



MINISTÈRE DES TRANSPORTS



# UTILISATION D'EXPLOSIFS À PROXIMITÉ DE PENTES EN ARGILE SENSIBLE

24 février 2022

Sarah Bouchard, ing., Ph. D.



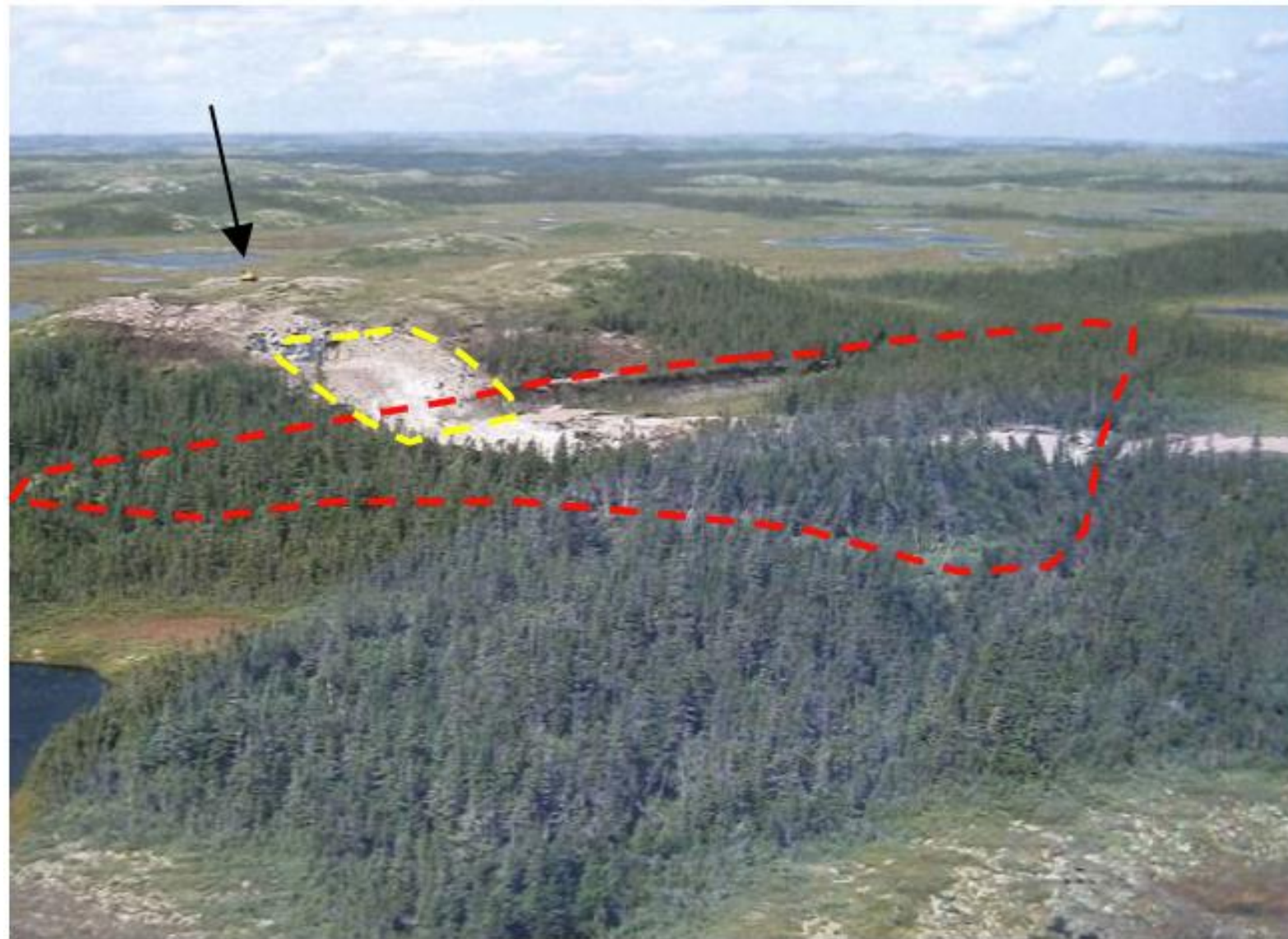
# PLAN DE LA PRÉSENTATION

- Problématique
- Objectifs de la recherche
- Mise en contexte: glissements de terrain induits par sautage
- Le glissement de La Romaine (résultats investigation et essais, analyses de stabilité par équilibre limite)
- Développement d'une méthode de simulation numérique du sautage avec un cas bien documenté (Eastmain-1)
- Application au cas de La Romaine
- Contributions et conclusion





# PROBLÉMATIQUE: GLISSEMENT DE LA ROMAINE



Glissement La Romaine, 2009





## OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

- Comprendre le glissement de la Romaine
- Rendre opérationnelle une méthodologie d'analyse
- Tirer des conclusions pratiques et des recommandations



## ÉTAPES DE LA RECHERCHE

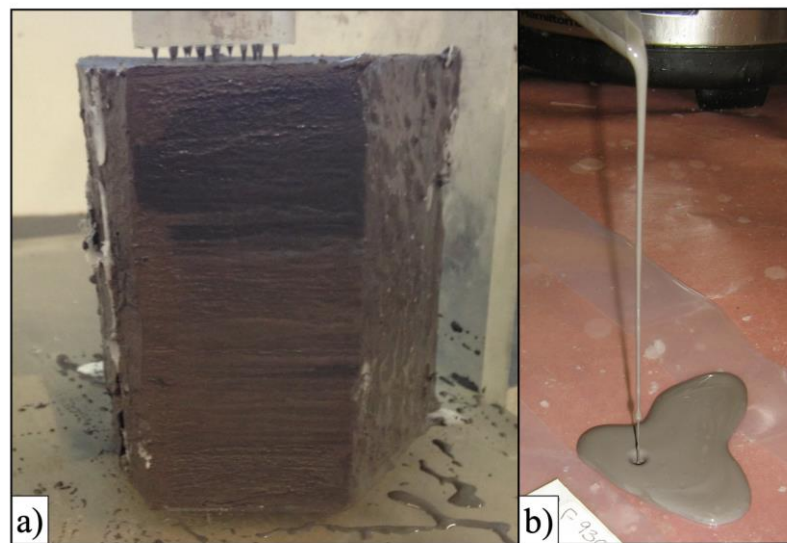
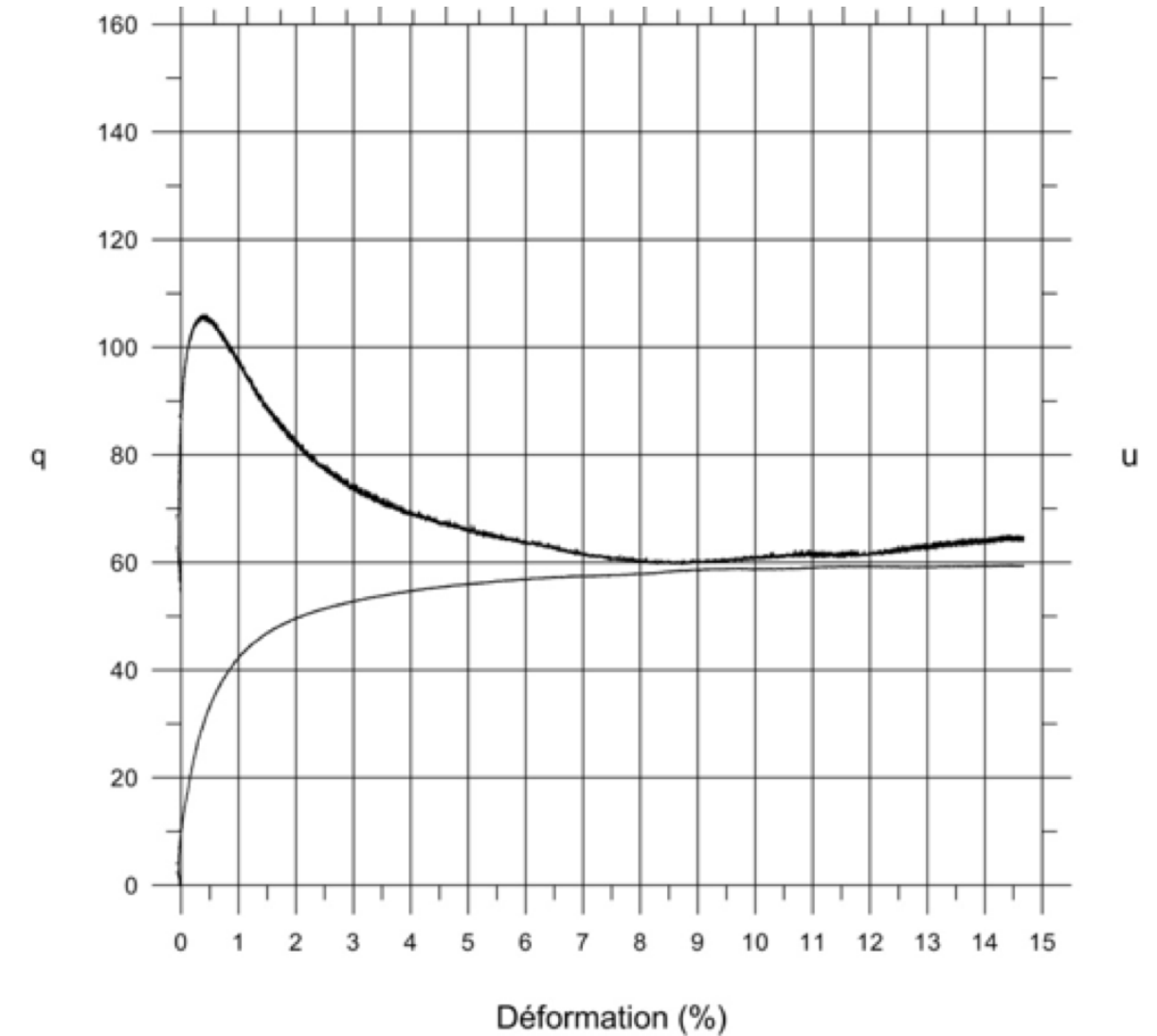
- Recenser et synthétiser les différents cas de glissements de terrain
- Procéder à un état des connaissances dans le domaine du sautage
- Caractériser les sols et le glissement de La Romaine
- Développer un modèle numérique pour simuler le sautage
- Appliquer le modèle développé au cas de La Romaine
- Proposer des recommandations



# NOTIONS PRÉALABLES

## ARGILE SENSIBLE

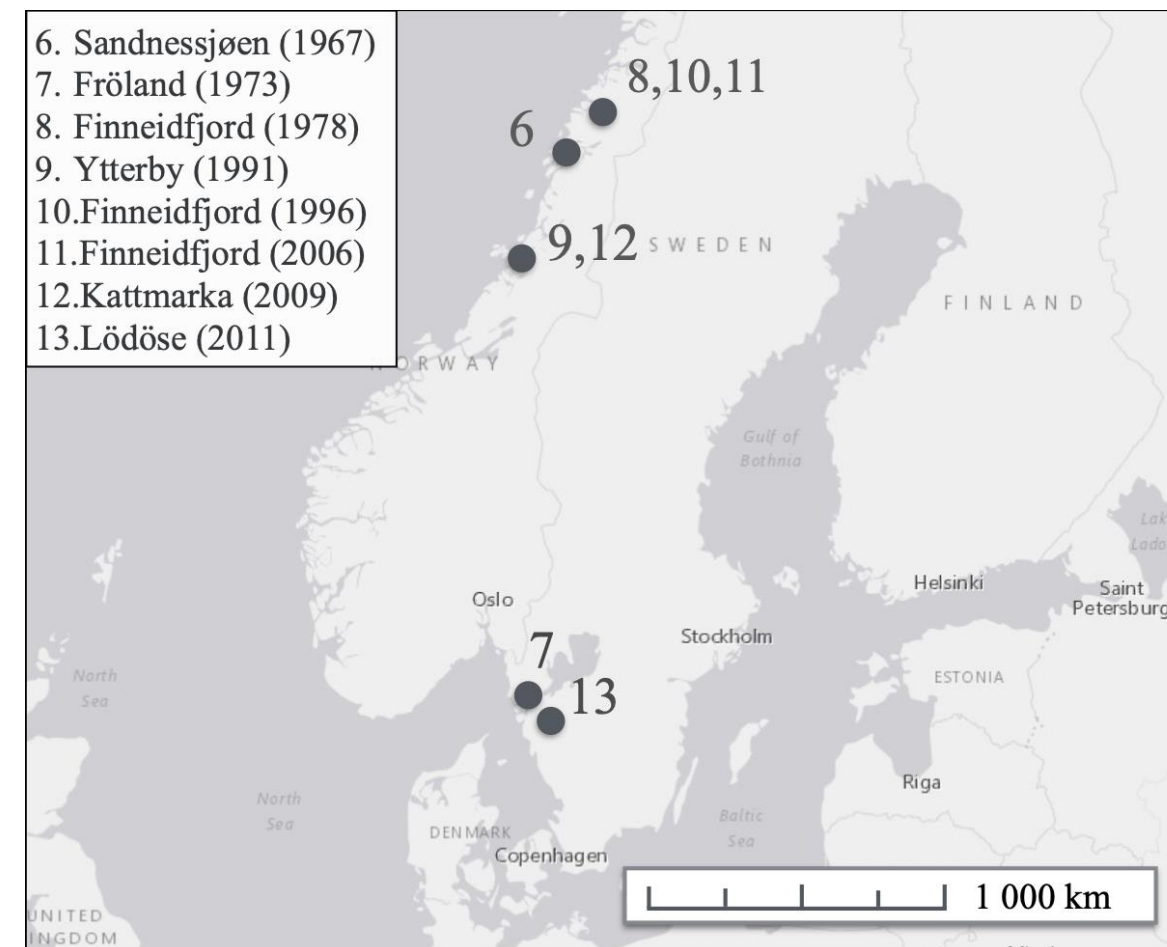
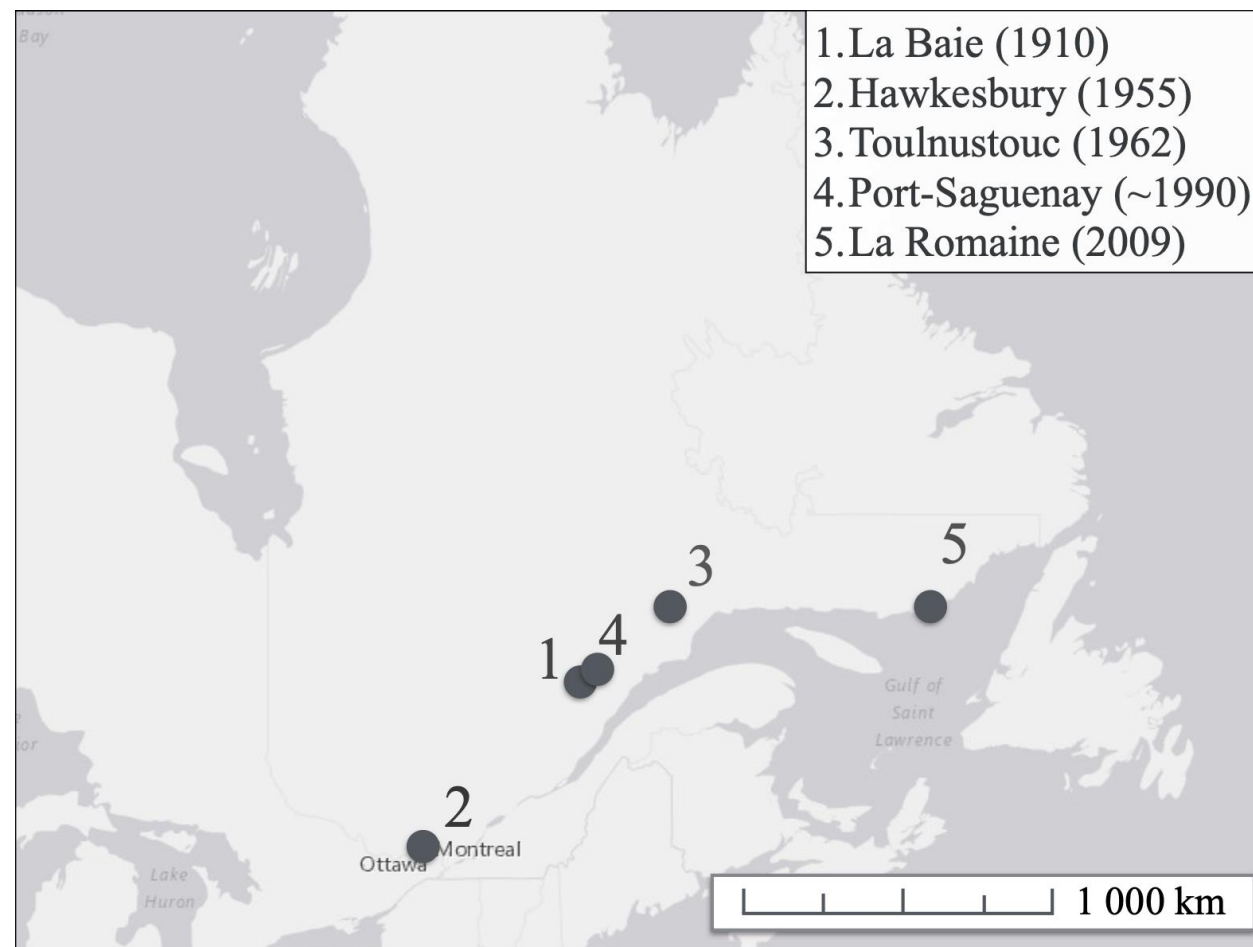
- 2 paramètres utilisés pour définir une argile sensible:  $St = Su/Sur$  et  $St = cu(kPa)(ILc - 0,21)^2$
- Peut s'écouler comme de l'eau lorsque remaniée
- Comportement anti-écrouissage en contrainte-déformation
- La résistance au cisaillement augmente avec la fréquence de sollicitation, mais diminue avec le nombre de cycles



Argile de La Romaine intacte (a) vs remaniée (b)



# MISE EN CONTEXTE



Glissements de terrain dans les argiles sensibles à la suite d'un sautage



UNIVERSITÉ  
LAVAL

Transports  
Québec





## NORMES AU QUÉBEC ( $V_{PP}$ ADMISSIBLE)

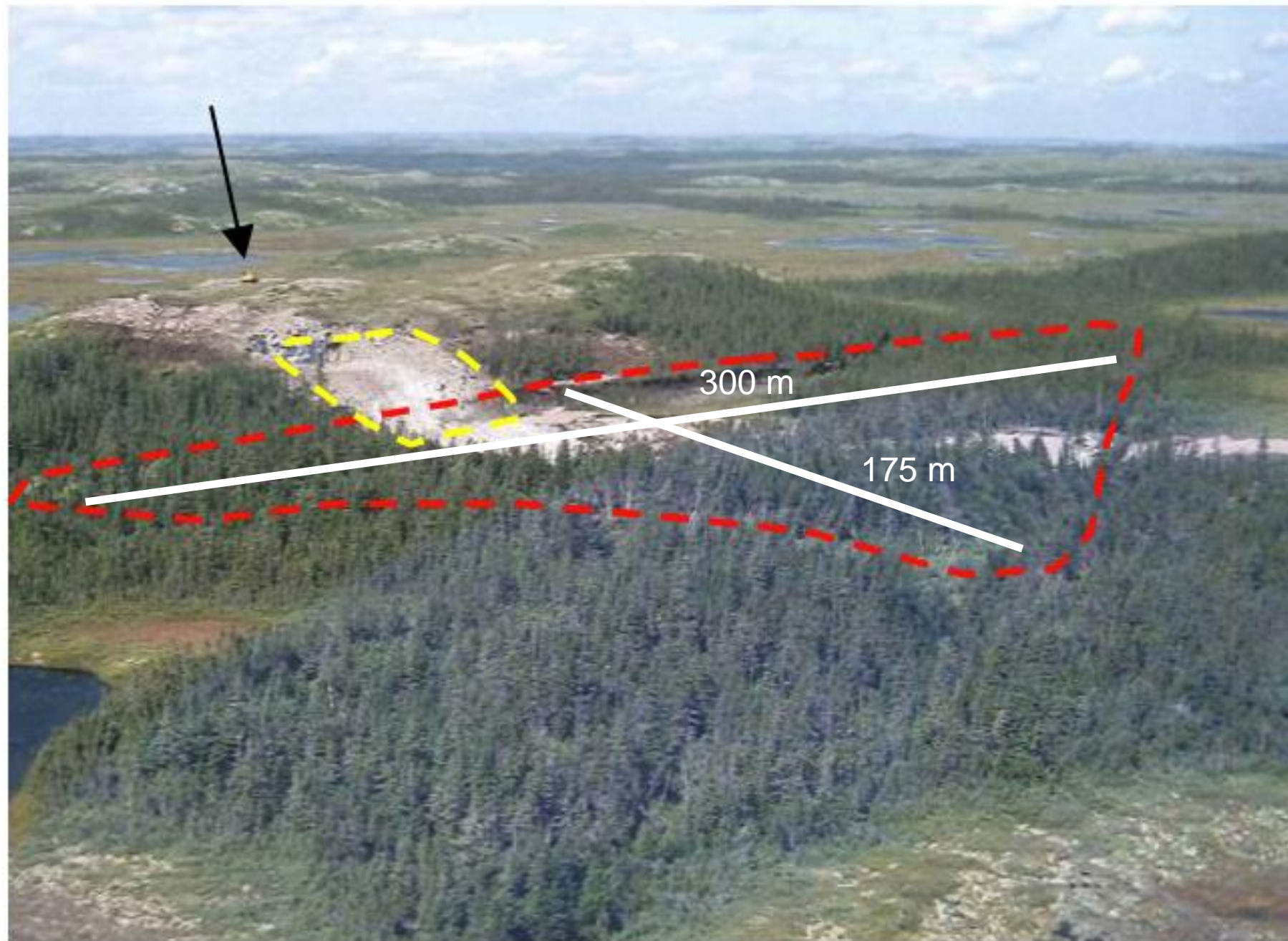
- Directive 019 (loi sur l'industrie minière)  
mesuré au point d'impact
- Route et barrage
  - Pas de normes concernant les limitations de vibrations des sautages reliés à la construction de route ou de barrages au Québec, mais parfois informations dans les devis
- Carrière et sablière: 10 mm/s (à la structure)
- Littérature: 25 mm/s lorsque présence d'argile sensible (Code norvégien NS 8141, Johansson et al., 2013, 25 mm/s lorsque sols sensibles: sables lâches et saturés, 50 mm/s autres sols (Charlie, 1985), 50,8 mm/s (USBM))

Fréquence des vibrations au sol (Hz)	Vitesse maximale permise (mm/s)
Fréquence $\leq 15$	12,7
$15 \leq \text{Fréquence} \leq 20$	19,0
$20 \leq \text{Fréquence} \leq 25$	23,0
$25 \leq \text{Fréquence} \leq 30$	30,5
$30 \leq \text{Fréquence} \leq 35$	33,0
$35 \leq \text{Fréquence} \leq 40$	38,0
Fréquence $\geq 40$	50,0





# GLISSEMENT DE LA ROMAINE



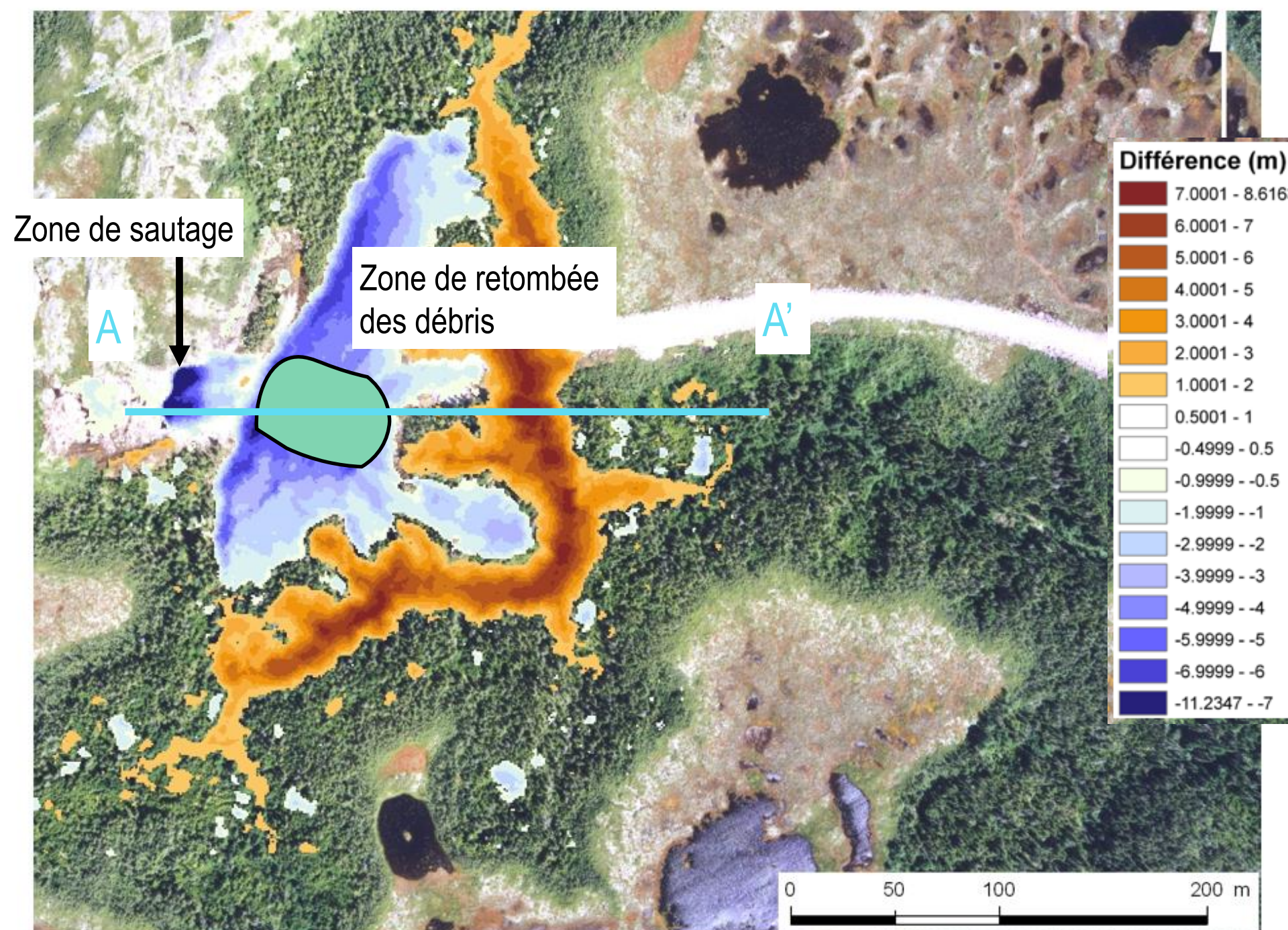
Sautage: 150 trous  
Délai: 17 ms, 25 ms  
Charge par trou moyenne: 83 kg

Glissement La Romaine (2009)





# GLISSEMENT DE LA ROMAINE

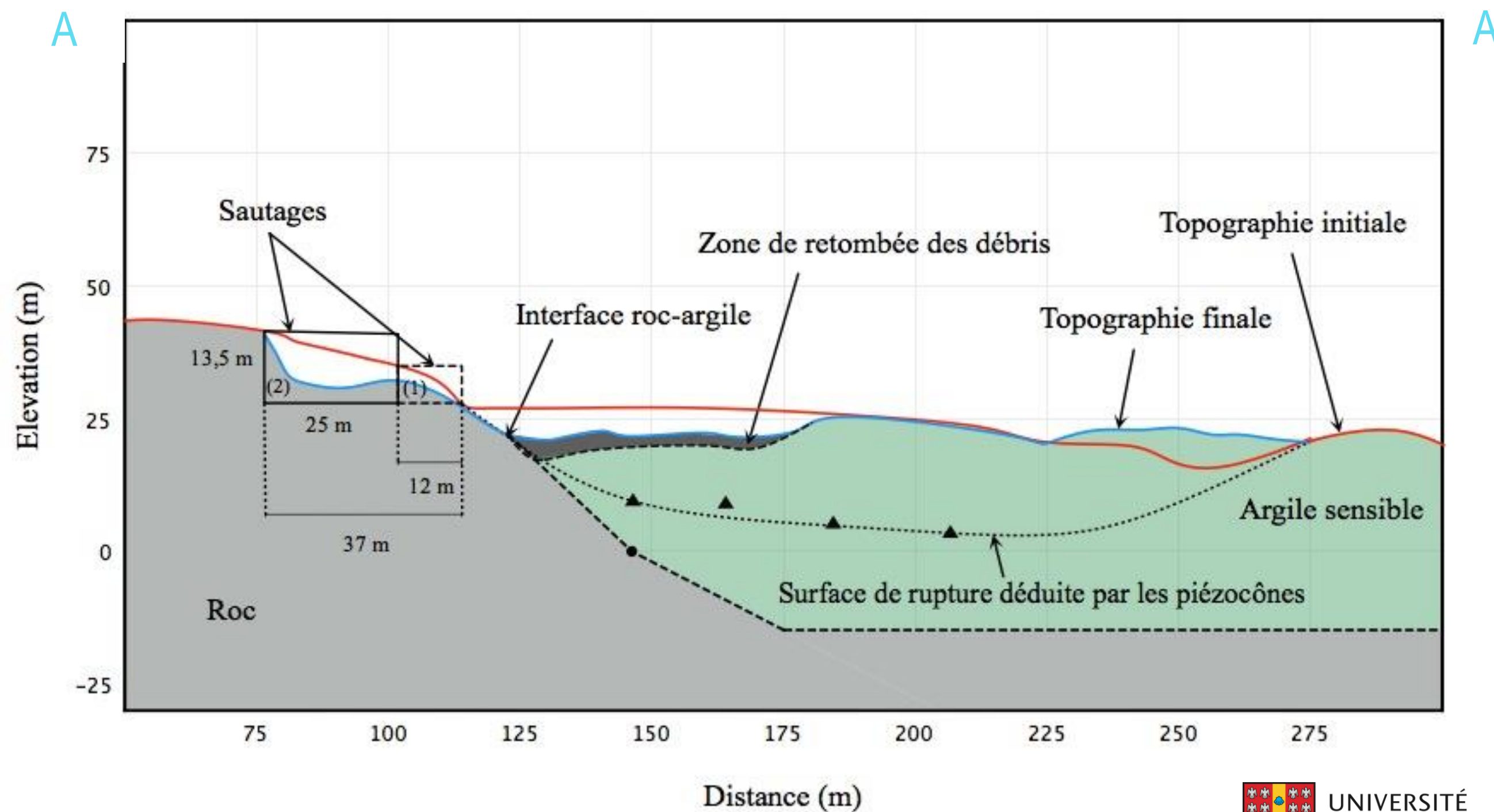


Locat et al., 2010





# GLISSEMENT DE LA ROMAINE







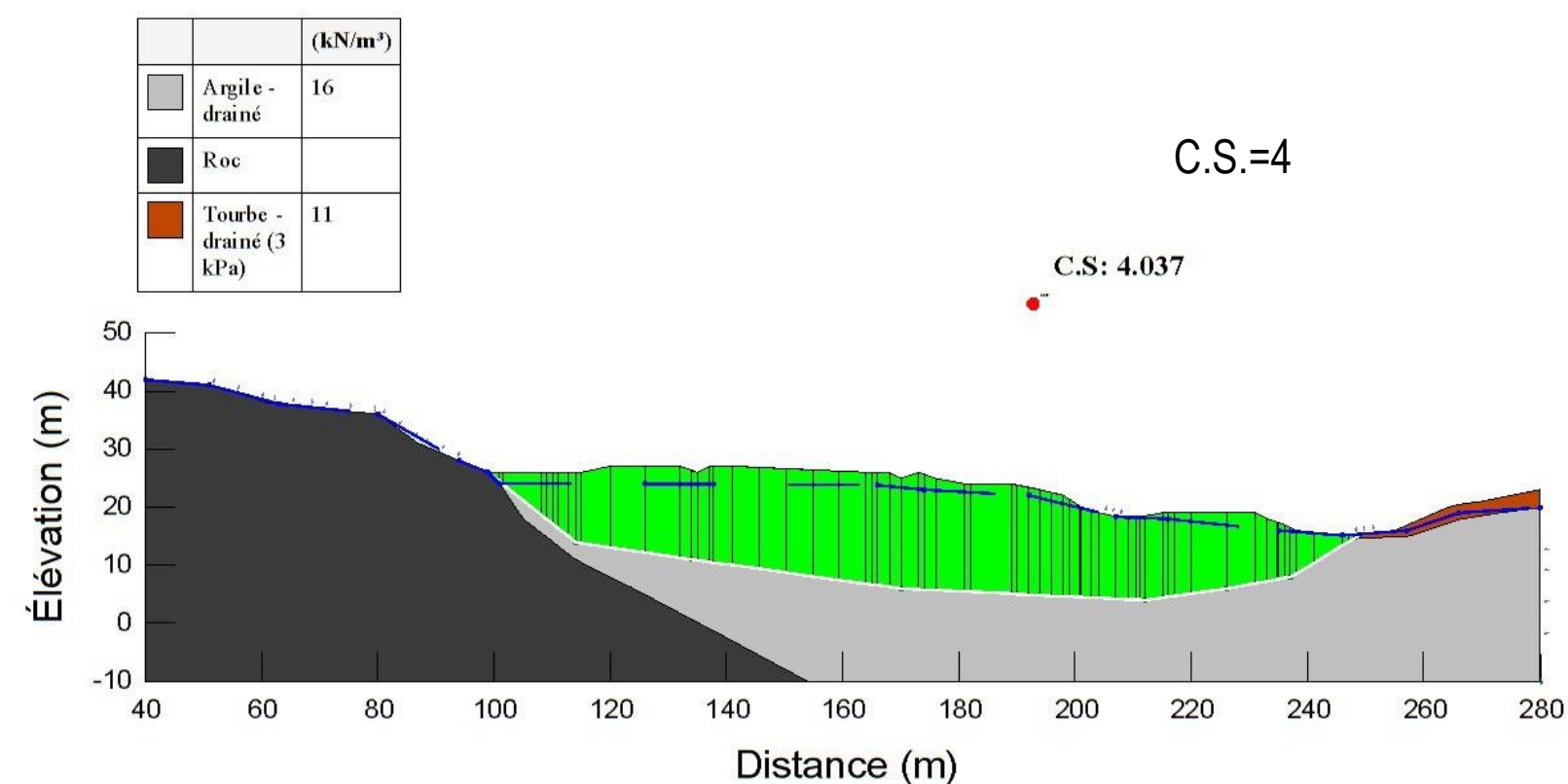
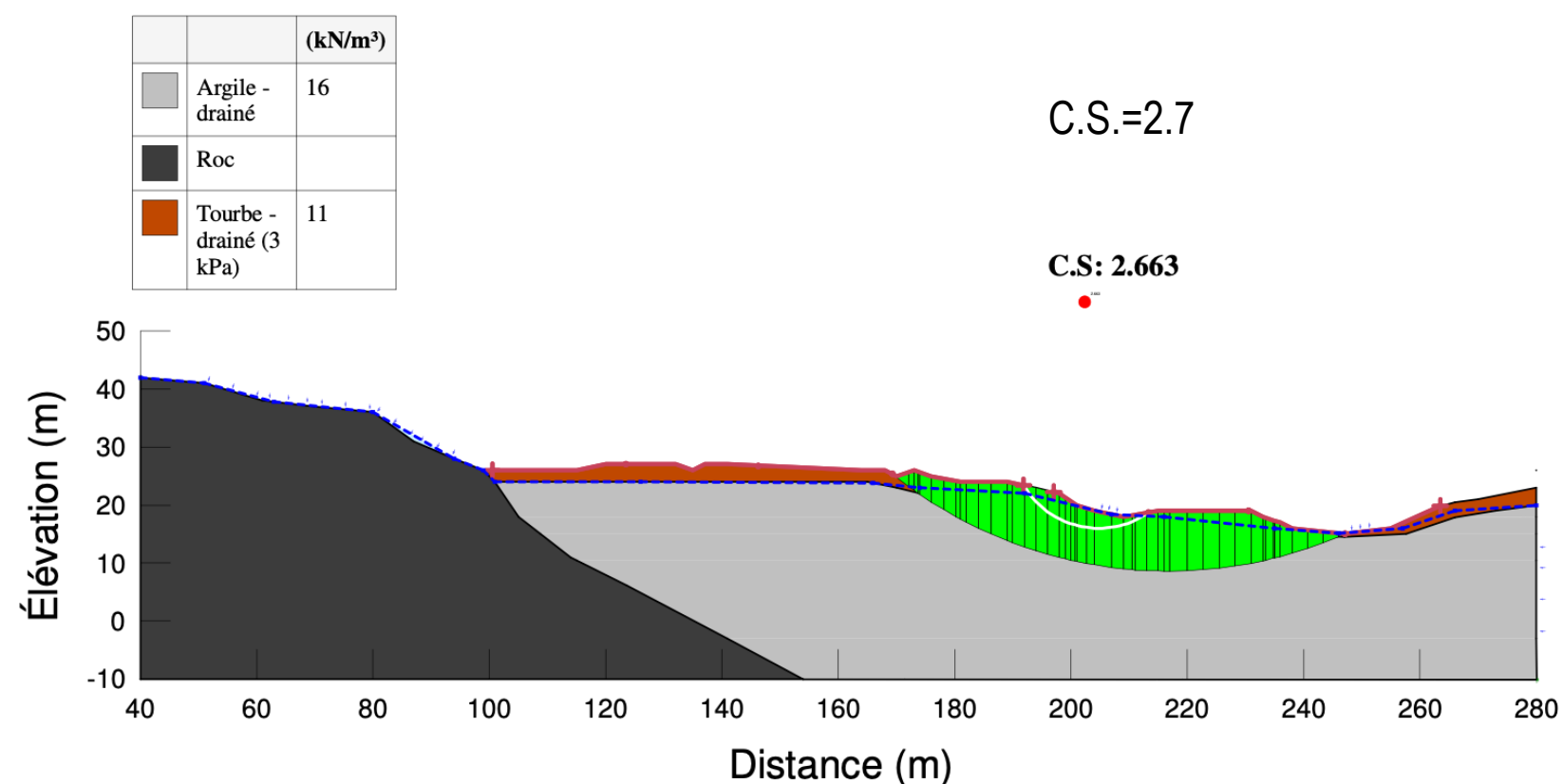
# ANALYSES PAR ÉQUILIBRE LIMITE (SANS CONSIDÉRER LES VIBRATIONS)

- Analyse long terme - conditions drainées
- Analyse court terme - conditions non drainées
- Analyse court terme avec surcharge
- Analyse court terme avec surcharge pour un C.S.=1
- Analyse court terme avec force d'impact



# ANALYSES PAR ÉQUILIBRE LIMITE

- Analyse long terme
- Paramètres de Lefebvre
- Analyse première rupture probable et sur la surface de rupture réelle





## ANALYSES PAR ÉQUILIBRE LIMITE

- Les analyses en non drainées incluant la surcharge montrent que le poids statique des débris ne peut pas avoir entraîné la rupture (C.S.=2.2 et 2.3)
- Pour obtenir un C.S.=1, il faudrait que la surcharge soit d'une hauteur de 4-5 fois plus importante
- En considérant la force d'impact, C.S.=1.8, donc l'impact n'est pas suffisant pour expliquer la rupture
- Analyse dynamique considérant les vibrations de sautage doit être réalisée pour comprendre le glissement





# DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE SIMULATION DU SAUTAGE

- Simulation numérique de sautage: tâche délicate et complexe
- Des méthodes sont employées pour simuler une explosion unique avec une fonction de pression
- Nécessaire de développer une méthode applicable pour le type de sautage multi-trous
- Problématique: pas d'enregistrement du sautage à la Romaine donc nécessaire d'utiliser un autre cas pour calibrer la méthode



# PRÉSENTATION DU SITE EASTMAIN-1

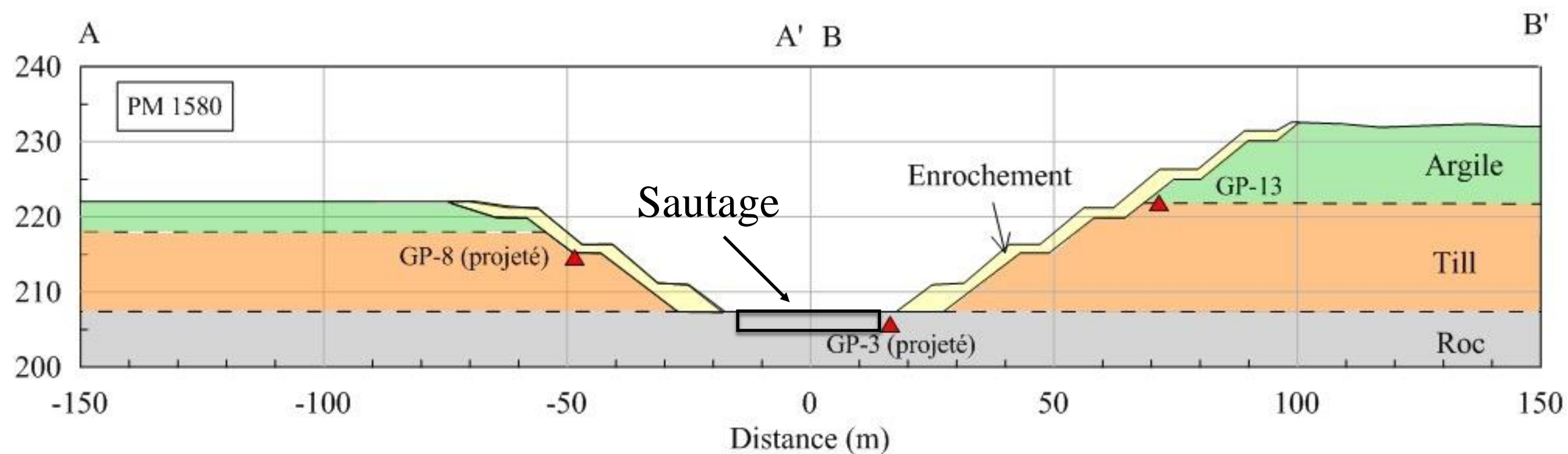


- Sautages réalisés à la base de talus d'argile sensible
- Contrôle des vibrations de sautage
- Pentes instrumentées par des géophones et des piézomètres





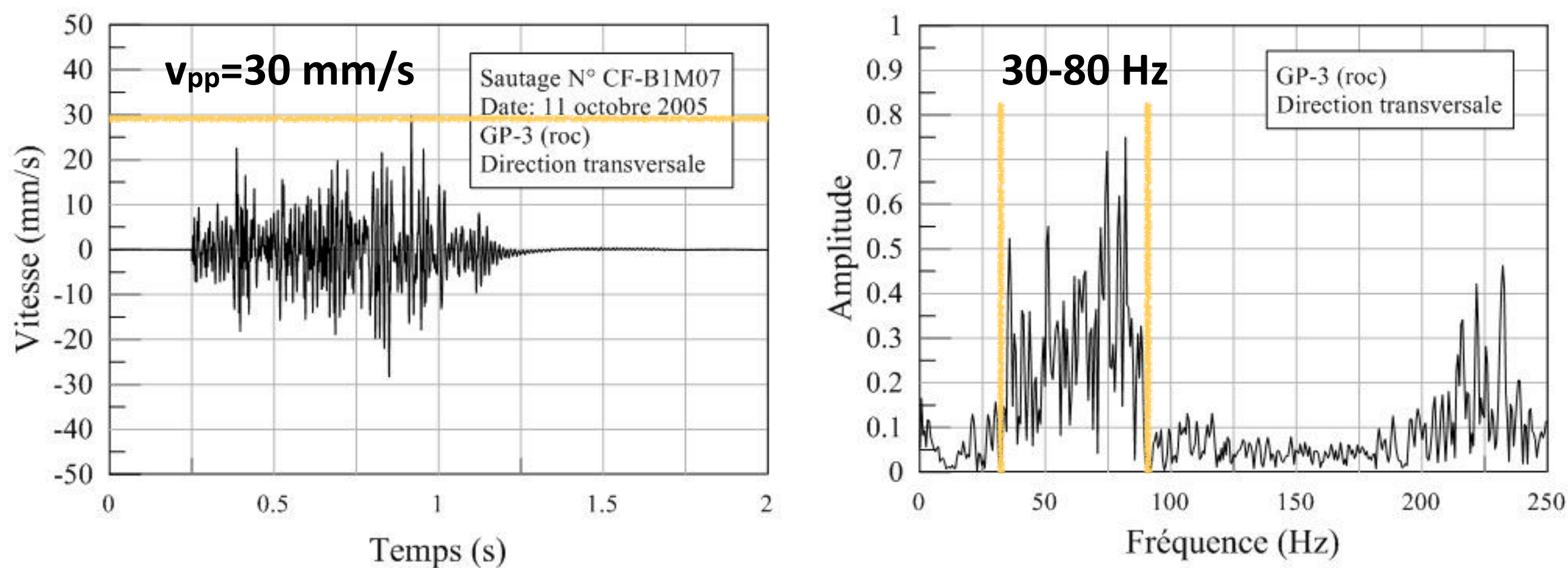
# SIMULATION DU SAUTAGE CAS-EASTMAIN-1







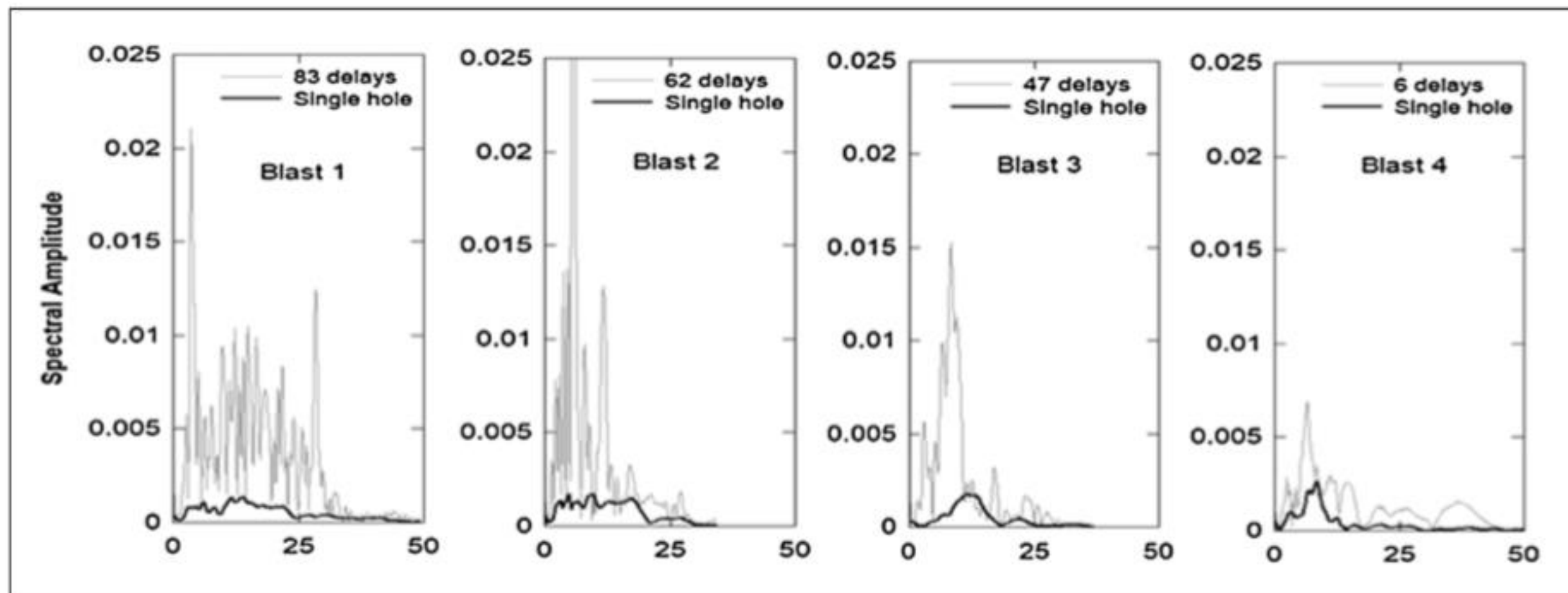
# SIMULATION DU SAUTAGE - SIGNAL BRUT ROC



GP-3 - Enregistrement au roc à 22 m du sautage

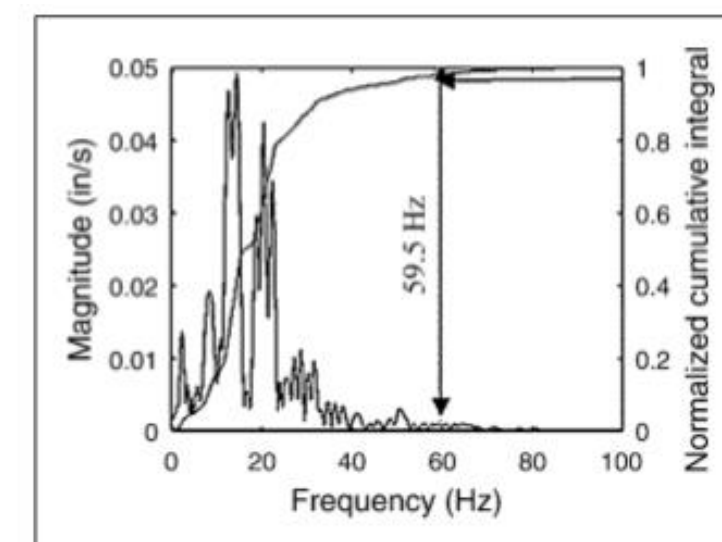


# REPRÉSENTATIVITÉ DU SIGNAL D'EASTMAIN (LITTÉRATURE)



**Figure 2.** Comparison between blast event magnitude spectrum and a single blasthole magnitude spectrum for four blasts in the transverse vibration direction.

Li et Silva-Castro (2019)



**Figure 1.** Example of effective frequency limit.



UNIVERSITÉ  
LAVAL

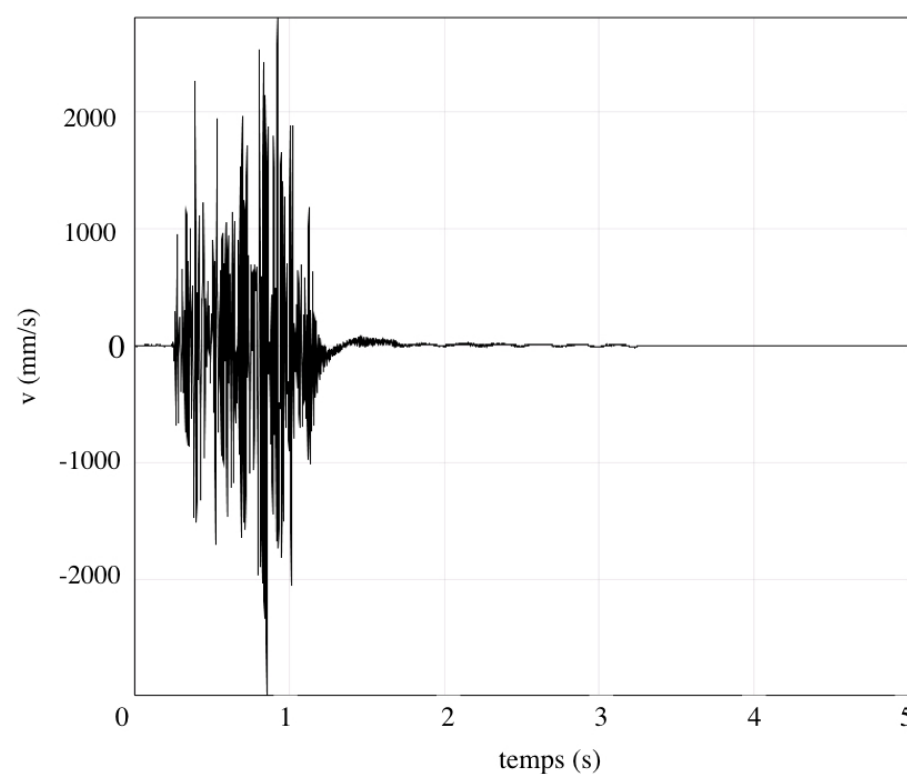
Transports  
Québec





# SIMULATION DU SAUTAGE SIGNAL D'ENTRÉE ROC

- Signal vitesse temps



FLAC  
→

- fonction P(t)

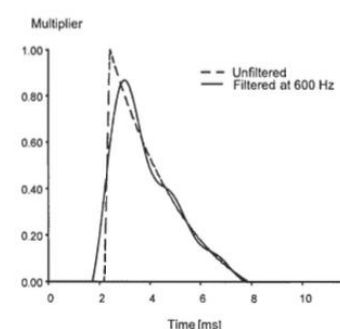
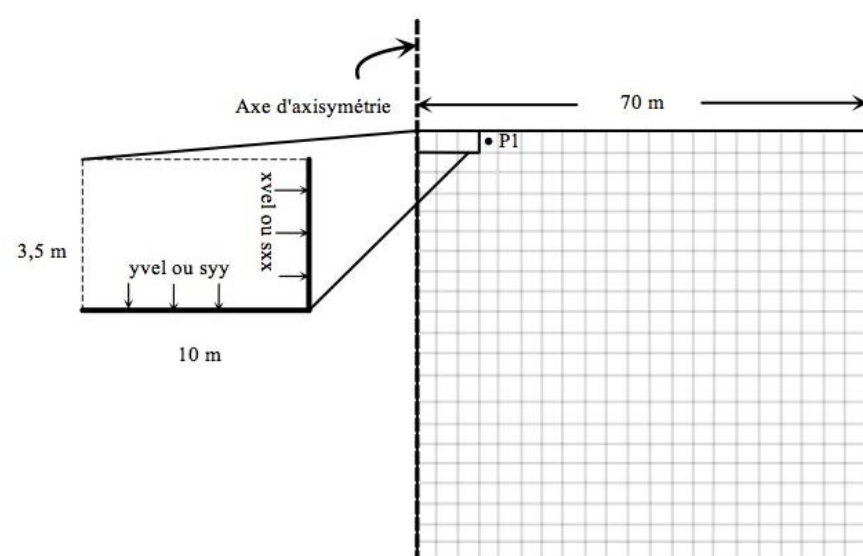
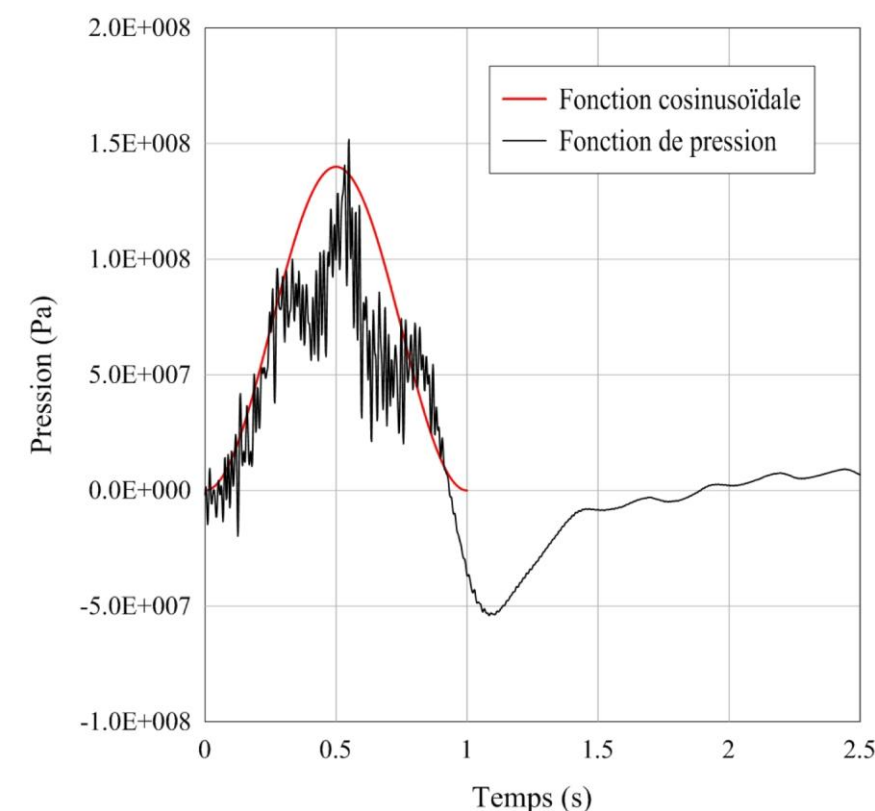


Figure 3 Unfiltered and filtered dynamic load multiplier versus time.

Olofson et al. (1999)

$$P_{50} = f \cdot \rho_c \cdot \beta \cdot \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n}$$

$$\Delta l \leq \lambda / 10$$

$$\lambda \leq v_s / f$$



UNIVERSITÉ  
LAVAL

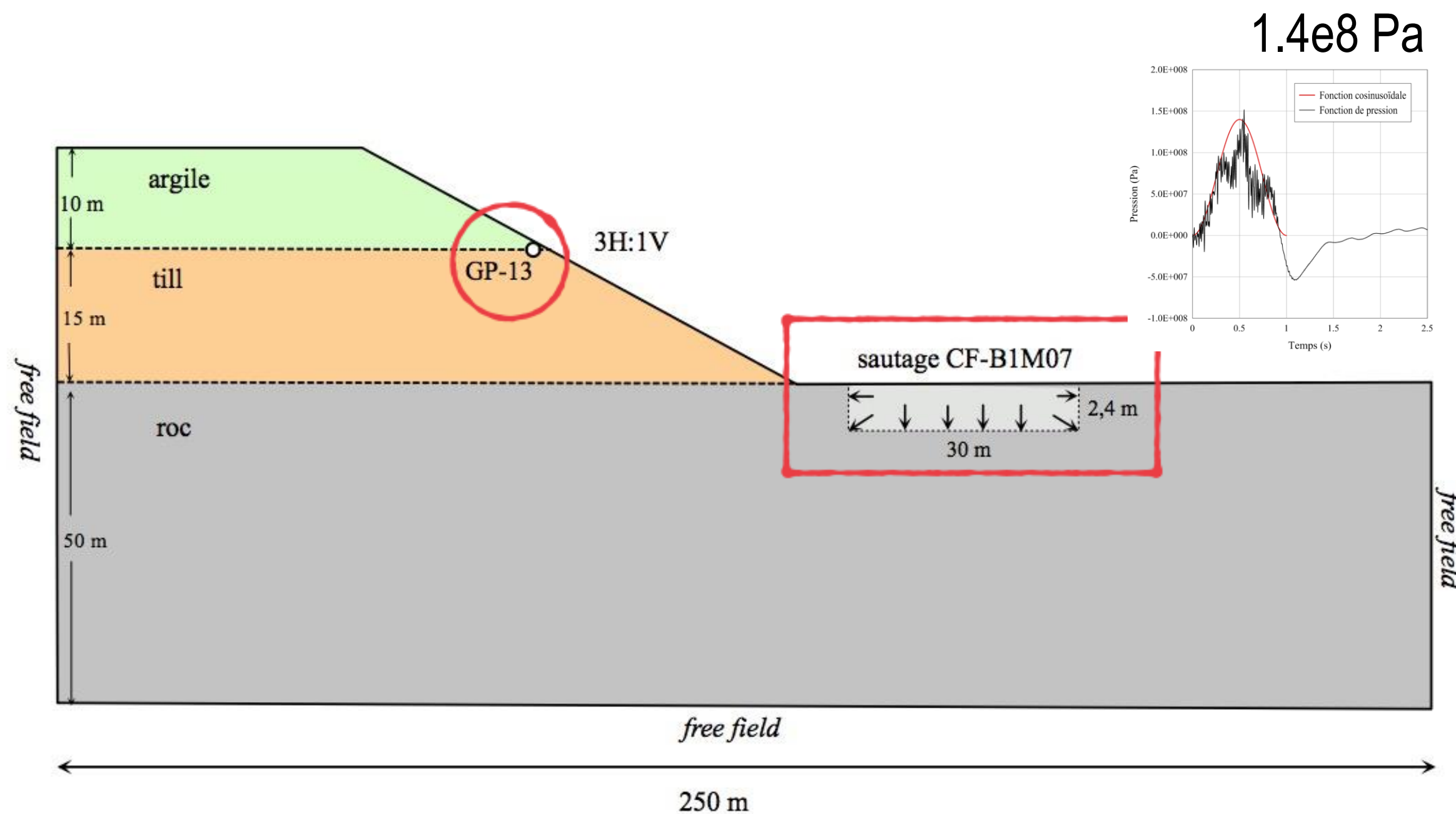
Transports  
Québec





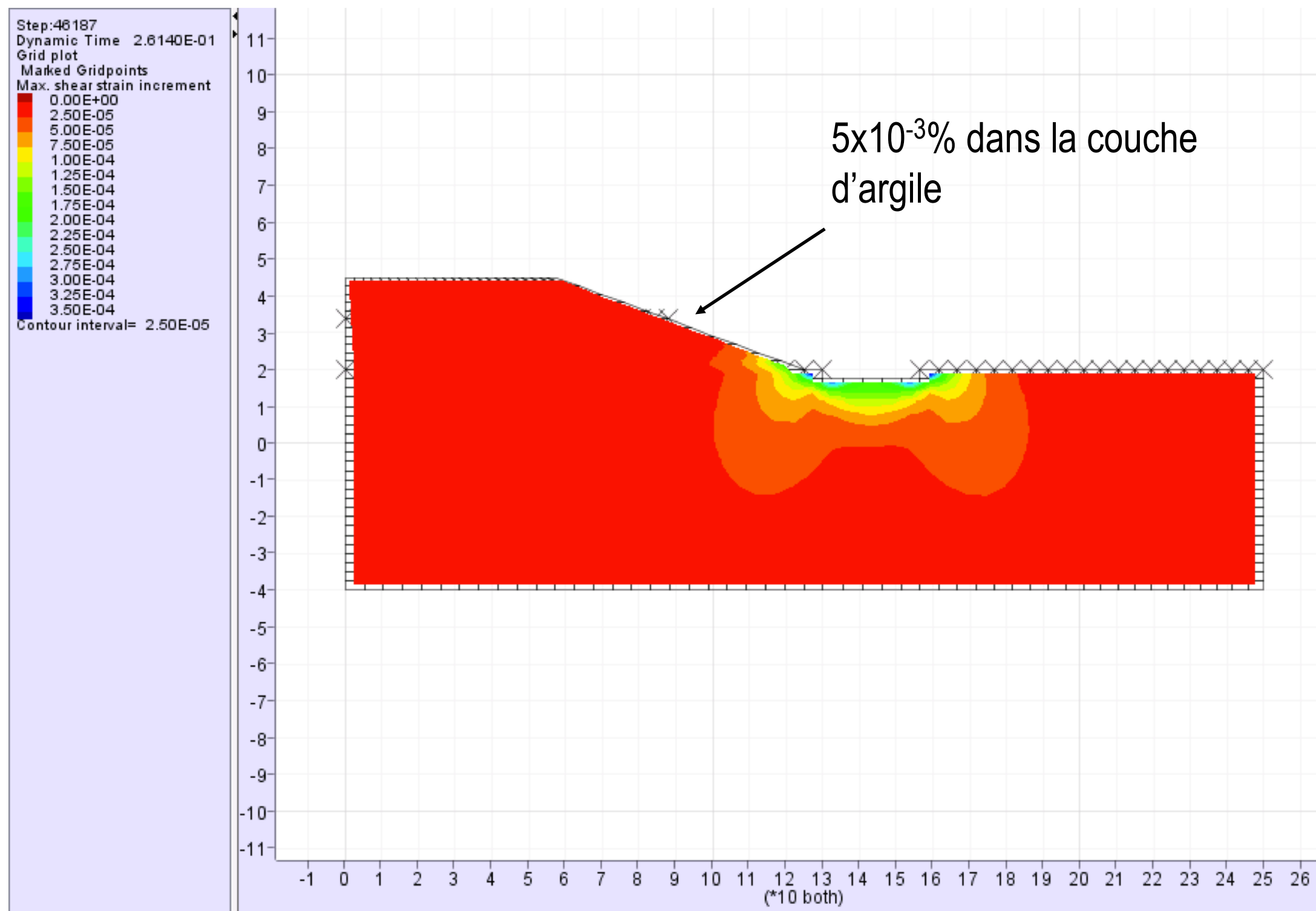


# SIMULATION NUMÉRIQUE DU SAUTAGE À EASTMAIN



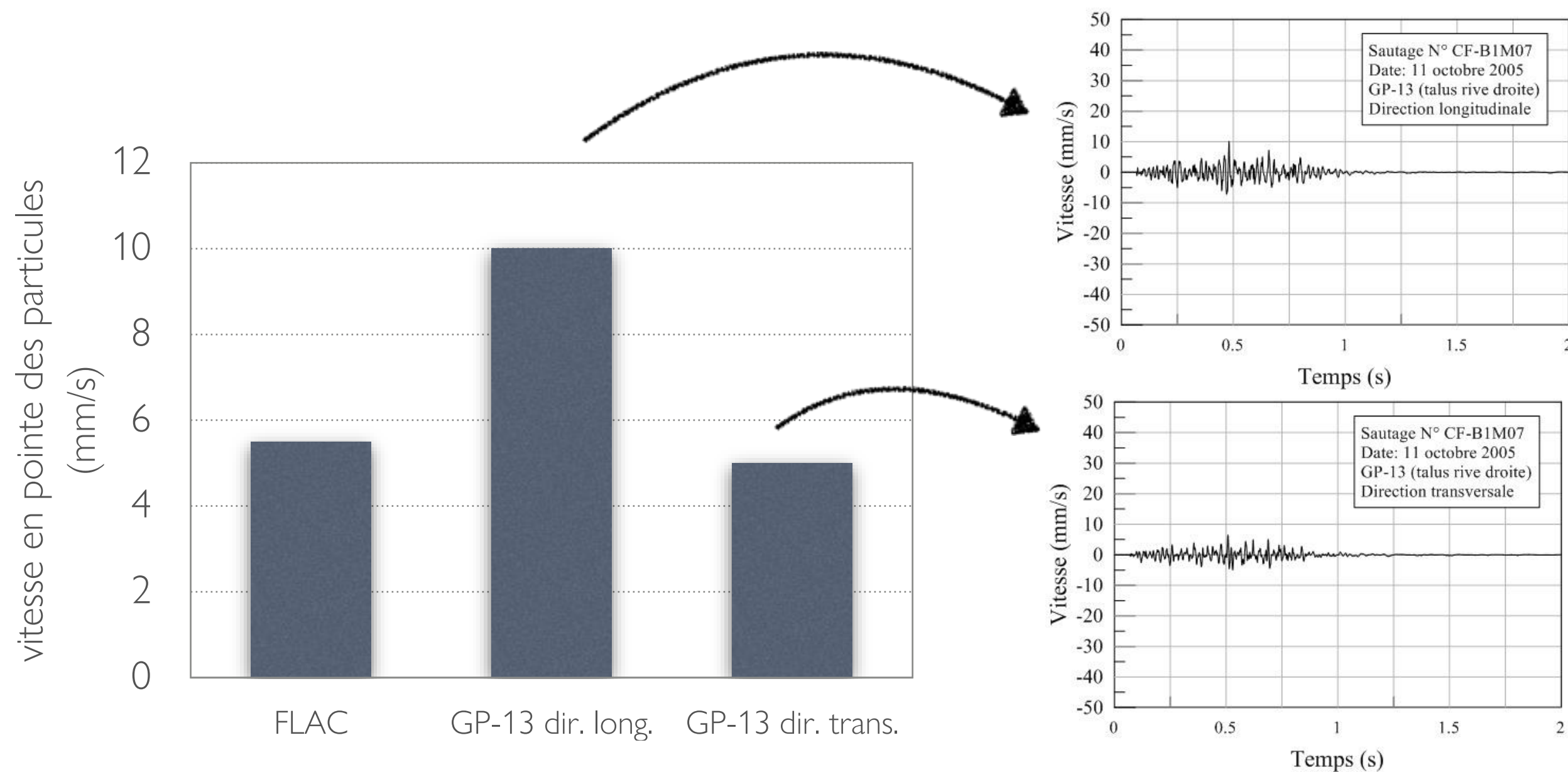


# RÉSULTATS EASTMAIN - DÉFORMATIONS DE CISAILLEMENT MAXIMALES





# RÉSULTATS EASTMAIN - VITESSE EN POINTE DES PARTICULES



UNIVERSITÉ  
LAVAL

Transports  
Québec





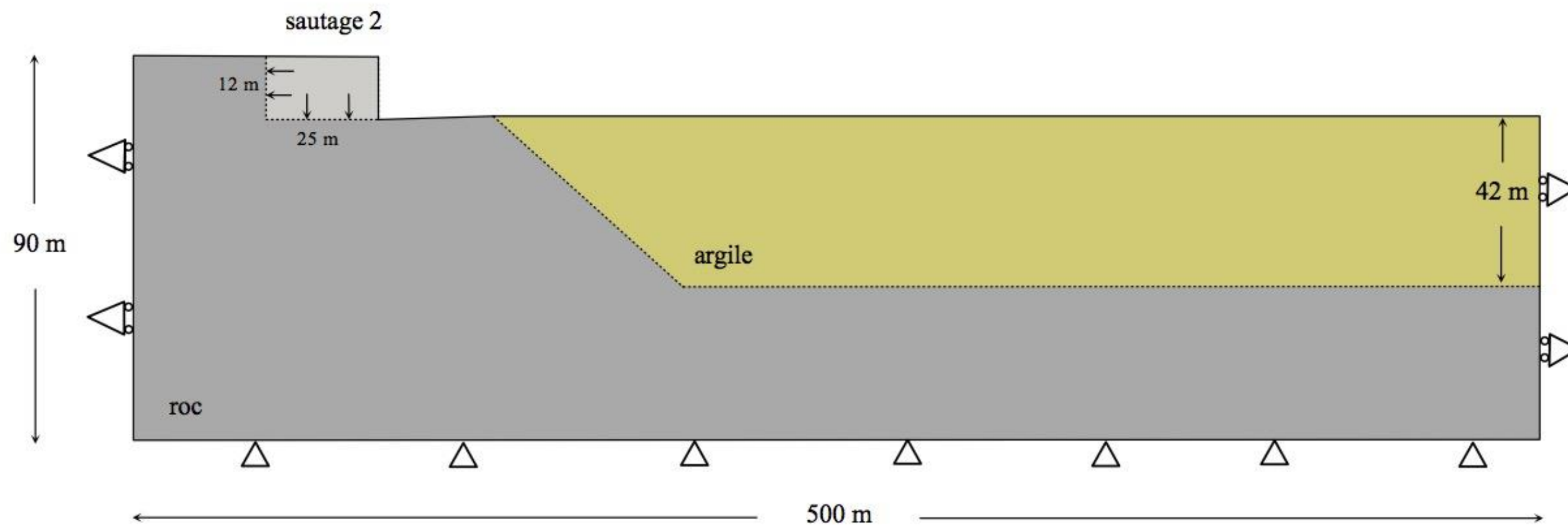


# DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE SIMULATION DU SAUTAGE

- Méthode développée pour sautage multi-trous, fonction  $P(t)$
- Relativement simple et évite de longs temps de calcul car utilisation d'un maillage grossier
- Validation: les résultats obtenus avec le cas de Eastmain sont représentatifs de ce qui a été mesuré sur le terrain
- Application de cette méthode au cas de La Romaine



# MODÈLE-CONDITIONS DU SAUTAGE





## DONNÉES D'ENTRÉE

- Compte tenu de la loi de comportement choisie: roc linéaire élastique et argile non-linéaire élastique incrémentale avec critère de rupture
  - Module à petites déformations - piézocône sismique
  - Loi de non-linéarité - essais à la colonne de résonance
  - Résistance au cisaillement - courbe DSS, scissomètre, piézocône
- Pression maximale induite par le sautage





## DONNÉES D'ENTRÉE

- Pression induite par le sautage (TM5-855-1)

- Impédance du roc 12 500 000 Pa s/m
- Charge par délai
- R=1 m

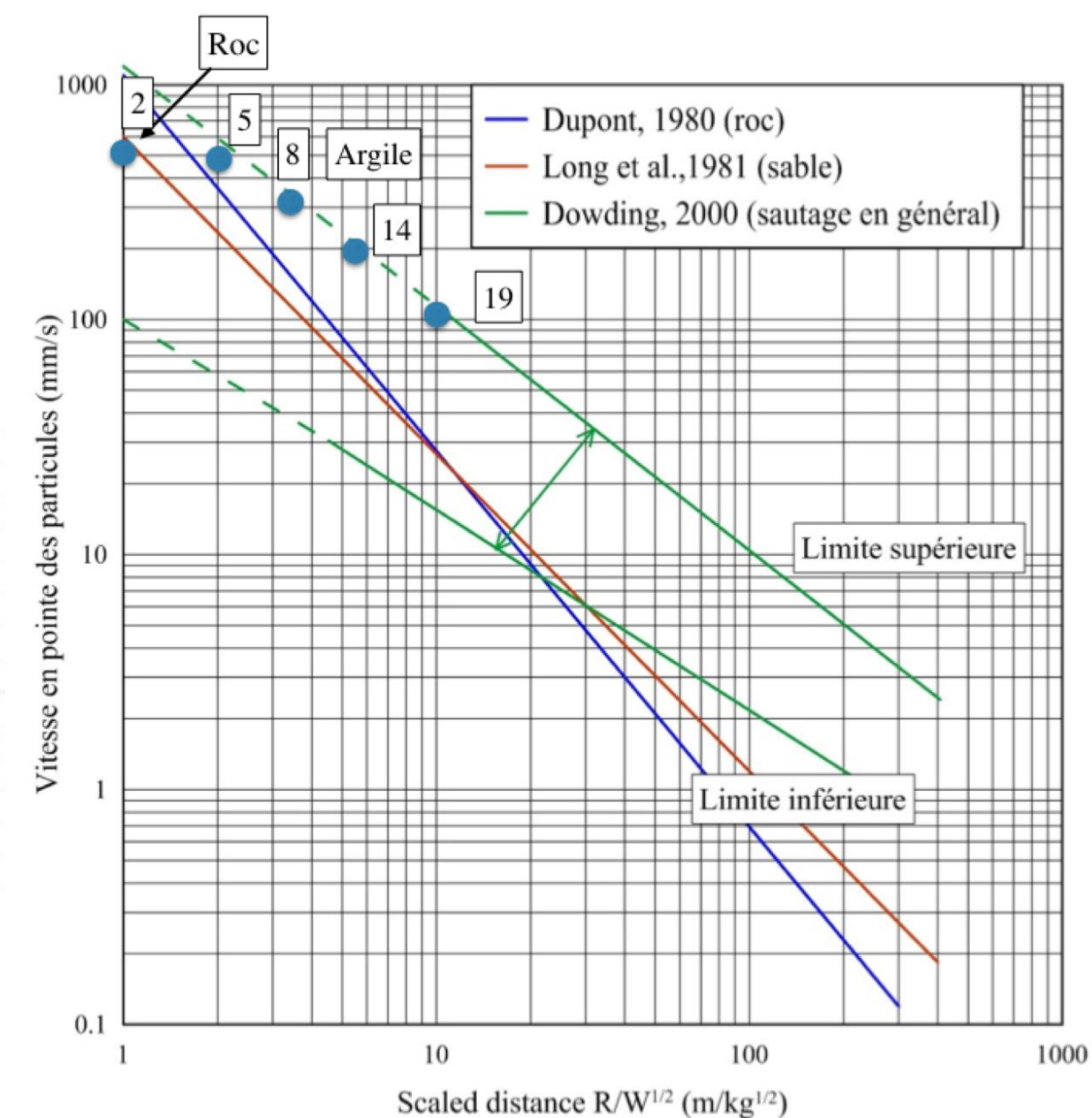
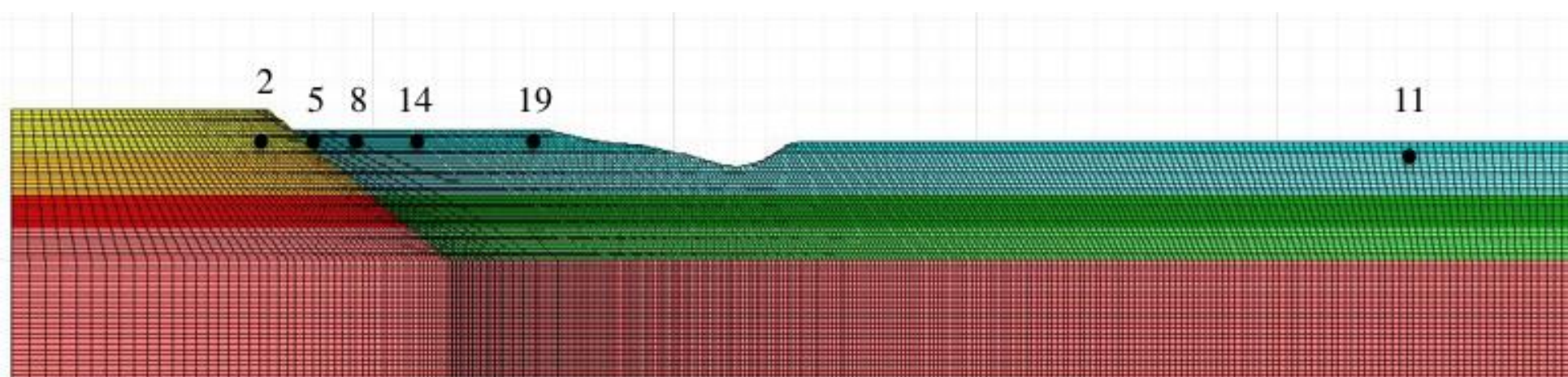
$$P_{50} = f \cdot \rho_c \cdot \beta \cdot \left( \frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-n}$$

- 1,35e9 Pa utilisé comme pression maximale (incluant un facteur de réduction de 50%)



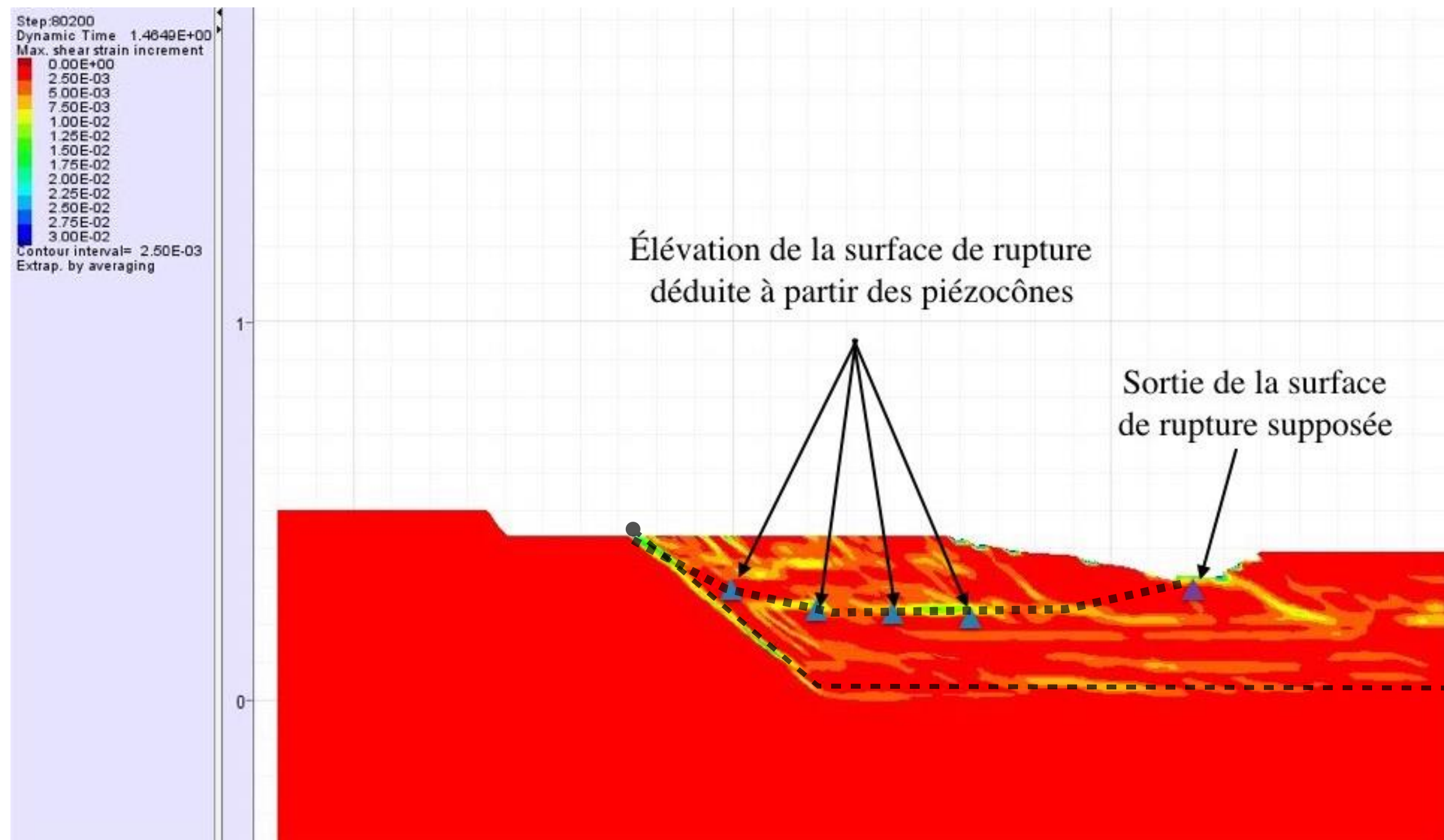
# RÉSULTATS - VITESSE EN POINTE DES PARTICULES

- Les vpp calculées sont beaucoup plus grandes (500 mm/s) que celles recommandées dans la littérature (25 mm/s)





# RÉSULTATS - DÉFORMATIONS DE CISAILLEMENT







## ANALYSE DU CAS DE LA ROMAINE

- 2% de déformation de cisaillement atteint dans l'argile sensible par l'analyse dynamique
- Les zones de déformation supérieures à 1% coïncident avec la profondeur et la forme de la surface de rupture réelle
- Dépassement du pic de résistance implique anti-écrouissage et initiation de la rupture
- Les vibrations suffisent pour avoir généré un glissement par rupture progressive, mais l'impact des débris a pu contribuer comme facteur aggravant la stabilité



## CONCLUSION GÉNÉRALE

- Autres cas recensés de glissements de terrain dans les argiles sensibles suite à du sautage dans le roc
- Une méthode de simulation numérique a été développée et appliquée avec succès au cas de La Romaine
- Les vibrations du sautage effectué à La Romaine étaient suffisantes pour déclencher le glissement
- Bonne cohérence entre les approches semi-empiriques et numériques pour l'estimation des vpp
- Des recommandations pratiques ont été proposées suite à ce travail de recherche
- Dans l'est du Canada, cette étude est la première bien documentée d'un glissement de terrain déclenché par sautage