

Progetto transfrontaliero Italia-Francia ALCOTRA
Projet transfrontalier Italie-France ALCOTRA



RISBA RISCHIO DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI
RISQUES DES BARRAGES

REPORT FINALE

Evaluation de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à- vis de l'aléa sismique

Action 2.3

S. MERCKLE, G. VEYLON, A. DELVALLEE
Irstea
V. DE BIAGI
Politecnico di Torino



Sommaire de la présentation :

1. Aléa sismique réglementaire en Italie et en France
 2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique
 - Étude de sensibilité
 - Etude d'un ouvrage réel
 3. Principaux enseignements, mise en perspective
-

1. Aléa sismique réglementaire en Italie et en France : application d'un même principe

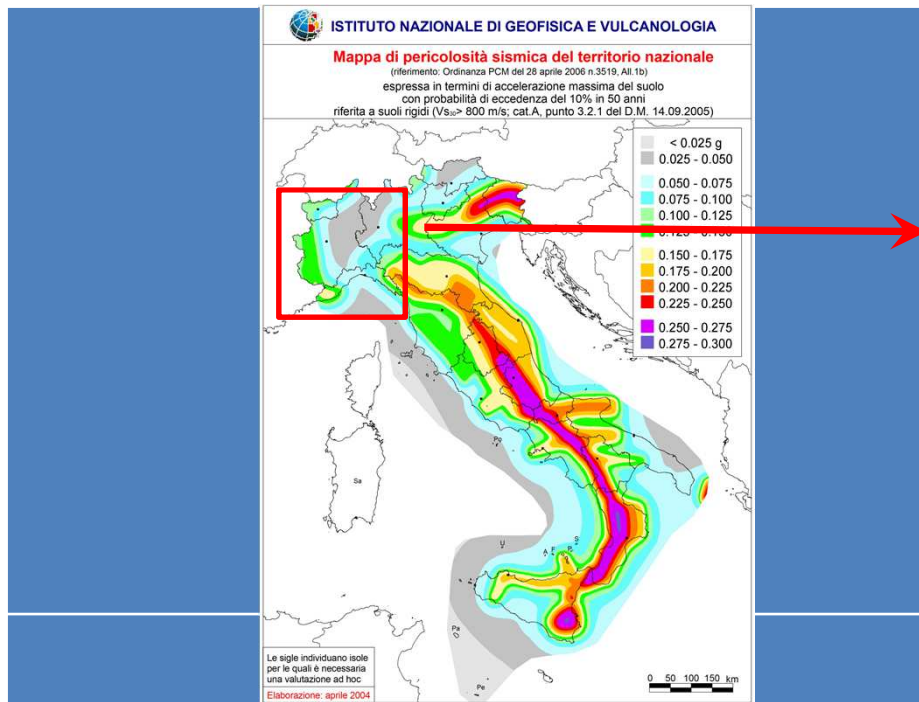
- Les barrages sont répartis en **4 classes d'importance**.
- Le niveau d'exigence en matière de dimensionnement, d'auscultation,... est **proportionnel à l'importance de l'ouvrage**.
- Du point de vue de l'aléa sismique, cela conduit à adapter la **période de retour** de l'événement considéré à la classe de l'ouvrage.

<u>France</u>		<u>Italie</u>	
Classe de barrage	Période de retour associée (ans)	Classe de barrage	Période de retour associée (ans)
A	5 000	Stratégique	2475
B	2 500	Graves conséquences – grands barrages	2475
C	1 000	Graves conséquences – barrages moyens	1 460
D	500	Importance normale	975

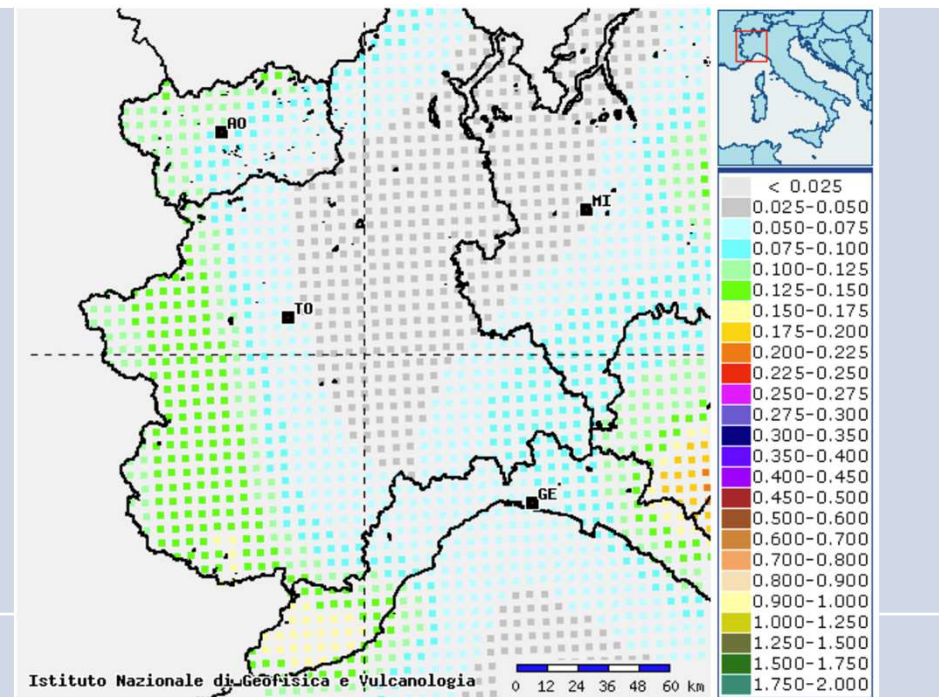
Période de retour de l'aléa sismique pris en compte pour l'évaluation de la sécurité (ELU / SLC) des barrages en France et en Italie.

1. Aléa sismique réglementaire en Italie et en France : carte de définition de l'aléa « régional »

- L'aléa sismique est défini sur le territoire national – en Italie, grille de points → paramètre du spectre de réponse pour T jusqu'à 2 475 ans



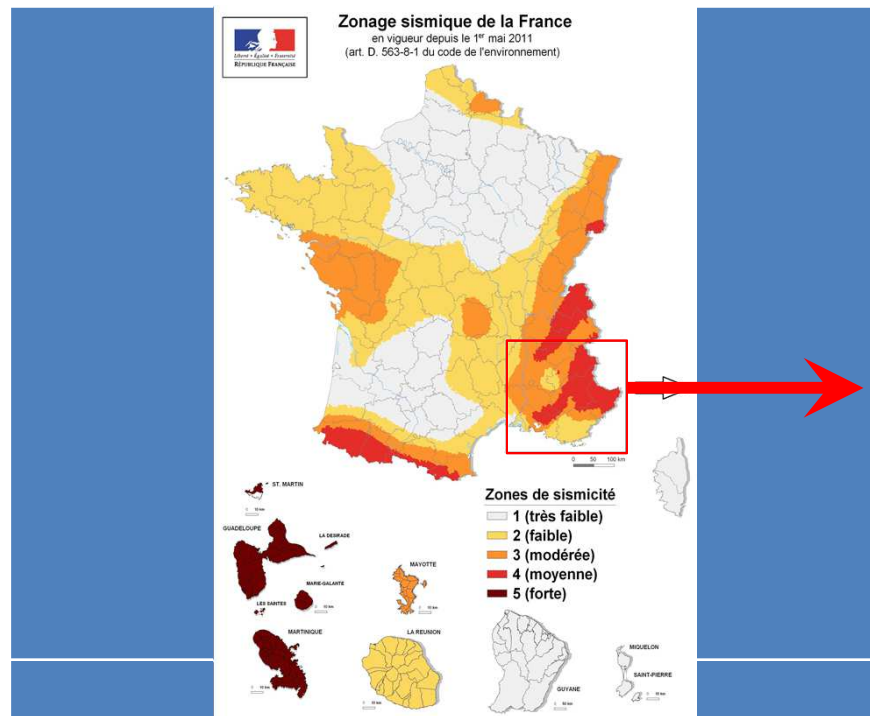
Carte d'iso-accélération avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (T = 475 ans).



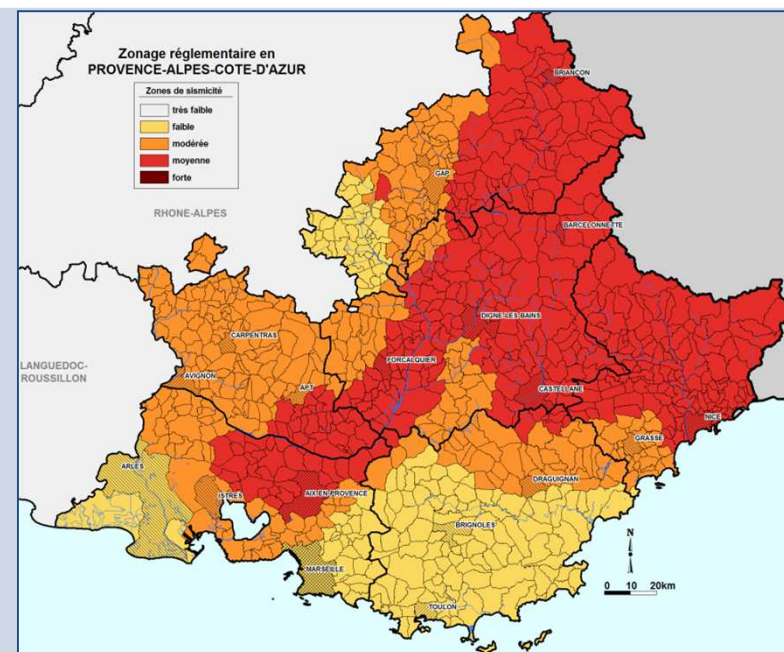
Carte d'iso-accélération avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (T = 475 ans) – Zoom sur le Nord-Ouest de l'Italie

1. Aléa sismique réglementaire en Italie et en France : carte de définition de l'aléa « régional »

- L'aléa sismique est défini sur le territoire national – en France métropolitaine 4 zones de sismicité, découpage communal
 → paramètre du spectre de réponse pour T jusqu'à 5 000 ans

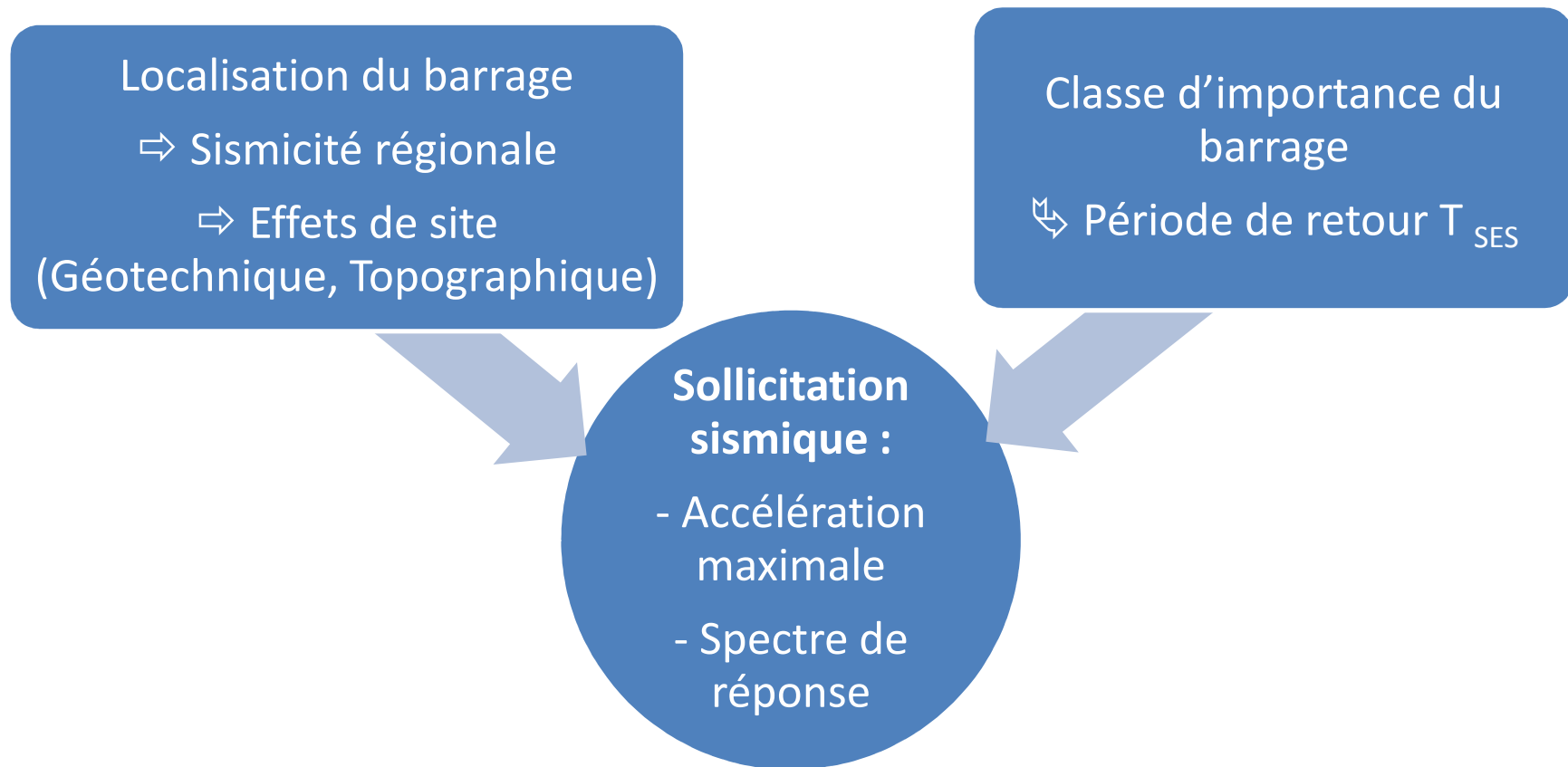


Carte d'iso-accélération avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (T = 475 ans).



Carte d'iso-accélération avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans (T = 475 ans) – Zoom sur le Nord-Ouest de l'Italie

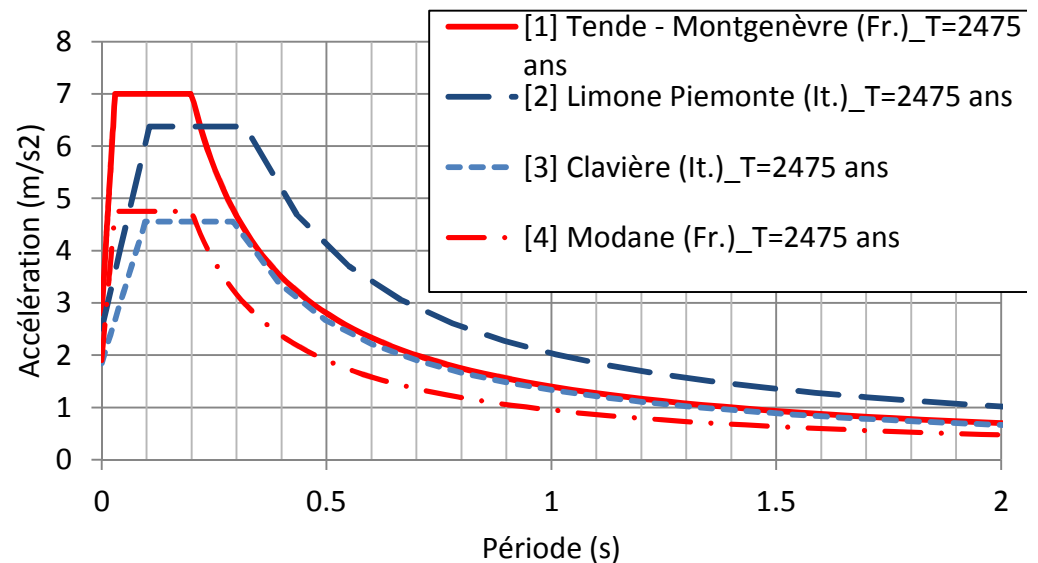
1. Aléa sismique réglementaire en Italie et en France : application d'un même principe



1. Aléa sismique réglementaire en Italie et en France : comparaisons en sites frontaliers

- Observation d'ensemble : pour $T = 2\,475$ ans, les valeurs d'accélération maximale au rocher sont dans l'intervalle
 [0,19 g ; 0,30 g] en Italie
 [0,19 g ; 0,28 g] en France
- Comparaisons à l'échelle communale :

Compa- raison	Italie	France
①	CLAVIERE $a_g = 1,88 \text{ m/s}^2$ Spectre réponse [3]	MONTGENEVRE $a_g = 2,8 \text{ m/s}^2$ Spectre réponse [1] MODANE Spectre [4] $a_g = 1,9 \text{ m/s}^2$
②	LIMONE PIEMONTE $a_g = 2,51 \text{ m/s}^2$ Spectre réponse [2]	TENDE $a_g = 2,8 \text{ m/s}^2$ Spectre réponse [1]



2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Spécificités des retenues d'altitude :

- La **hauteur** maximale des remblais est généralement inférieure à 20 m ;
- Les **pent**es mises en œuvre sont généralement comprises entre 1V/3H et 1V/2H (voire parfois plus raides) ;
- Une large majorité d'ouvrages est fondée sur une **fondation** résistante (moraine ou rocher) ;
- Les matériaux des **remblais** sont constitués majoritairement de moraines et de schistes.

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Stabilité du remblai sous sollicitation sismique :

Méthodes de calcul [1/3]

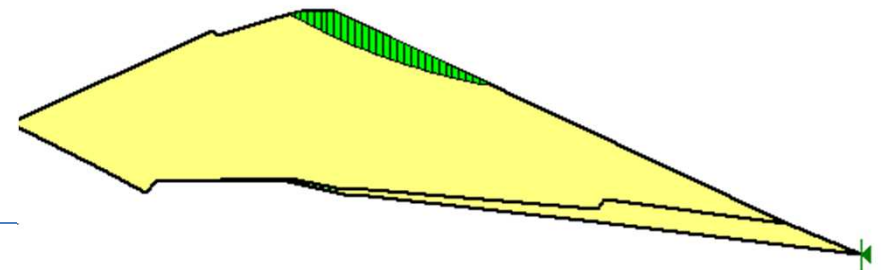
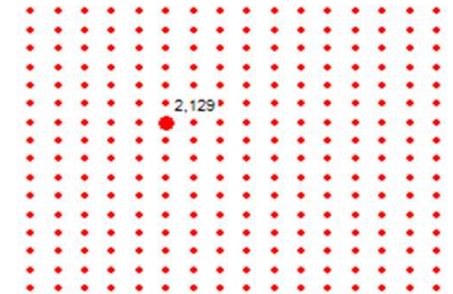
- Méthode pseudo-statique

$$F = \frac{2}{3} \times \frac{a_{max}}{g} \times W$$

Résultat :

Facteur de Sécurité

FS > ou < 1 ?

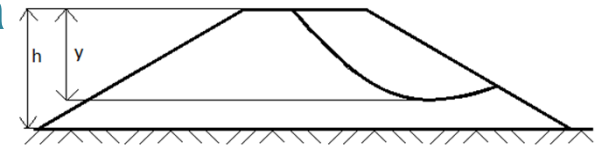


2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Méthodes de calcul [2/3]

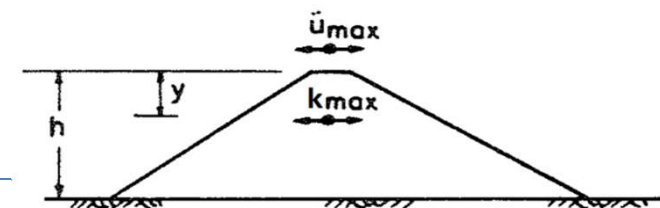
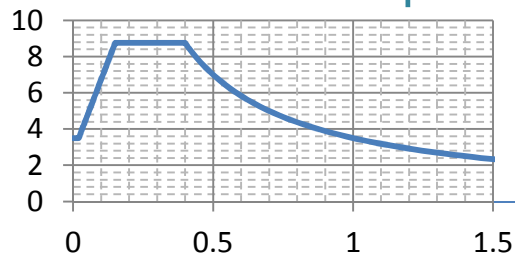
- Méthode dynamique simplifiée (Seed et Makdisi)

1. **Choix d'un cercle de glissement** à la profondeur « y », caractérisé par son accélération critique k_y (tq. FS=1).



2. Prise en compte du **comportement vibratoire** du remblai, évolution des propriétés G et D en fonction de la distorsion (amplification de l'accélération, utilisation de formules et abaques)

↳ Evaluation de l'accélération maxi en crête [\ddot{u}_{\max}], et à la profondeur « y » [k_{\max}].



2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Méthodes de calcul [2/3]

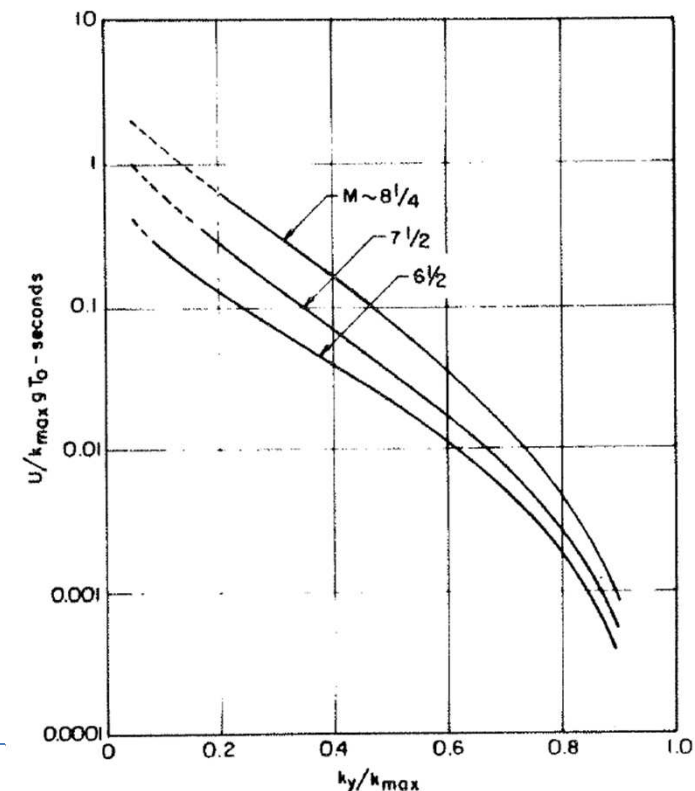
- Méthode dynamique simplifiée (Seed et Makdisi)

3. Le ratio :

$$\frac{\text{accélération critique}}{\text{accélération maximale}} = \frac{k_y}{k_{max}}$$

donne accès aux déplacements permanents à la profondeur « y ».

→ déplacements acceptables ?
Cf. critères de performance à fixer
ex. : déplacement < 1/3 revanche



2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

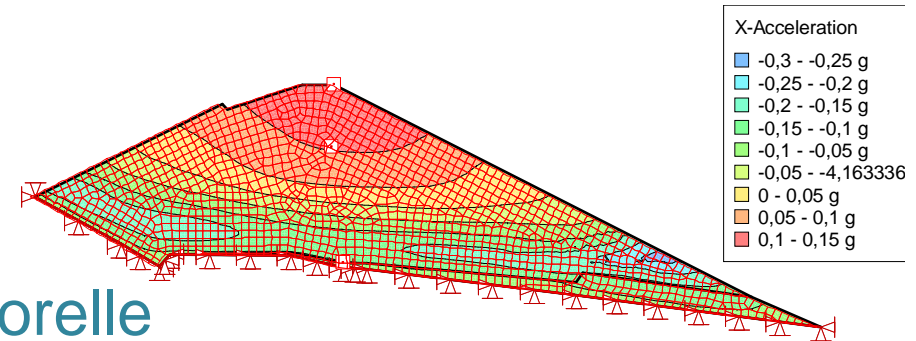
Méthodes de calcul [3/3]

- Méthode dynamique temporelle

Calcul aux éléments finis



- Utilisation des accélérogrammes spécifiques à la zone, générés par l'ISTerre
- Modèle linéaire équivalent, utilisation des courbes de Seed & Makdisi ou de la littérature pour le comportement du remblai
 - ➔ tenseur des contraintes dans le remblai, pour chaque pas de temps t_i de l'accélérogramme utilisé



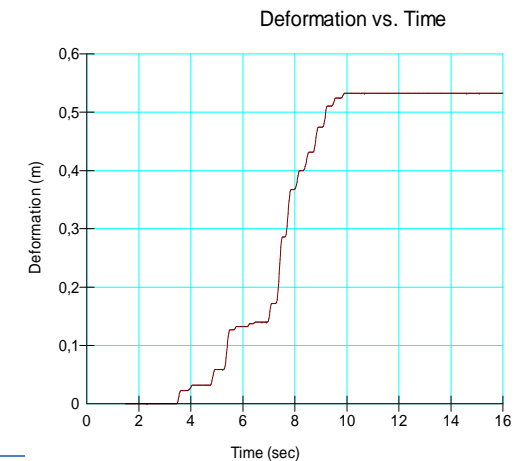
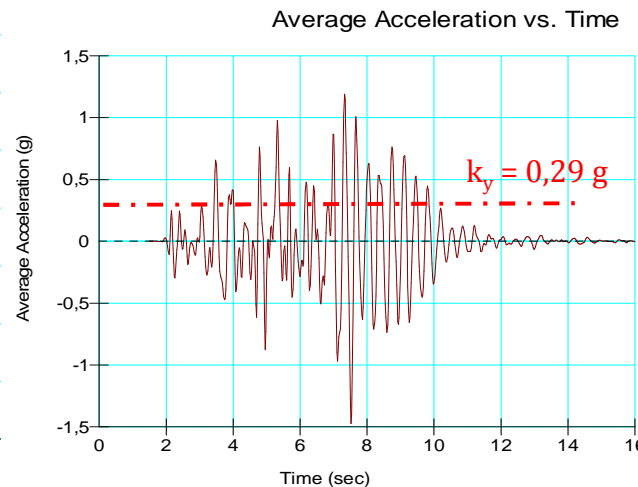
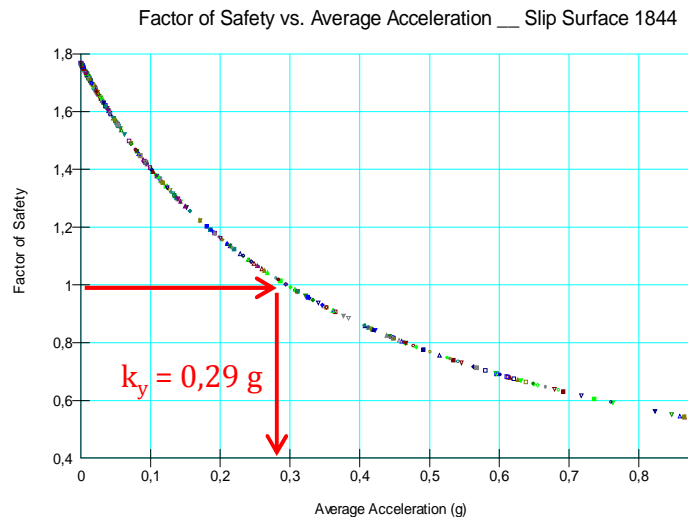
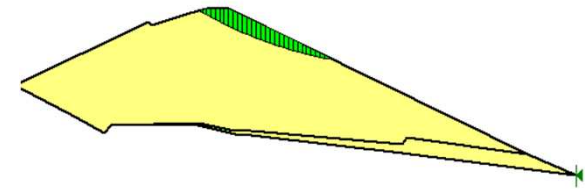
2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Méthodes de calcul [3/3]

- Méthode dynamique temporelle : Calcul aux E.F.



➤ Post-traitement : analyse de Newmark → déplacements acceptables ?



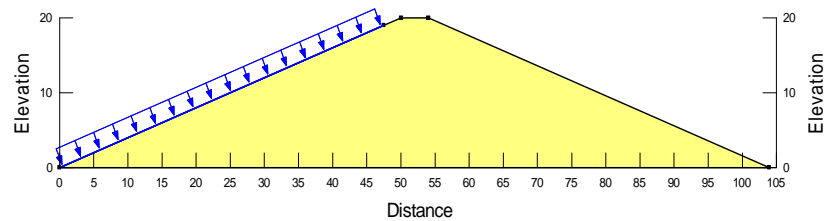
2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Démarche suivie

- **Etude de sensibilité** pour obtenir et comparer les résultats des différentes méthodes de calcul sur diverses configurations représentatives des retenues d'altitude :
 - { géométrie (H, pente) }
 - { propriétés des matériaux (c' , φ' , G_{\max}) }
 - { aléa sismique région alpine – T=5000 ans, zone 4 }
- **Etude d'un ouvrage réel**, pour confronter nos hypothèses à des caractéristiques mesurées

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Etude de sensibilité

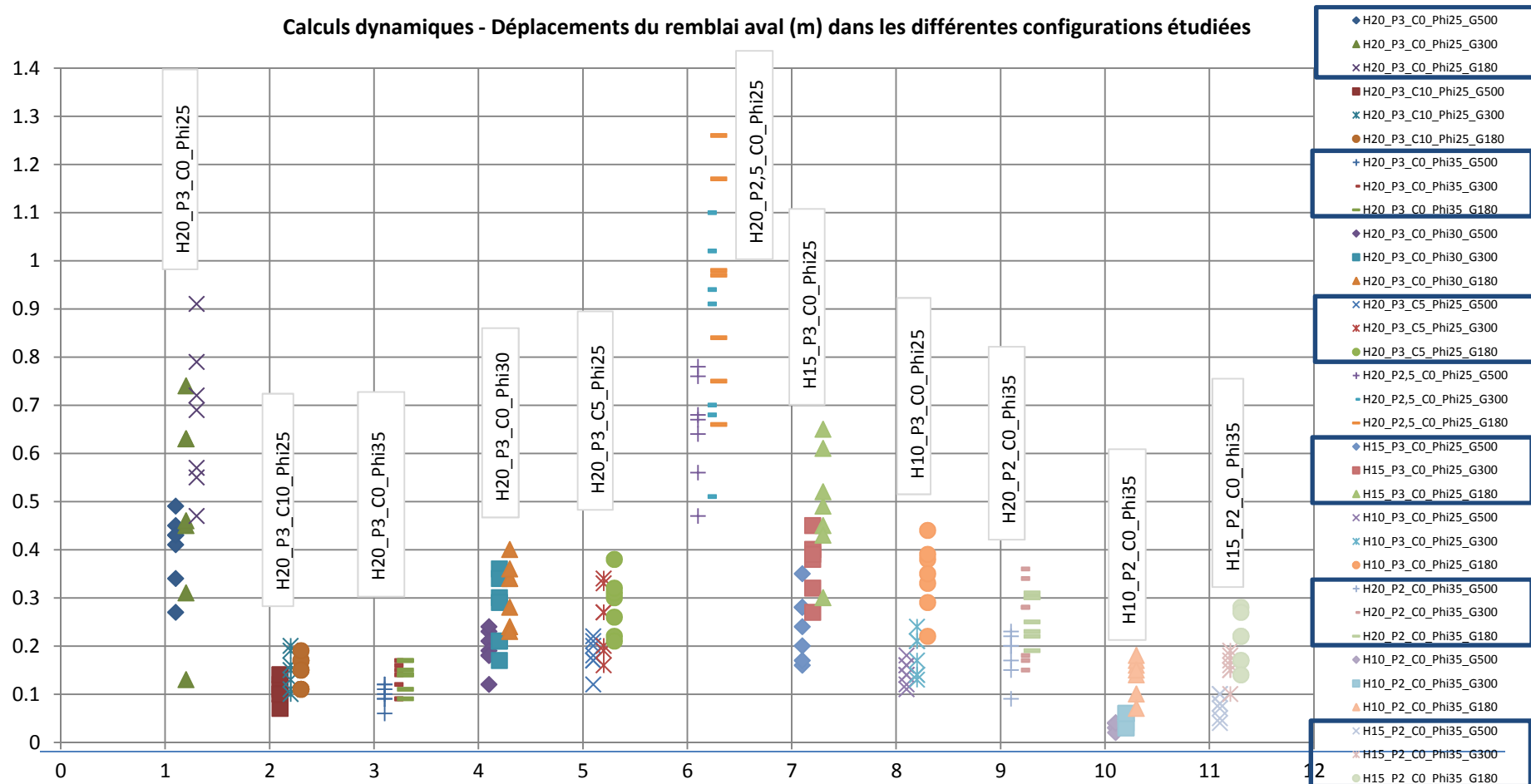


Combinaison	Hauteur (m)	Pente (v / H)	c' (kPa)	phi' (°)
1	20	1/3	0	25
2	20	1/3	10	25
3	20	1/3	0	35
4	20	1/3	0	30
5	20	1/3	5	25
6	20	1/2,5	0	25
7	15	1/3	0	25
8	10	1/3	0	25
9	20	1/2	0	35
10	10	1/2	0	35
11	15	1/2	0	35

11 combinaisons (H, pente, c', φ') → 11 calculs pseudo-statique
 ↙ x 3 G_{max} ($V_s \approx 300-400-500$ m/s) → 33 calculs Seed et Makdisi
 ↙ x 7 accélérogrammes → 231 calculs dynamiques temporels

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

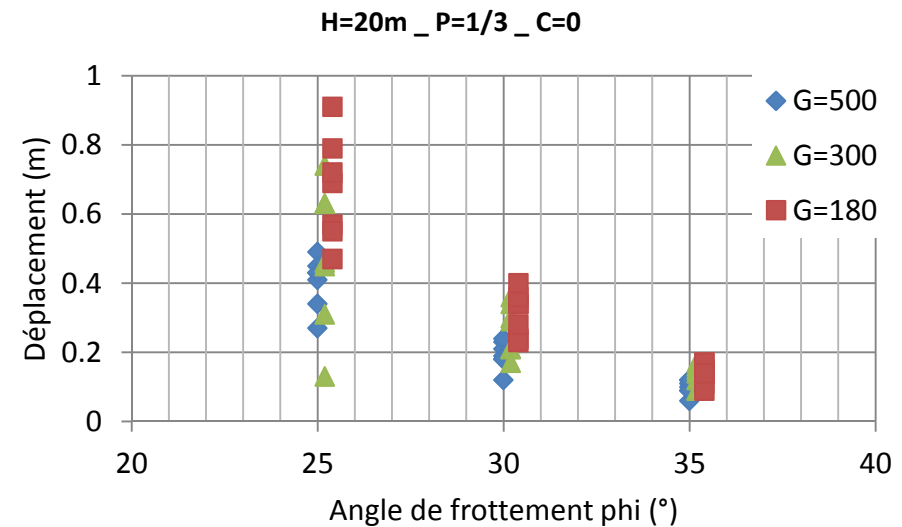
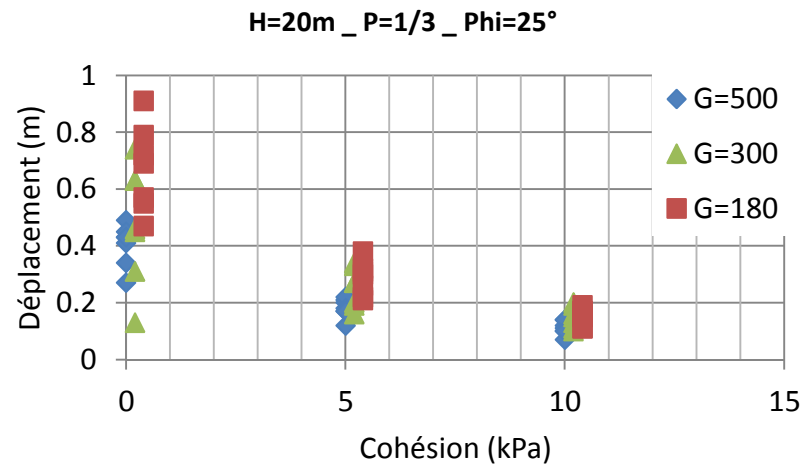
Résultats des calculs dynamique temporels



2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Résultats des calculs dynamique temporels

- Influence de
 - l'angle de frottement
 - la cohésion



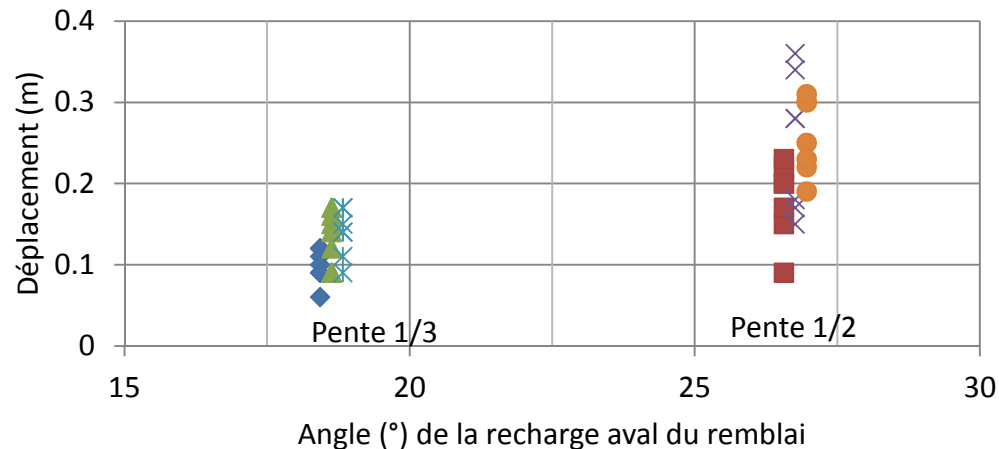
Les déplacements prévus se réduisent assez rapidement lorsque l'on s'écarte des valeurs médiocres (pessimistes) de $\{c' ; \varphi\}$

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

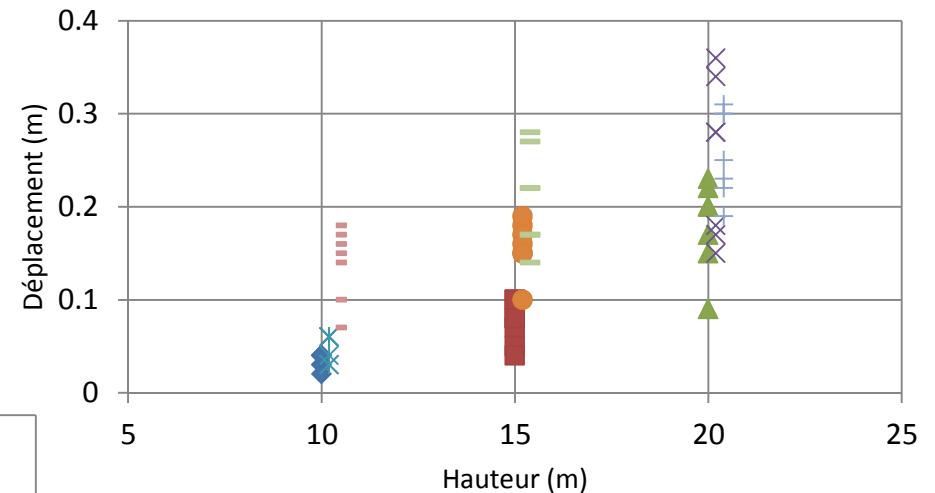
Résultats des calculs dynamique temporels

- Influence de
 - la hauteur de remblai
 - la pente

Influence de la pente _ Remblai H=20 m _ c = 0 kPa _ Phi = 35°



Influence de la hauteur _ Pente = 1/2 - c = 0 - Phi = 35°

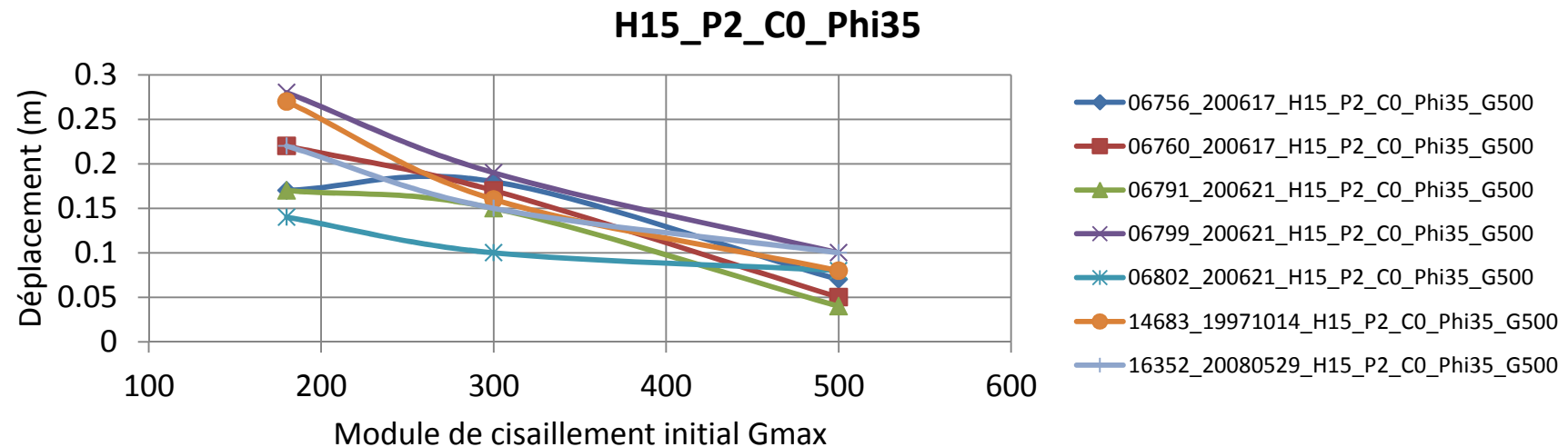


Les déplacements prévus se réduisent assez rapidement lorsque l'on adoucit la pente ou que l'on diminue la hauteur de remblai

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Résultats des calculs dynamique temporels

- Influence de la valeur de G_{max}

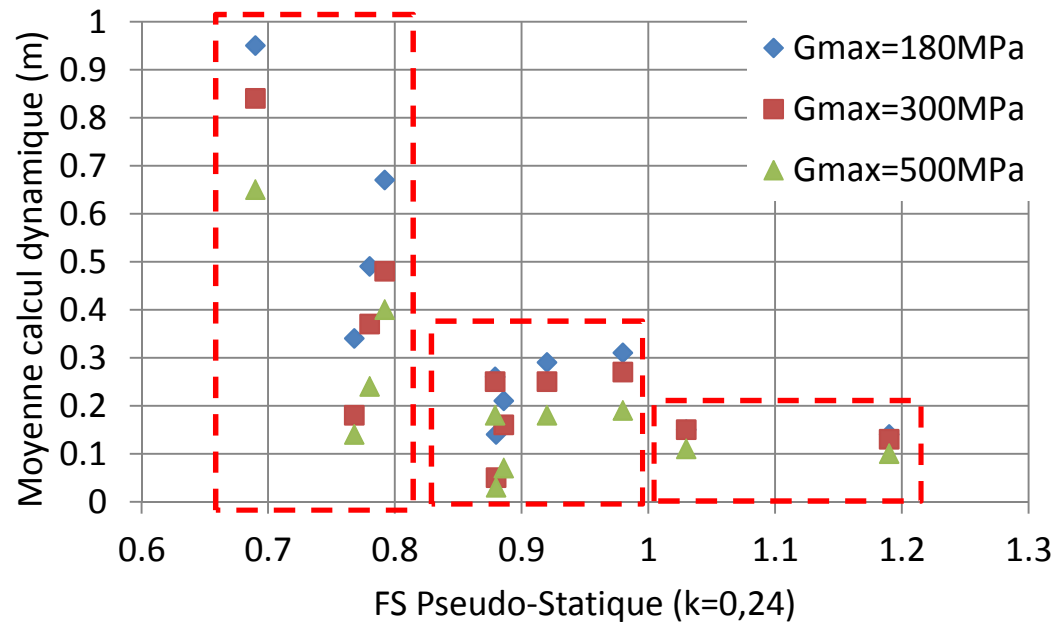


Le module de cisaillement en petites déformations (G_{max}) a une influence significative sur les déplacements prévus.

RQ: Paramètre mesurable in-situ, une fois l'ouvrage réalisé. Importance du compactage

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Comparaison des méthodes : Pseudo.statique vs Dynamique



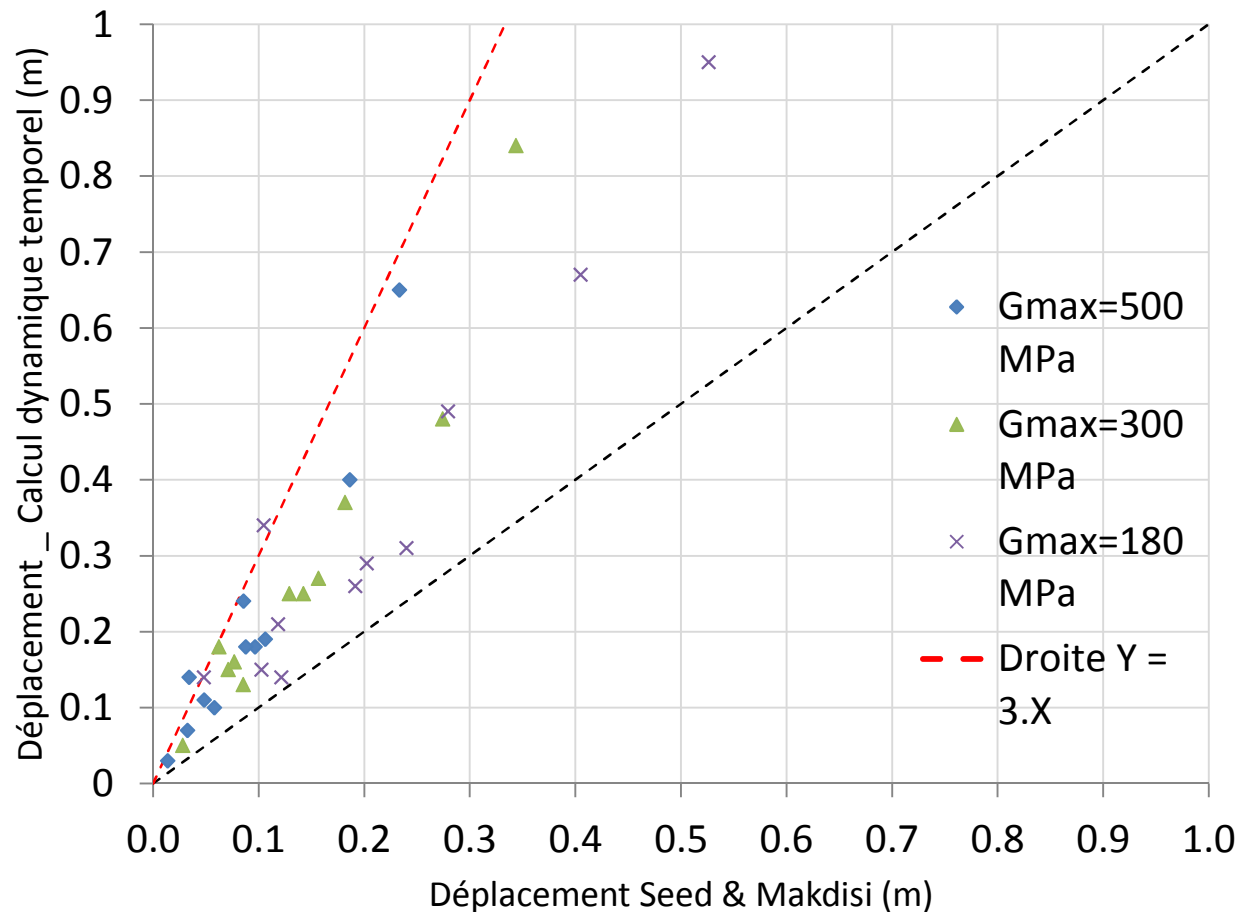
Résultats pseudo-statique	Résultats dynamique
FS > 1	Déplacements faibles (< 15 cm)
1 > FS > 0,8	Déplacements moyens (< 30 cm)
0,8 > FS	Déplacements importants

Pour une même valeur de FS en pseudo-statique, la variabilité des déplacements observée est liée à l'amplification +/- importante, gouvernée par (H, G_{max}) qui influencent la période propre fondamentale du remblai

↳ Ceci souligne l'apport des méthodes dynamiques / pseudo-statique

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Comparaison des méthodes : Seed et Makdisi vs Dynamique



Pour les configurations ici étudiées, les déplacements annoncés par la méthode dynamique temporelle sont supérieurs à ceux obtenus par S&M, selon un facteur multiplicatif compris entre 1 et 3.

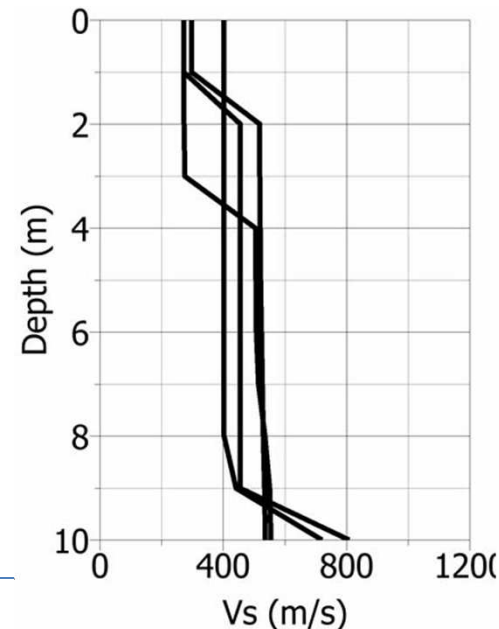
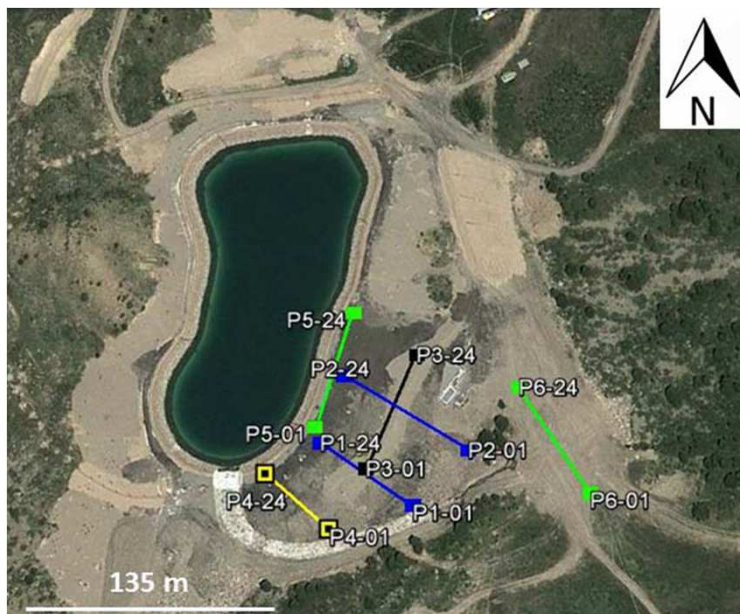
Toutefois,

- la méthode de S&M reste utilisable, eu égard au niveau de précision de cette méthode relativement simplifiée ;
- cette sous-estimation des résultats peut être compensée en se référant dans les abaques aux "courbes hautes" plutôt qu'aux "courbes moyennes"

2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Etude d'un ouvrage réel : barrage de classe B en zone 4

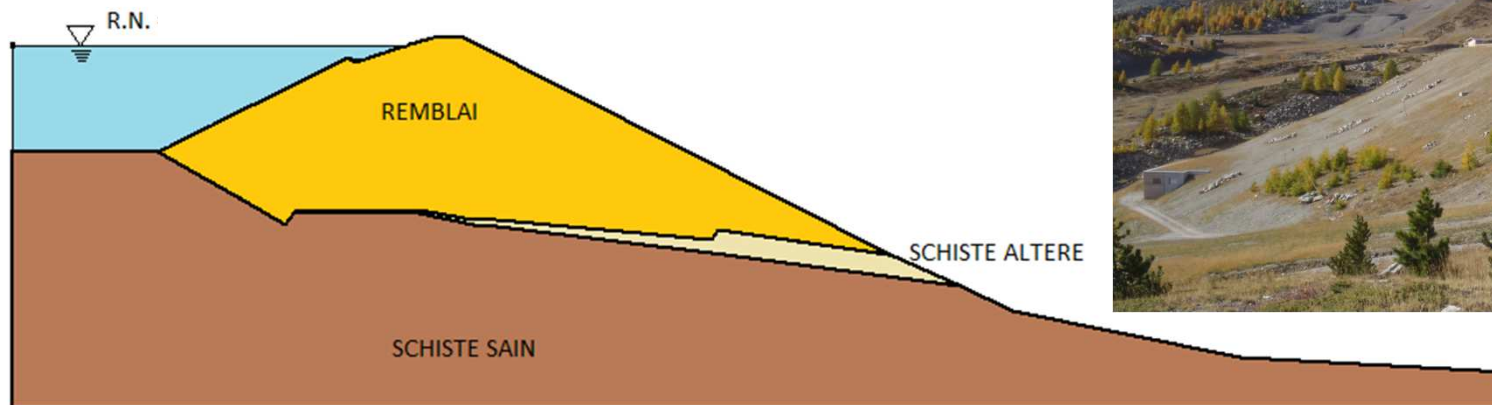
- Analyse des données de projet et de suivi de chantier
- Campagne de mesures in-situ (essais pénétrométriques, campagne géophysique sismique : sismique réfraction, MASW)



2. Etude de la vulnérabilité des retenues d'altitude vis-à-vis de l'aléa sismique

Etude d'un ouvrage réel : barrage de classe B en zone 4

- Validation des hypothèses faites pour le calcul aux EF :
 - d'homogénéité du remblai sur sa hauteur
 - de contraste de V_S (et contraste d'impédance mécanique) entre le remblai et sa fondation



3. Principaux enseignements, mise en perspective

- Influence attendue de certains paramètres :
H, pente, c' , φ'
- Influence de paramètres moins triviaux :
 G_{\max} , courbe $G/G_{\max}(\gamma)$
- La variabilité des résultats de la méthode dynamique : traduit l'influence de la variabilité du contenu fréquentiel de signaux utilisés. La dispersion croît avec la valeur moyenne du déplacement.
- Notre étude de sensibilité constitue une approche majorante :
 - Aléa correspondant à $T = 5000$ ans
 - Modélisation avec frontières rigides : ne permet pas d'amortissement radiatif
- Mécanisme de glissement étudié ici :
 - Ne considère pas les éventuelles déformations liées aux tassements
 - N'a pas abordé la question de la stabilité de la couche de protection sur le DEG qui en glissant, pourrait déchirer le DEG et conduire à une saturation du remblai.

Merci pour votre attention.

Grazie per l'attenzione.

