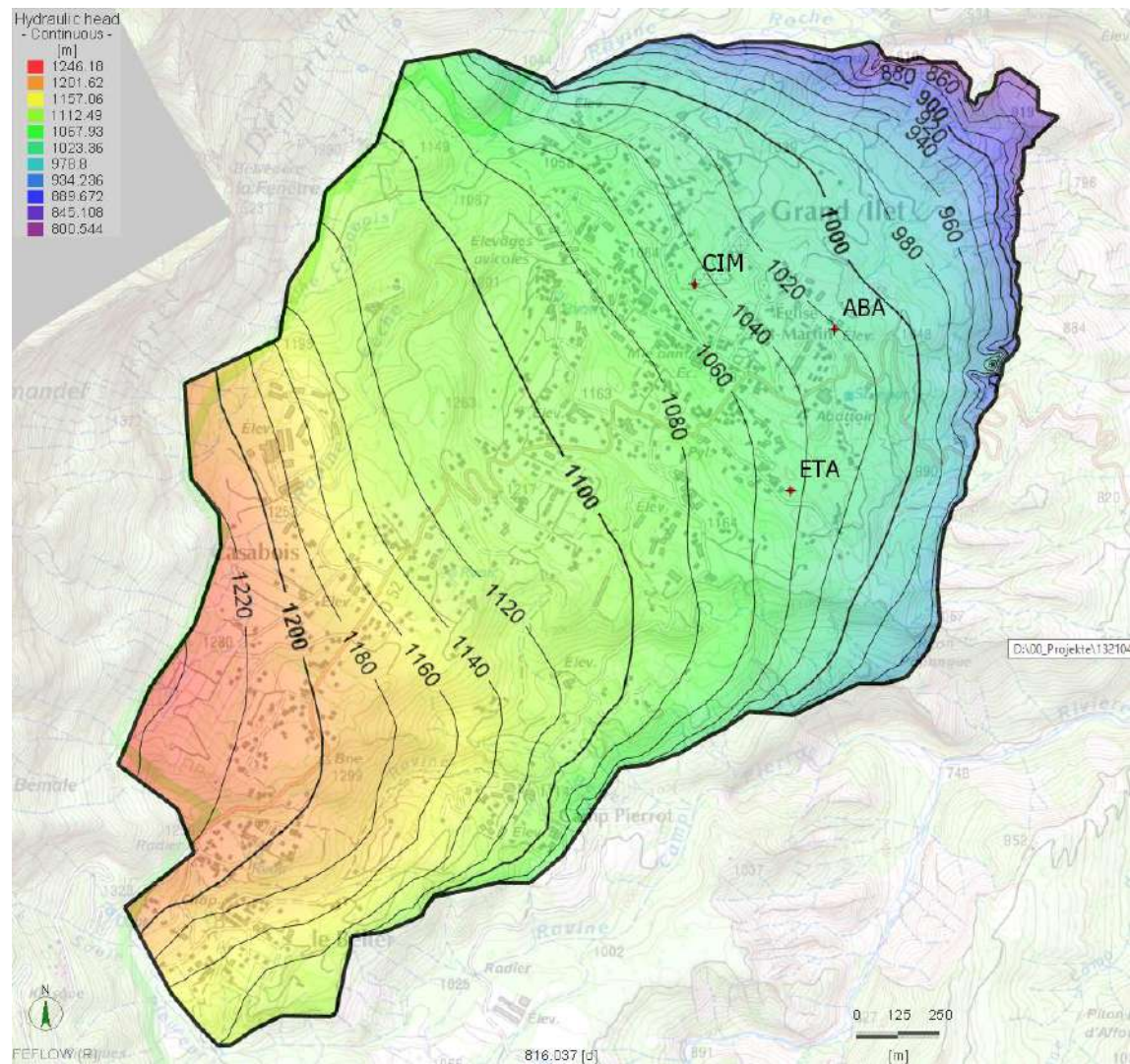
Sans galerie – Episode pluvieux de 2013



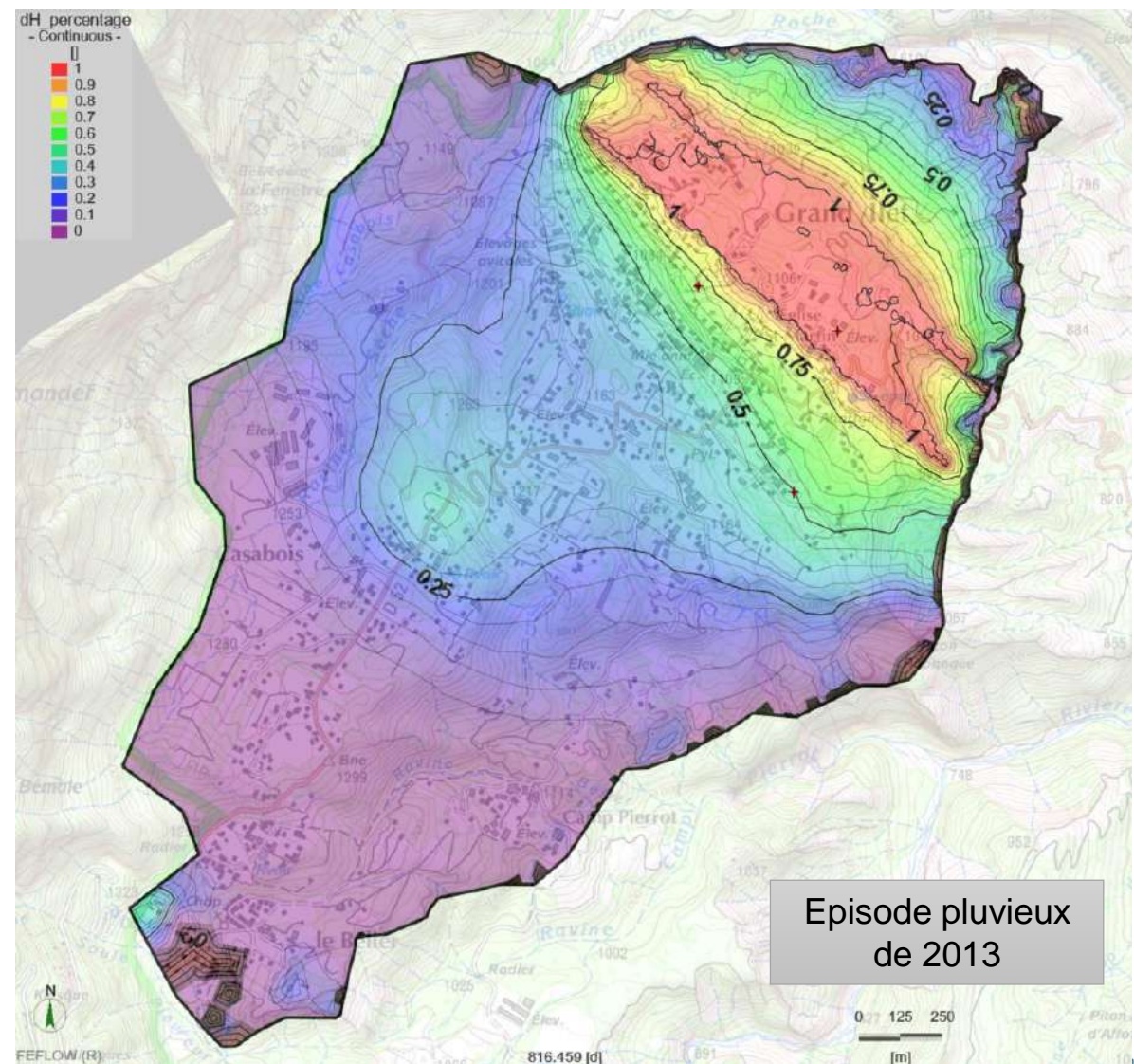
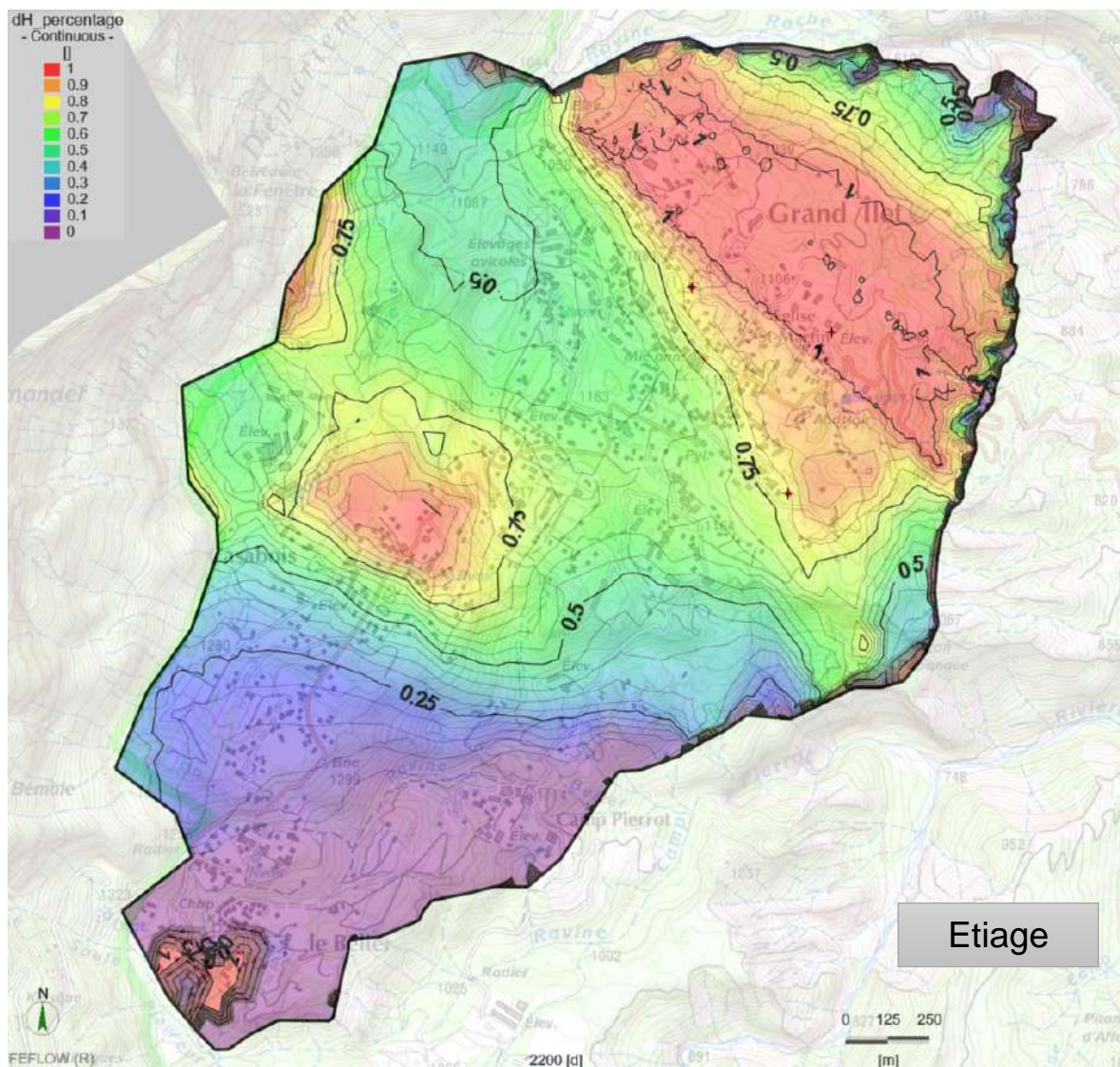
Avec galerie – Episode pluvieux de 2013



Piézométrie – Episode pluvieux de 2013 sans et avec galerie drainante



Piézométrie – Rabattement attendu en avec galerie drainante



Bilan des modélisations hydrodynamiques

- Résultats des différentes simulations numériques
 - Drainage significatif et rapide des eaux souterraines
 - En hautes eaux → réduction de la mise en charge de l'aquifère
- Si le drainage est effectif
 - Réduction significative des déplacements
 - ✓ 10-20 cm/an sans drainage ⇔ quelques cm/an avec drainage
 - ✓ *Pas de glissements lents actifs à Mafate et Cilaos*
 - Diminution des phénomènes de glissements rapides sur le pourtour du glissement de terrain de Grand-ilet
- Perspectives
 - Préfaisabilité d'une galerie drainante
 - Etudier la géométrie de la base du glissement de terrain (géophysique) + inclinomètres
 - Renforcer les connaissances hydrogéologiques
 - ✓ Réalisation de piézomètres
 - ✓ Propriétés hydrodynamiques (K et S)
 - Longueur de la galerie et des drains





RenovRisk

Erosion

Observer, expérimenter et développer des connaissances sur les phénomènes gravitaires et érosifs à La Réunion dans un contexte de changement climatique

- **Observer**
 - Localiser les secteurs à risques ⇔ localiser les secteurs avec des risques modérés à faibles
 - Hiérarchiser les risques en fonction de l'espace et du temps (conditions météorologiques)
- **Expérimenter**
 - Géophysique (Claire Rault)
- **Développer des connaissances**
 - Comprendre le fonctionnement ⇔ paramètres de contrôle
 - Elaboration de MNS historiques (Rémi Belon)
 - Résultats opérationnels – Aménagement du territoire (Marie Chaput)
 - Actualisation du site [Web](#)
 - ✓ Présentations, rapports, communications scientifiques...

JGR Earth Surface

RESEARCH ARTICLE
10.1029/2021JF006257

Landslide Processes Involved in Volcano Dismantling From Past to Present: The Remarkable Open-Air Laboratory of the Cirque de Salazie (Reunion Island)

C. Rault¹, Y. Thiery², M. Chaput¹, P. A. Reninger², T. J. B. Dewez², L. Michon¹, K. Samyn¹, and B. Aunay¹

Key Points:

- The high density and diversity of landslide processes observed in the Cirque de Salazie make it an ideal



Article

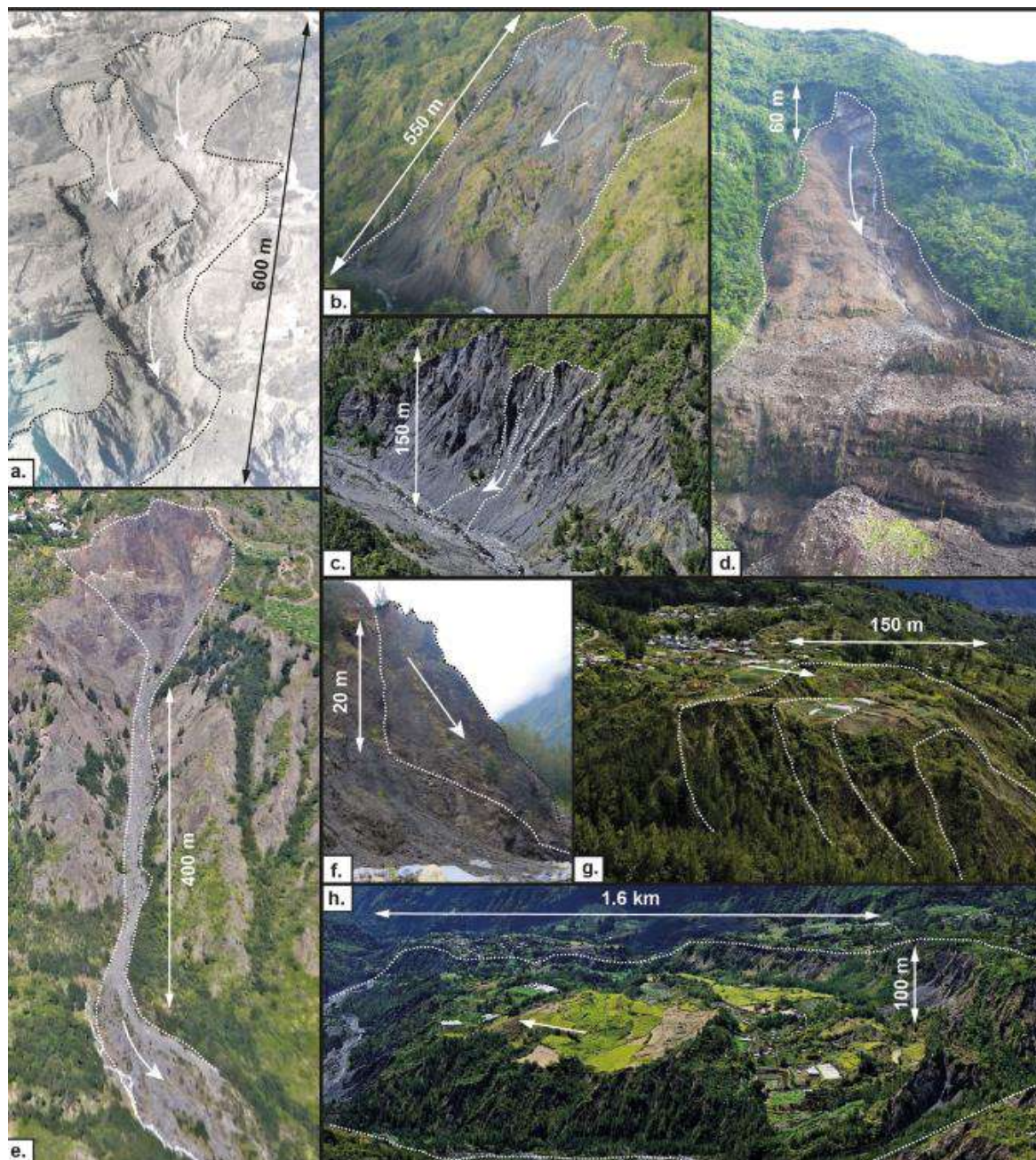
How Can the Morphometric Characteristics and Failure Conditions of a Historic Gully Caused by Intense Rainfall Be Reconstructed?

Claire Rault^{1,*}, Yannick Thiery², Bertrand Aunay¹, Bastien Colas², Kahina Reboul¹ and Thomas J. B. Dewez²

ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume V-2-2020, 2020
XXIV ISPRS Congress (2020 edition)

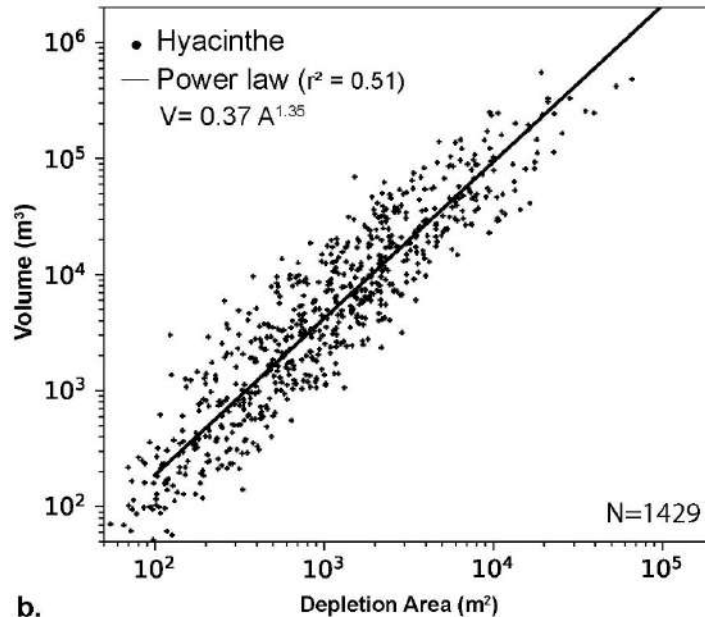
STRUCTURE-FROM-MOTION PROCESSING OF AERIAL ARCHIVE PHOTOGRAPHS: SENSITIVITY ANALYSES PAVE THE WAY FOR QUANTIFYING GEOMORPHOLOGICAL CHANGES SINCE 1978 IN LA RÉUNION ISLAND

C. Rault¹, T.J.B. Dewez^{1*}, B. Aunay¹



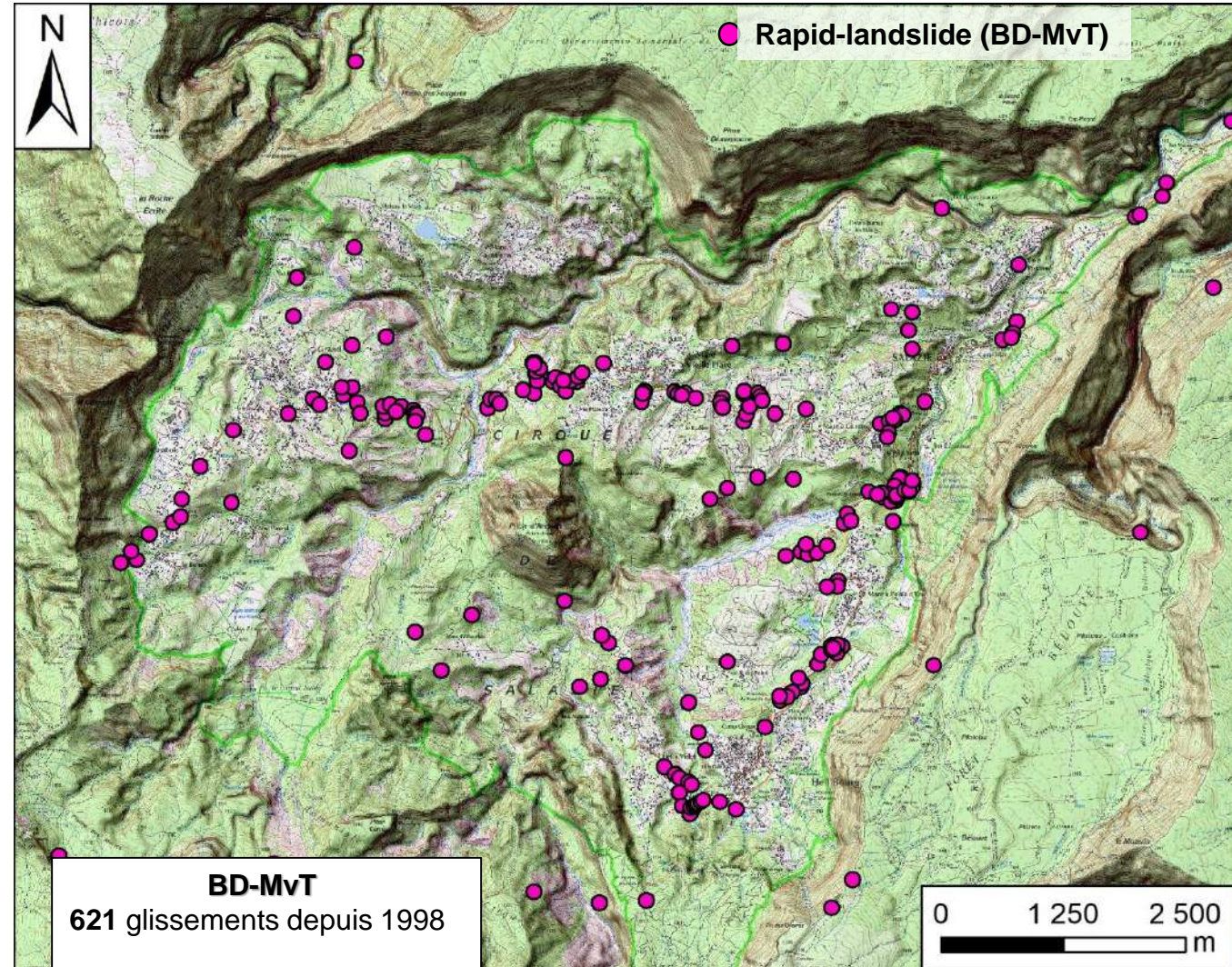
Glissements rapides – Echelle de Salazie

- Niveau de risque élevé
- Cas particulier du cyclone Hyacinthe
 - Janvier 1980
 - > 5 m de pluie en 5 jours
 - Période de retour centennale
 - Comparaison de modèle numérique de surface par photo aérienne - 1978 vs. 1984
 - 1429 glissements de terrain
 - $\approx 15 \text{ Mm}^3$



Taux d'érosion à Salazie 7,4 mm/an (Gayer et al., 2019)

$\approx 20\%$ de l'érosion totale causée par Hyacinthe

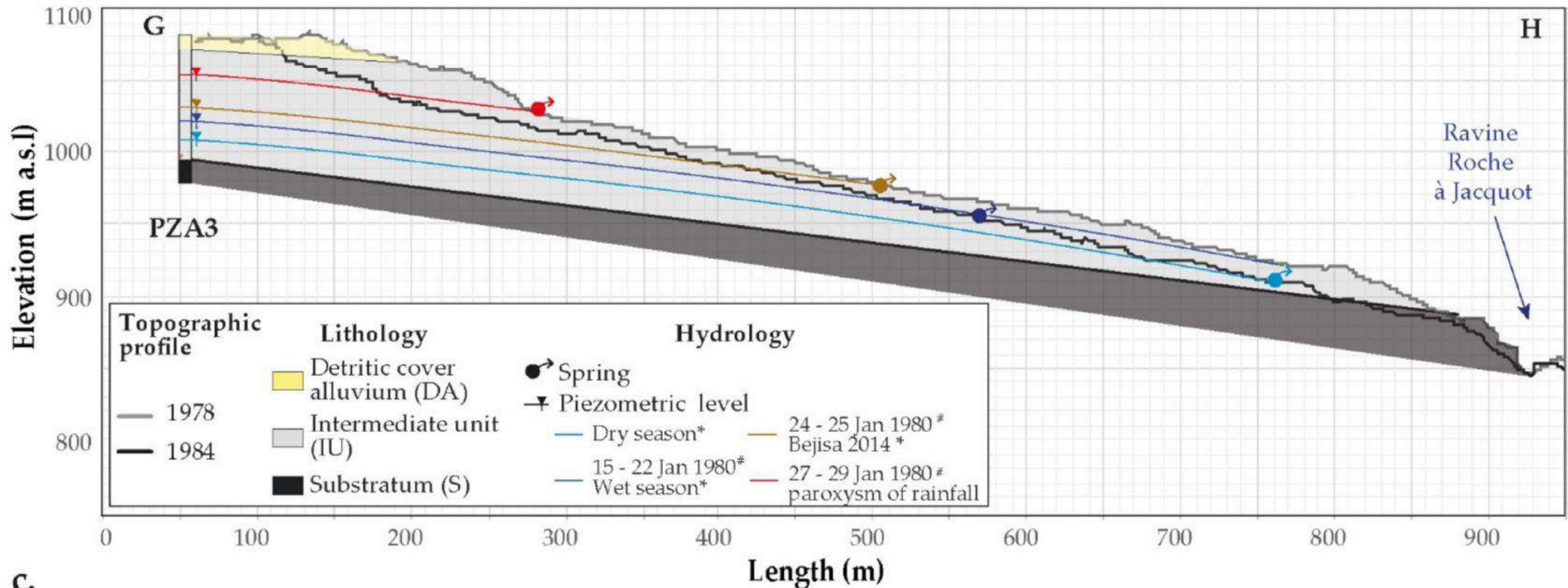


Reconstituer un événement qui s'est produit il y a plus de 40 ans ?

- **Niveau historique des eaux souterraines**

- Calibration 2010 – 2022 (Nash = 0.959)
- Retro-simulation sur 1978-2009

- Niveau d'eau pre-Hyacinthe → 1014 m
- Niveau d'eau max. → 1050 m
- Augmentation de 36 m de la charge hydraulique en 13 jours



ASSISES 3^e édition
**RÉGIONALES
DES RISQUES
NATURELS**

La Réunion 2023



OSU-RÉUNION
OBSERVATOIRE DES SCIENCES DE L'UNIVERS DE LA RÉUNION

UR | UNIVERSITÉ
DE LA RÉUNION

Laurent MICHON

Risques associés aux effondrements de rempart à La Réunion

Ce que nous disent les événements
historiques



25 novembre
1875:
Effondrement d'un
rempart du Gros
Morne à Salazie
=> 62 morts



Iconothèque de l'Océan Indien - Cassien et Roussain (1875)



Photo : J. Legros

6 mai 1965: Effondrement d'un
rempart du Bras de Mahavel
=> 0 mort

Sommaire

- 1- L'érosion à La Réunion
- 2- L'effondrement de Mahavel de 1965
- 3- " L'énigme " de 1927 dans la rivière de l'Est
- 4- Conclusion

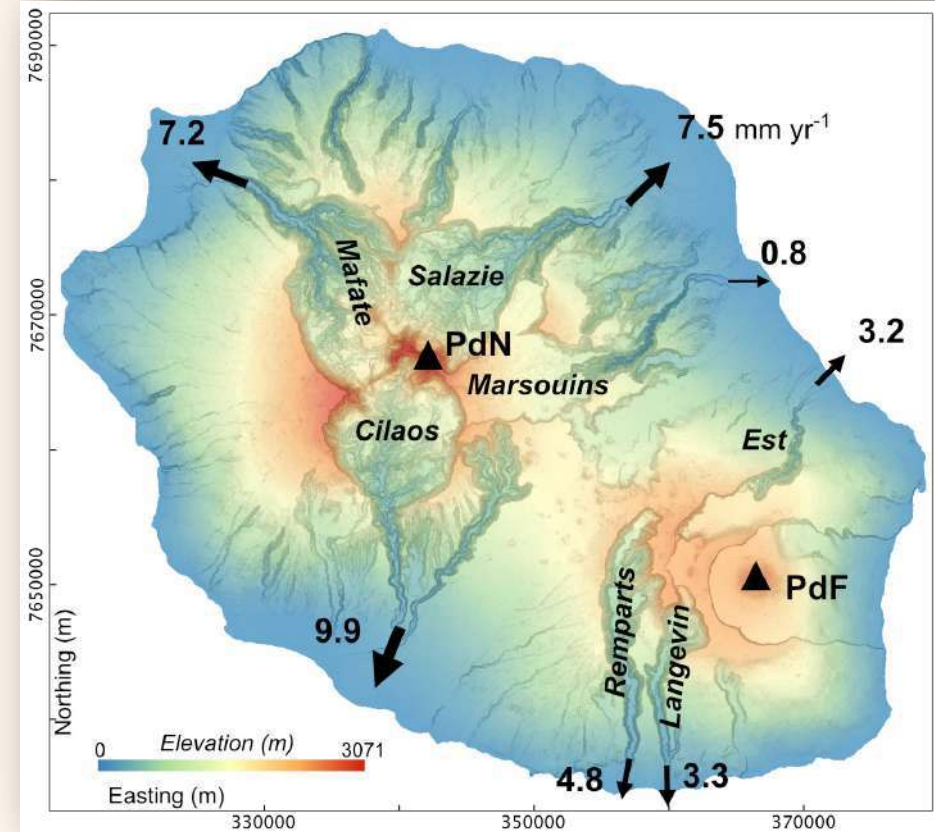
1- L'érosion à La Réunion



1- L'érosion à La Réunion



Cirque de Mafate



Gayer et al. (2019)

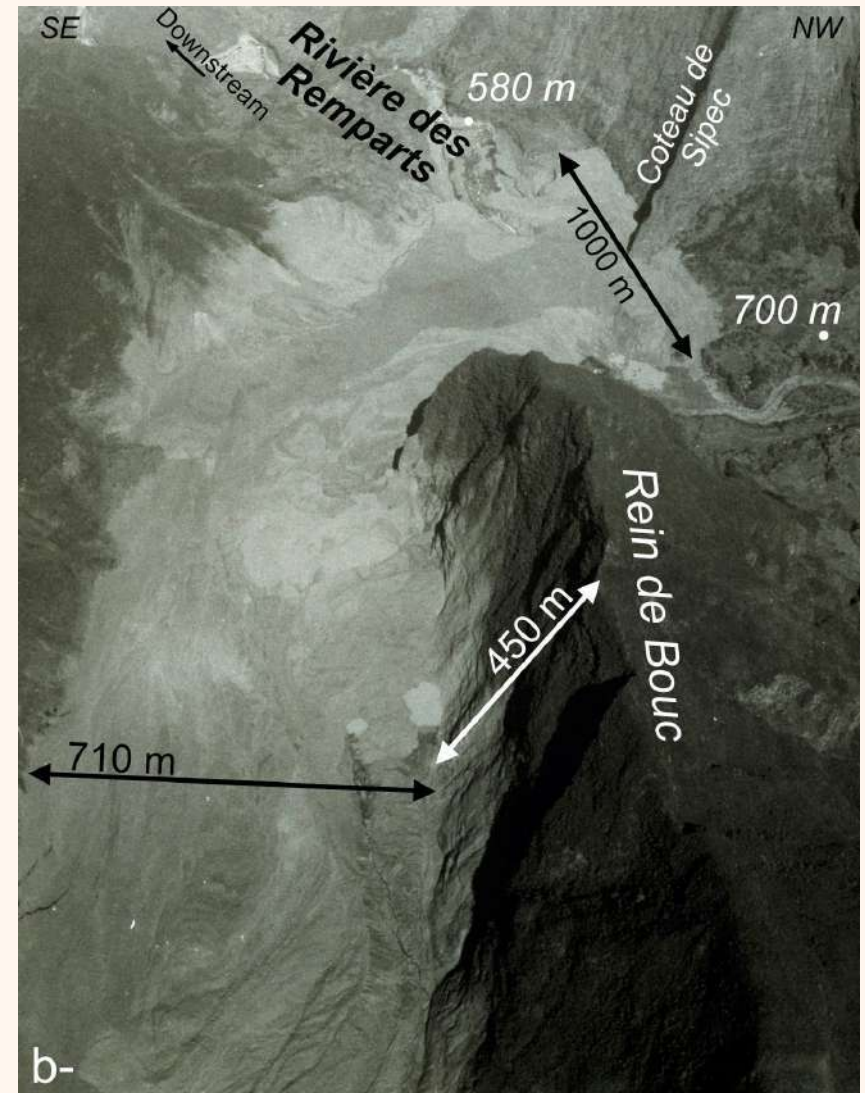
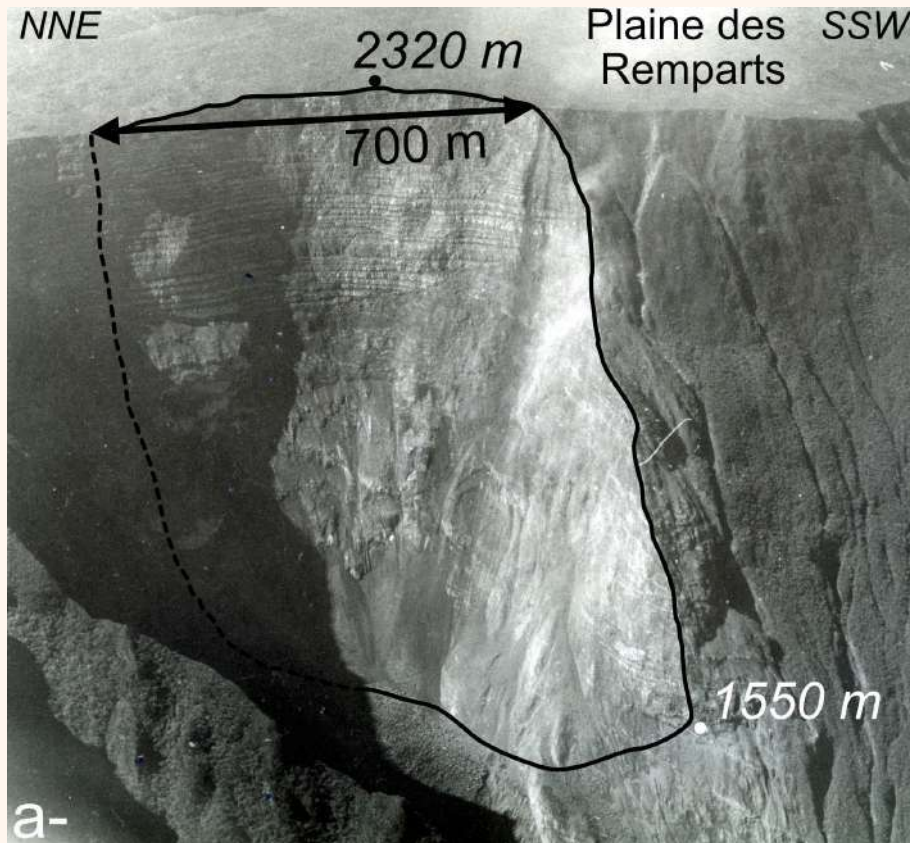
L'érosion à La Réunion => Une des plus intense au monde



2- L'effondrement de Mahavel de 1965



2- L'effondrement de Mahavel de 1965

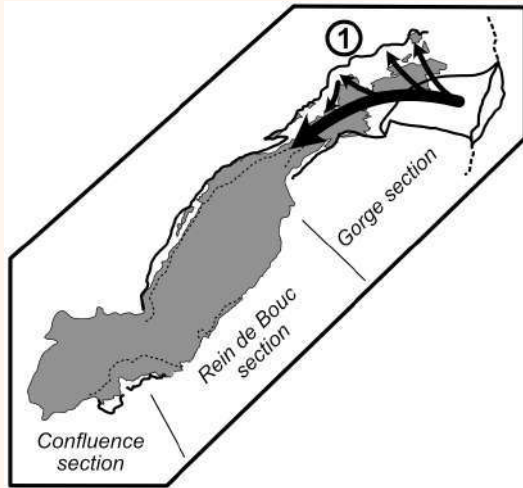


Photos : J. Legros

=> Effondrement provoquant une
avalanche de roche qui s'est écoulée
sur 5 km

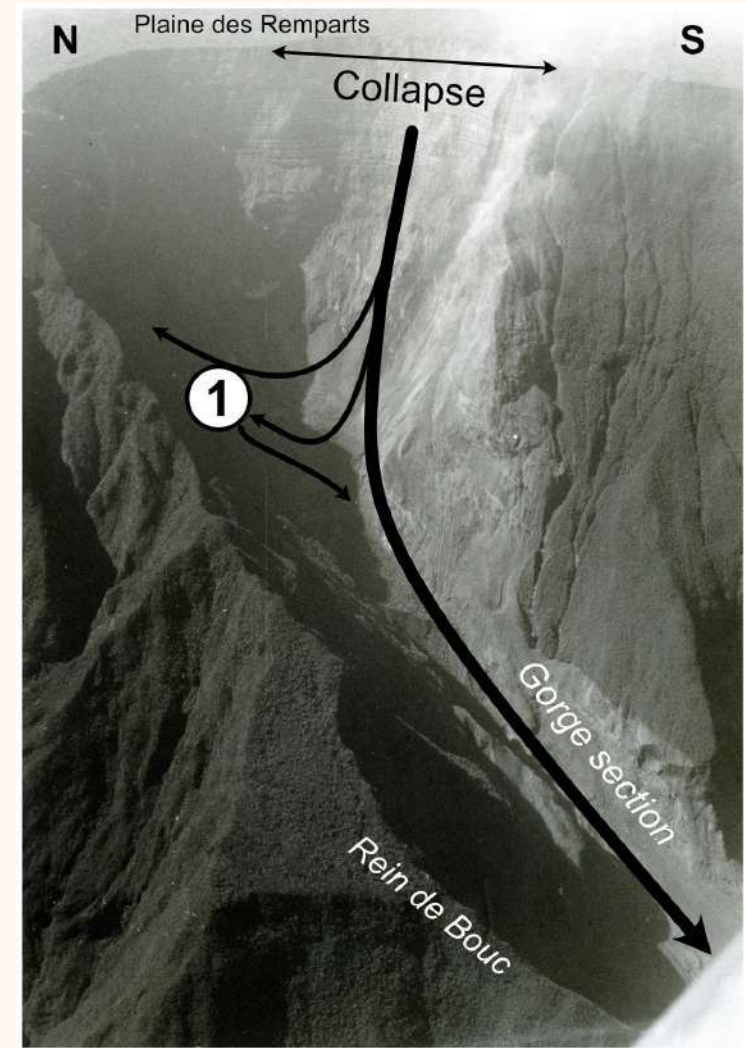


2- L'effondrement de Mahavel de 1965

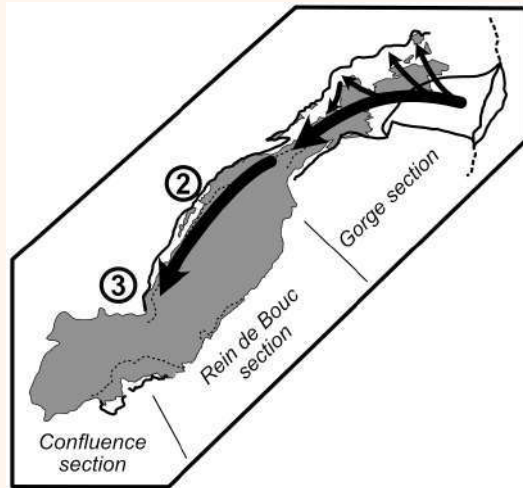


1- Effondrement et remontée sur le rempart opposé sur 300 à 380 m

$$V_1 = 280-310 \text{ km/h}$$



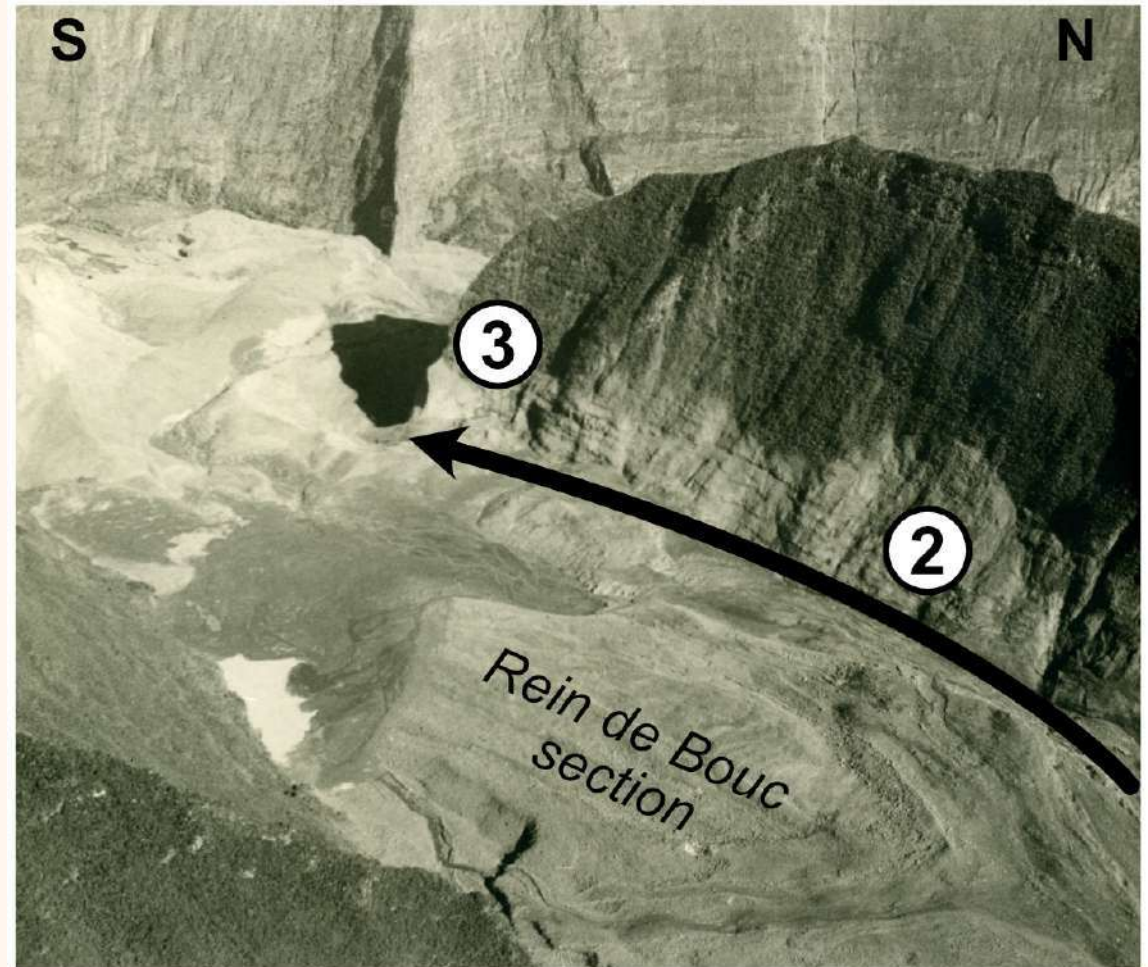
2- L'effondrement de Mahavel de 1965



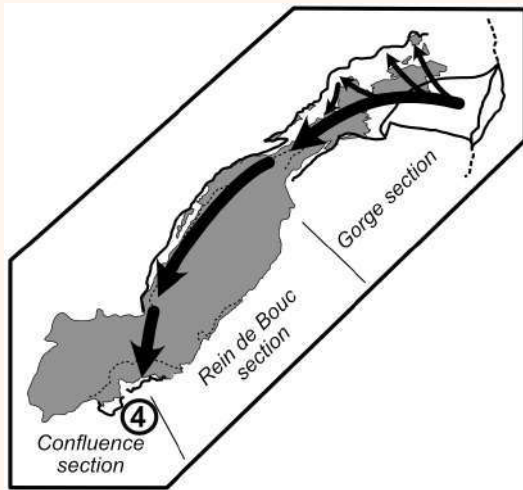
$$V_2 = 250 \text{ km/h}$$

3- Destruction de l'éperon du Rein de Bouc

2- Remontée latérale de l'avalanche sur le rempart du Rein de Bouc de 130 m

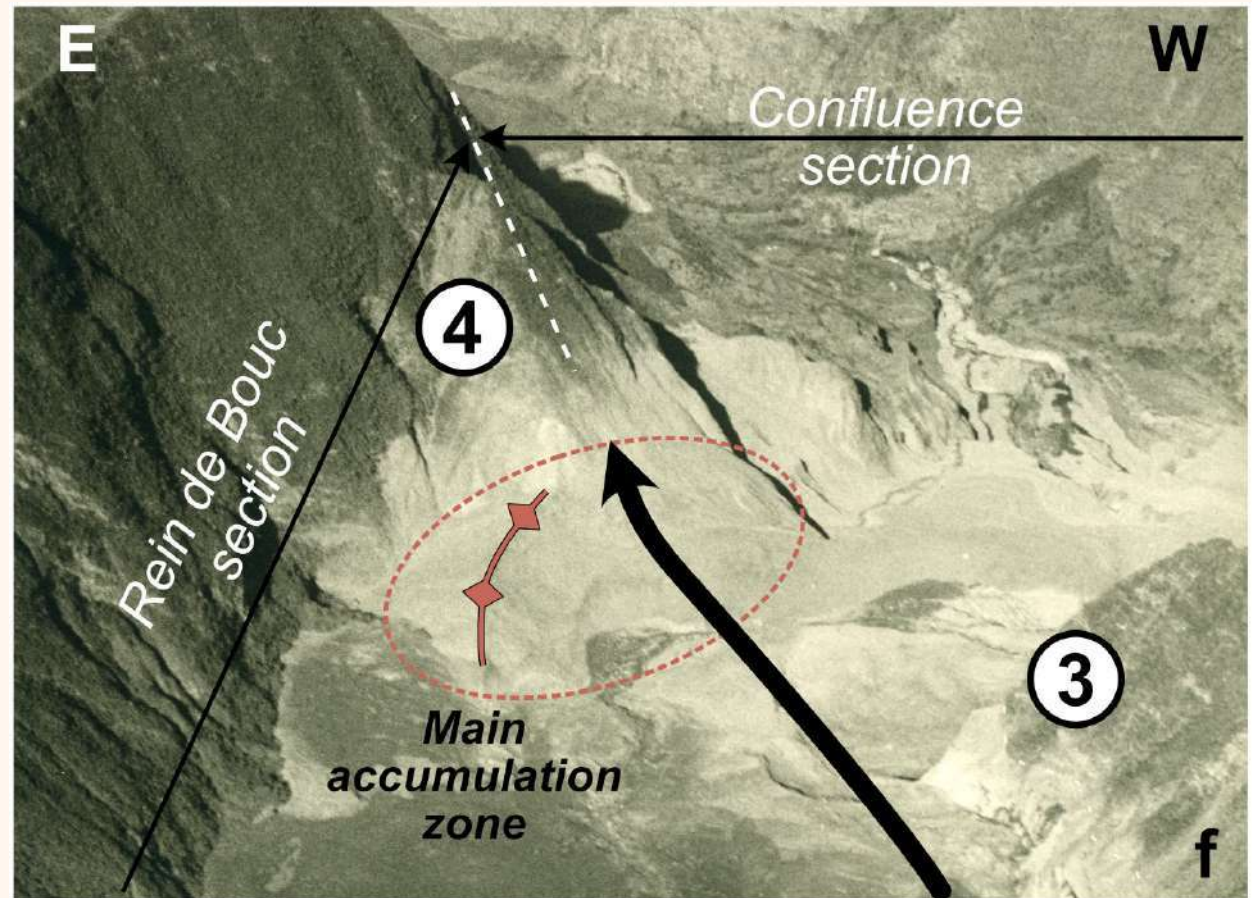


2- L'effondrement de Mahavel de 1965

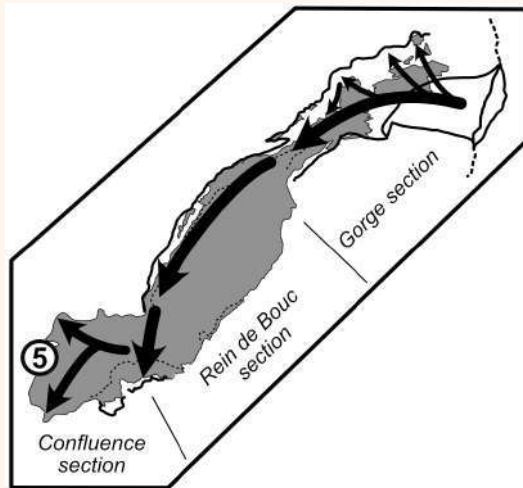


$$V_4 = 160 \text{ km/h}$$

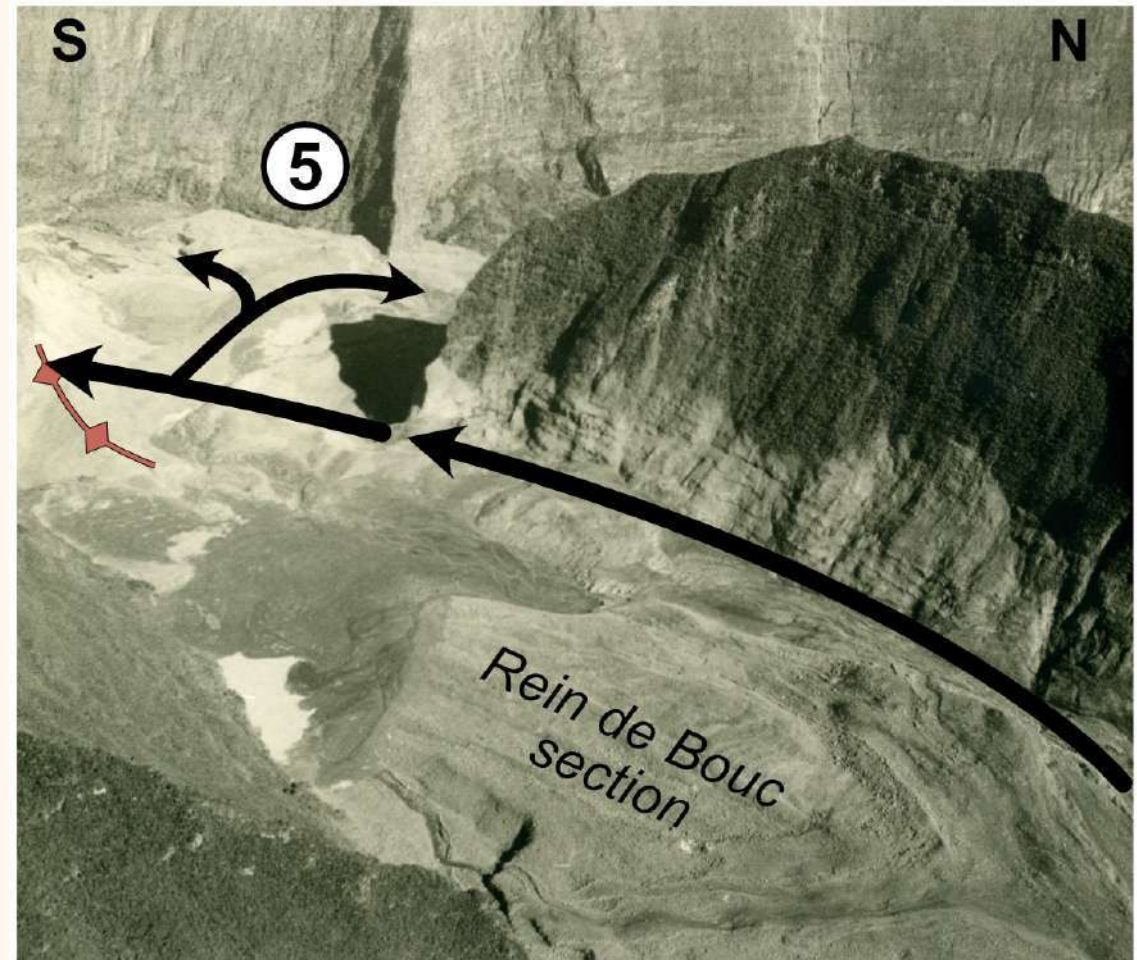
4- Collision dans le rempart sud du Bras de Mahavel et remontée sur 100 m



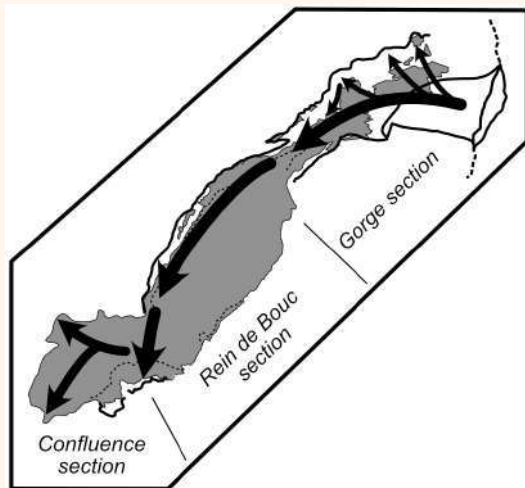
2- L'effondrement de Mahavel de 1965



5- Ecoulement lent dans la Rivière des Rempart



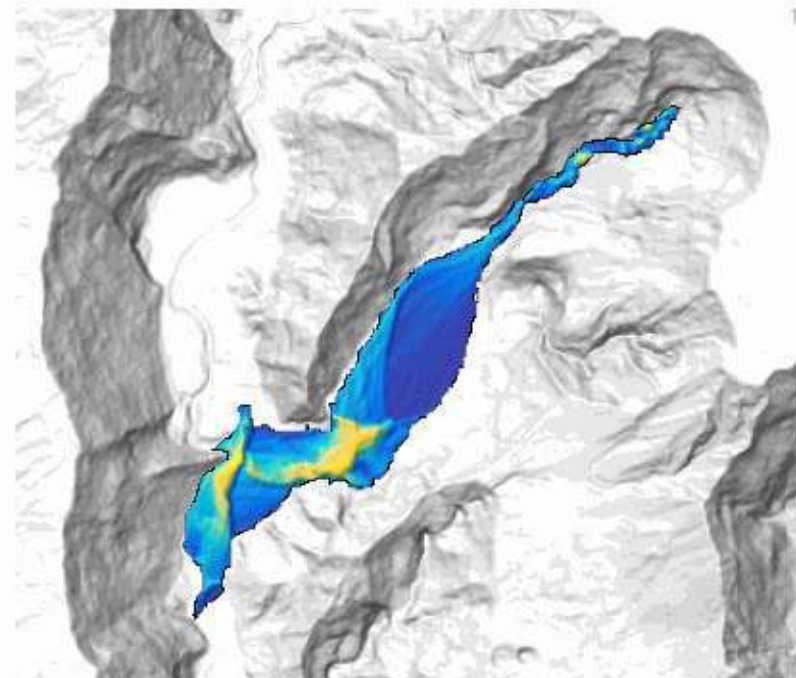
2- L'effondrement de Mahavel de 1965



Durée totale de mise en place : 5 min 45 s

**Avalanche de roche
=> Aléas majeur à
La Réunion**

Simulation de l'avalanche avec le modèle SHALTOP

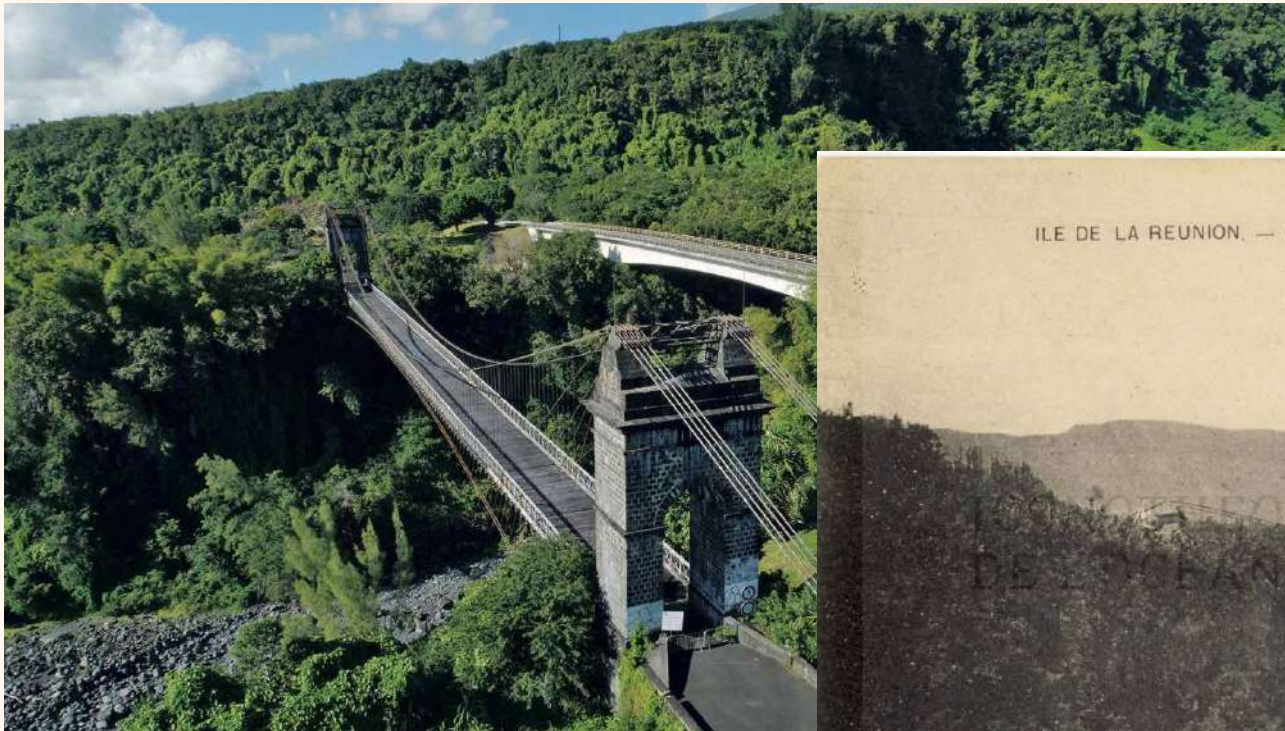


3- « L'énigme » de 1927 de la Rivière de l'Est

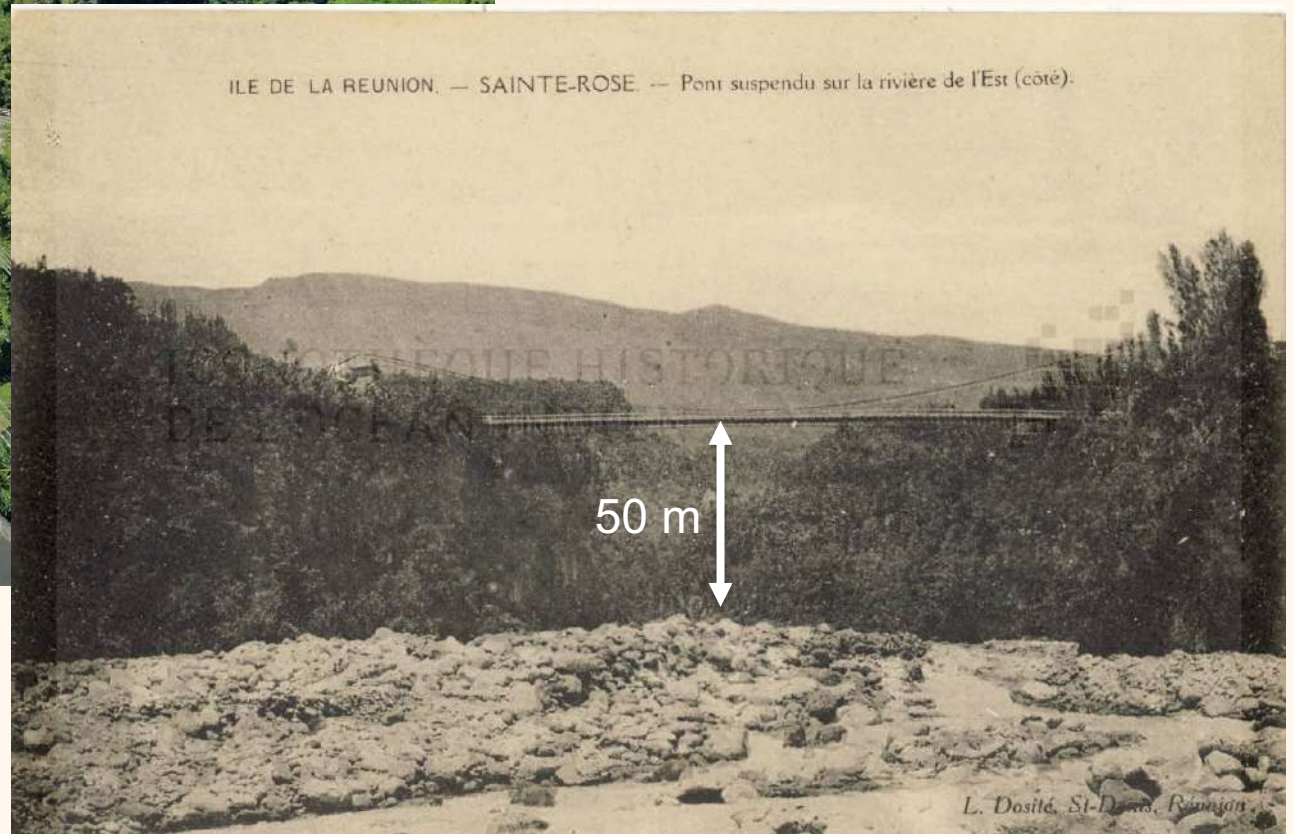


3- « L'énigme » de 1927 de la Rivière de l'Est

27 avril 1927 : blocs
déposés sur les plateaux
en amont des culées du
pont suspendu



cartedelareunion.fr



Description d'Anatole Hugo
=> Origine des blocs ?

Iconothèque de l'Océan Indien – L. Dosité



3- « L'énigme » de 1927 de la Rivière de l'Est

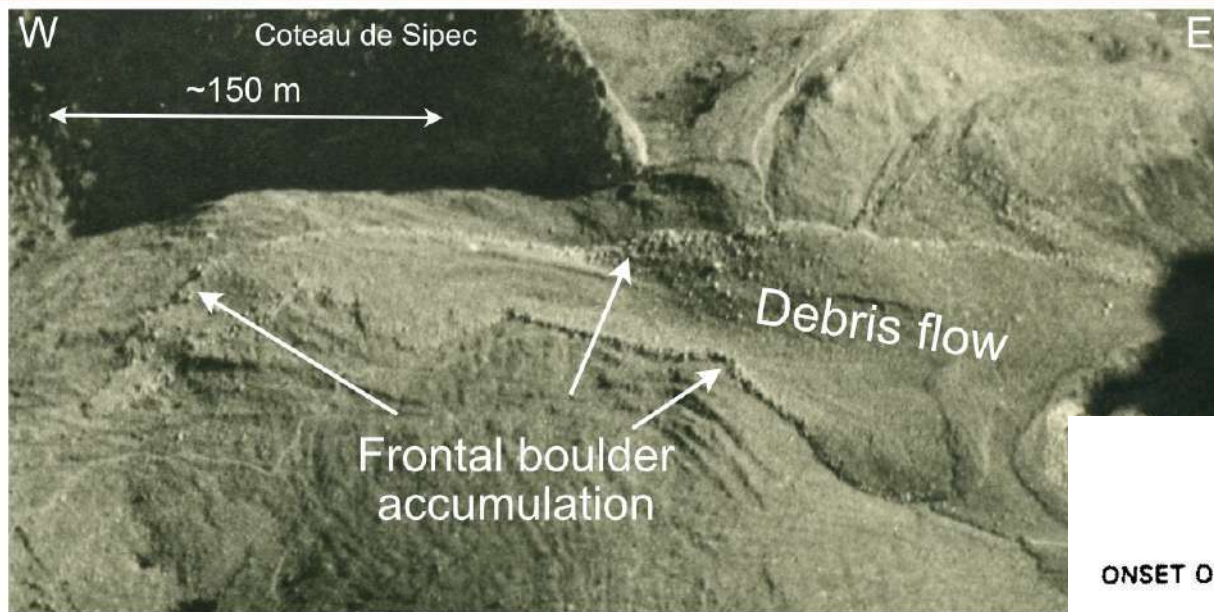
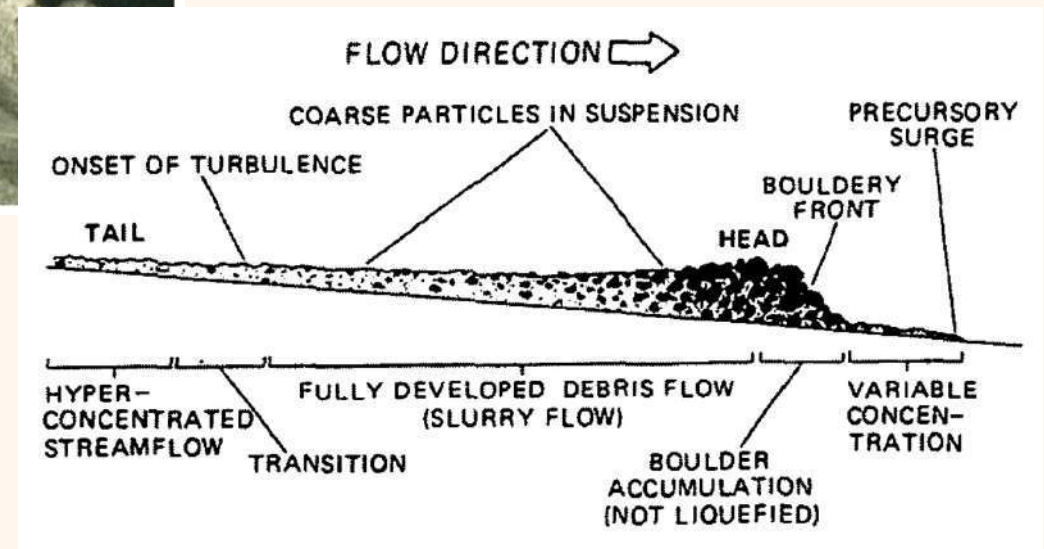


Photo : J. Legros

Blocs situés au front et au sommet des coulées de débris

Remobilisation du dépôt de 1965 à Mahavel

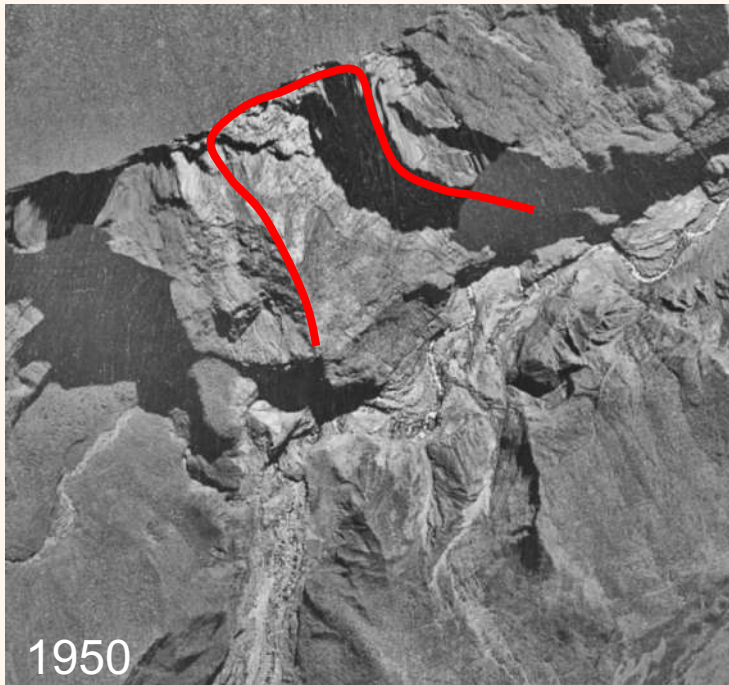


Pierson (1986)

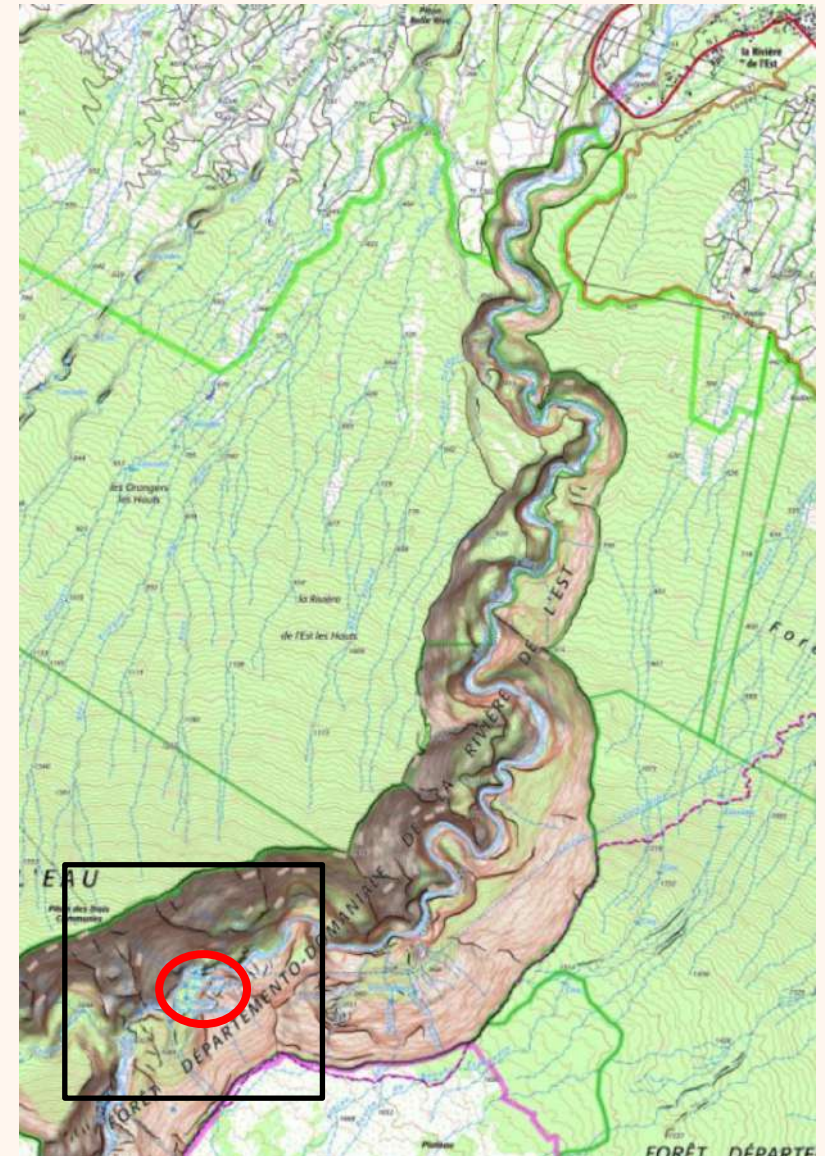


3- « L'énigme » de 1927 de la Rivière de l'Est

Vallée inhabitée. Captage EDF seule installation



Effondrement majeur du rempart
(20-30 Mm³)

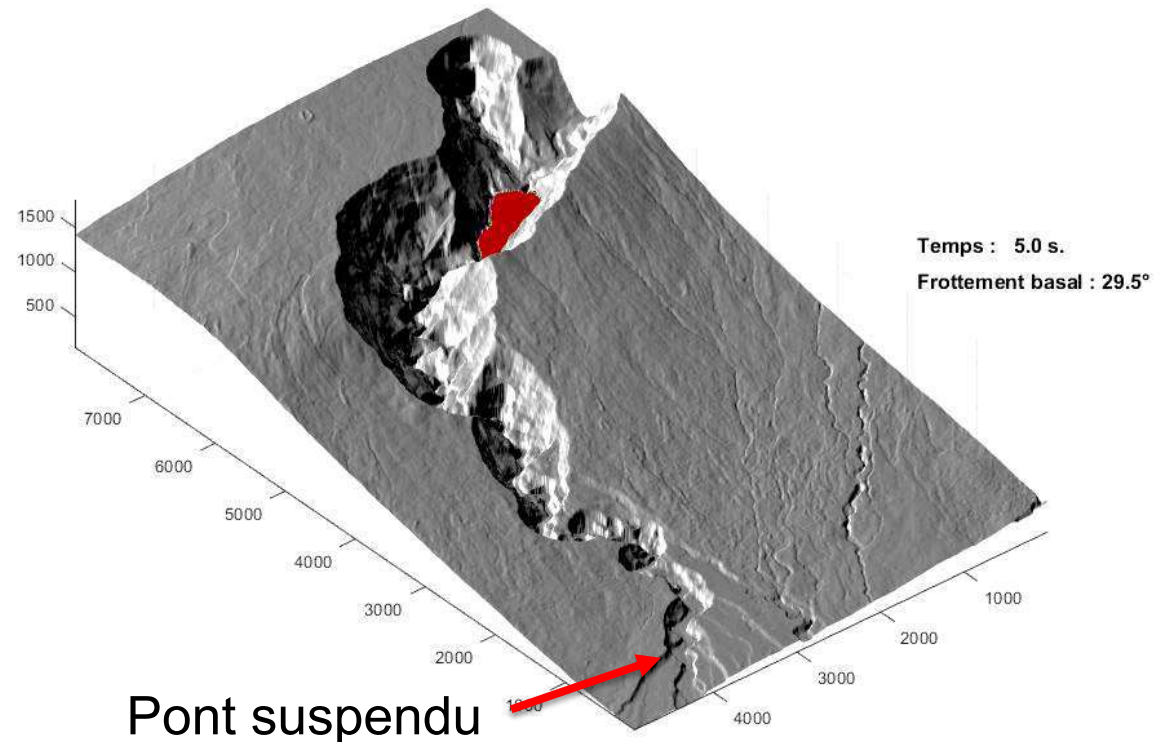


3- « L'énigme » de 1927 de la Rivière de l'Est

Coulée de débris liée à la rupture de barrage formé par le dépôt

Pont atteint ~15 min après la rupture du barrage

**Coulées de débris
=> Aléas impactant
les zones littorales**



Kelfoun et Michon (2023)



3- « L'énigme » de 1927 de la Rivière de l'Est

Effondrement, barrage et coulées de débris dans la Rivière des Pluies



Fèvre (2005) ; Photos: BRGM

4- Conclusion



4- Conclusion

Comment les terrains glissent-ils ?

Avalanche de roche => Ecoulement très rapide sec après de fortes pluies

Coulée de débris => Ecoulement rapide saturé en eau associé à la rupture de barrage

Quels risques pour les glissements lents et glissements rapides ?

- **Avalanche de roche** : destruction totale sur le trajet de l'écoulement (limité aux zones internes de l'île) + transfert sédimentaire progressif vers l'aval
- **Coulée de débris** : destruction dans le lit des rivières

Quelles solutions pour ralentir les glissements de terrain ?

- Aménagements possibles pour les petites coulées de débris mais non efficaces pour les très gros évènements. Pas de solution pour les effondrements de gros volume.
- Extraction du dépôt pour limiter l'ennoisement des zones en aval

Quelles solutions pour assurer la prévention des risques ?

- Mieux connaître les évènements passés et les zones affectées
- Modélisation numérique des effondrements et des remobilisations



ASSISES 3^e édition RÉGIONALES DES RISQUES NATURELS

La Réunion 2023

Merci

laurent.michon@univ-reunion.fr

