



Caractérisation du risque de liquéfaction sous sollicitation cyclique et sismique des géomatériaux et des géostructures

Projets Liquepac (Eccorev) et LiDiCam (OT-MED)

N. Benahmed (Irstea), C. Carvajal (Irstea),
K.T. Nguyen (Irstea), G. Bambara (Irstea), O. Bellier (Cerege),
P. Allard (ESPACE), O. Chanel (AMSE, CNRS-AMU)

Journée ECCOREV

« Aléas naturels: de l'étude à l'application – 8 ans de
collaboration au sein d'ECCOREV »

6 février 2018, Irstea, Aix-en-Provence



www.irstea.fr



Contexte: dommages importants induits par la liquéfaction



Niigata, 1964

➤ Liquéfaction d'origine sismique



Kobe, 1995



Rupture du barrage de San Fernando, Californie 1979



Christchurch, New-Zealand, 2011



Rupture du barrage de Dychow, Pologne

➤ Liquéfaction d'origine statique



La Conchita landslide, California, March 1995



Rupture d'une digue à Fourques, France, 2003

Généralités sur le phénomène de liquéfaction

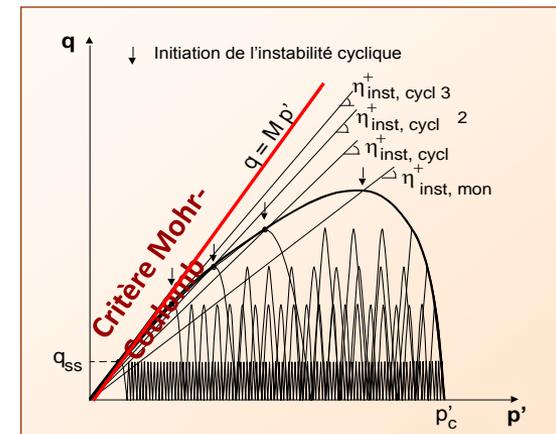
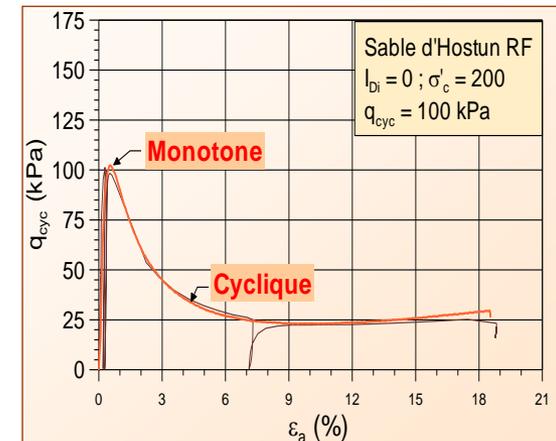


➤ Spécificité du phénomène de liquéfaction:

- Occurrence à un état de contrainte bien avant que le critère de Mohr-Coulomb soit atteint.
- Augmentation de la pression interstitielle avec perte brutale de la résistance au cisaillement (résistance résiduelle très faible, voire nulle) provoquant un **écoulement du matériau sous forme de fluide**.
- Contraintes effectives très faibles, voire nulles.

➤ Conditions d'occurrence du phénomène de liquéfaction:

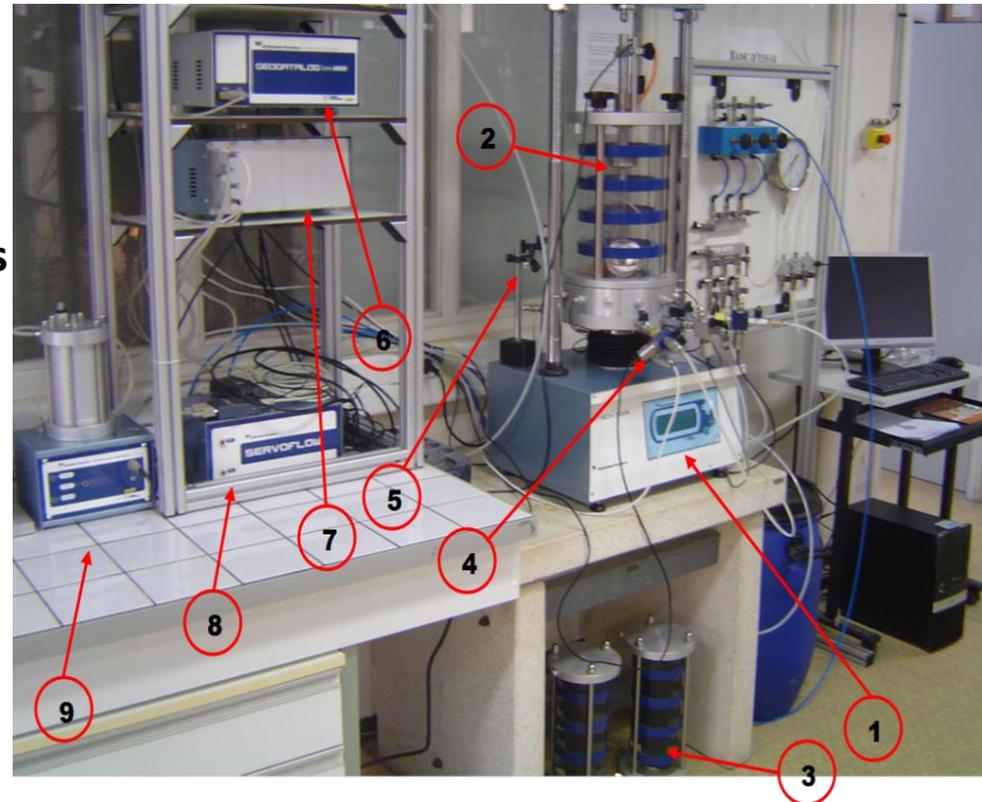
- Terrains alluvionnaires, zones marines, remblais, terrains ou îles artificielles, etc.
- Matériaux granulaires fins et uniformes
- Densités très lâches, lâches, à moyennement denses
- Matériaux très proches de la saturation
- Conditions non drainées des sols.



Caractérisation expérimentale de la liquéfaction cyclique à l'échelle du matériau

- Static and Dynamic Servoflow Controlled Triaxial System with three axis closed loop control for axial load or displacement, cell and back pressure.

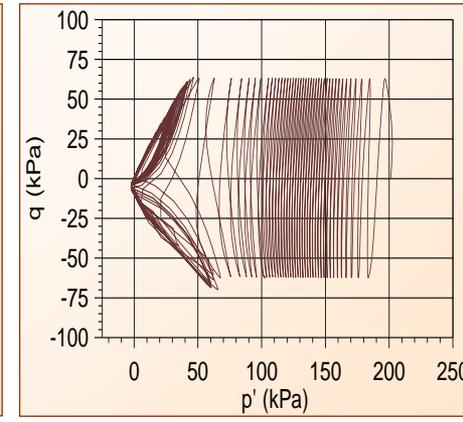
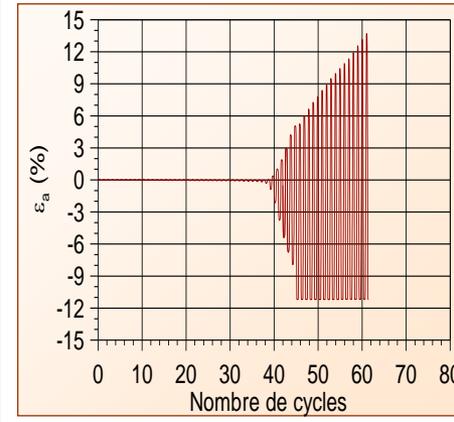
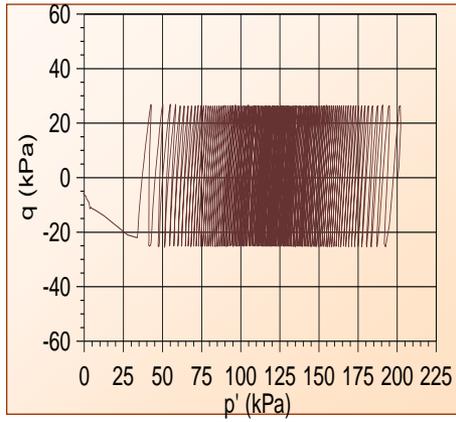
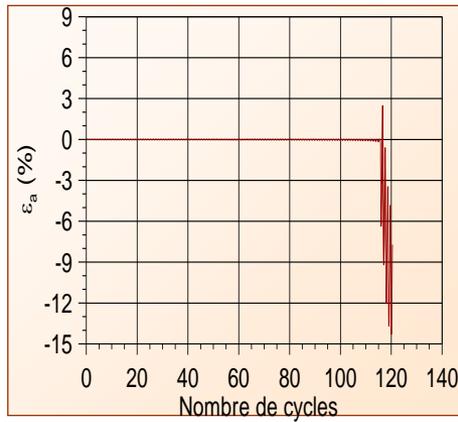
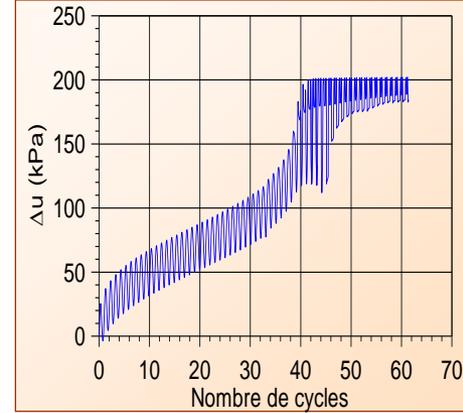
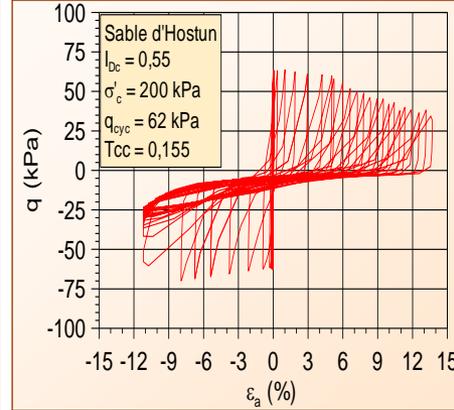
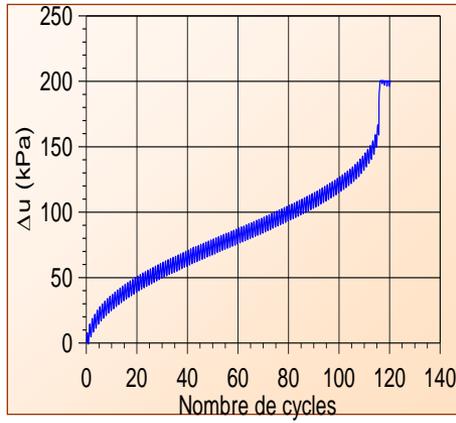
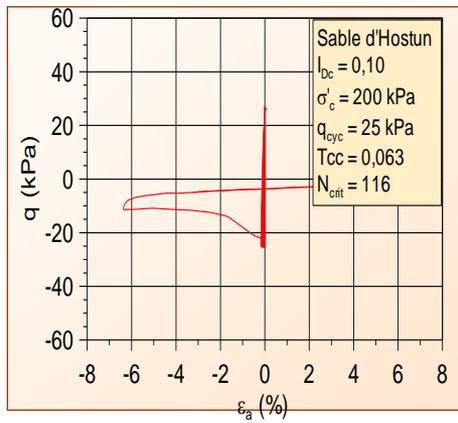
- Appareil triaxial dynamique
- Echantillons intacts ou reconstitués
- Essais triaxiaux cycliques
- Contraintes contrôlées ou déformations contrôlées
- Conditions drainées et non-drainées
- Différentes densités relatives
- Différentes contraintes de confinement
- Différentes amplitudes de chargement



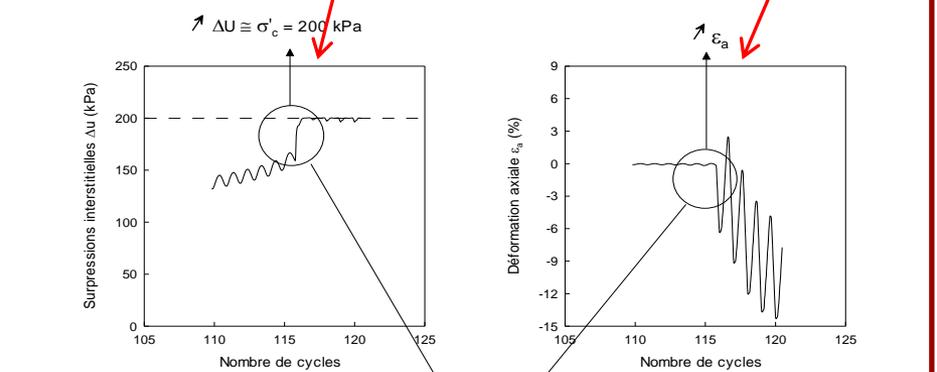
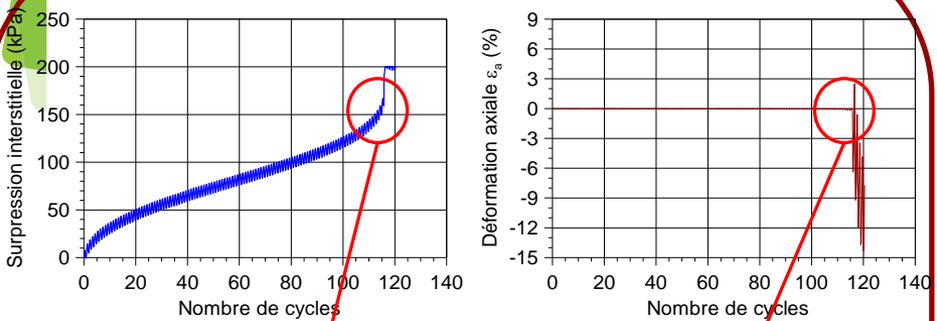
Résultat typique de liquéfaction cyclique

Liquéfaction Vraie

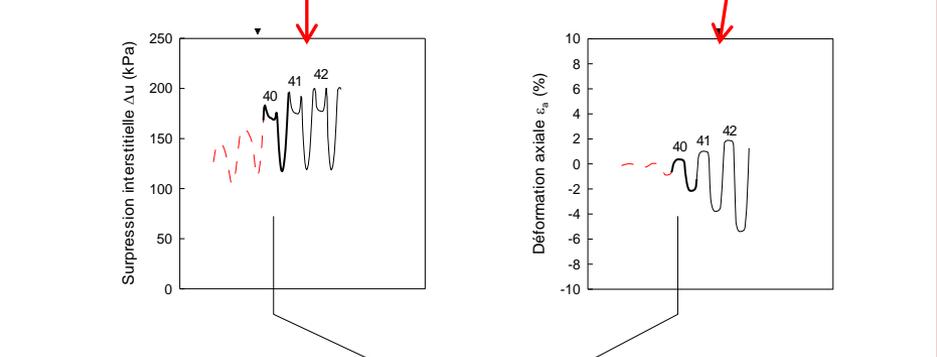
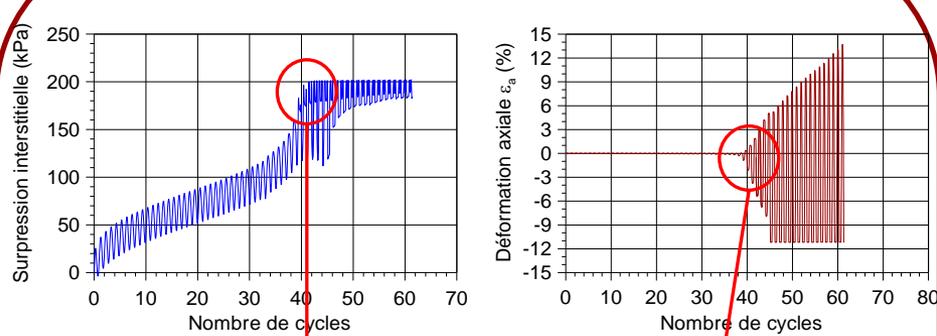
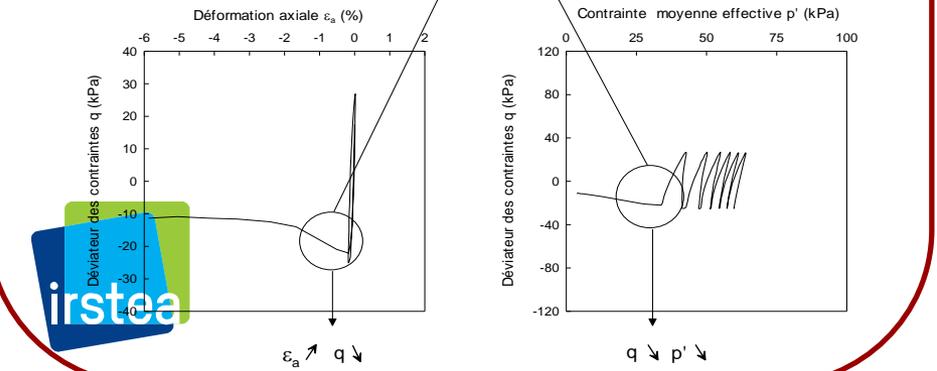
Mobilité Cyclique



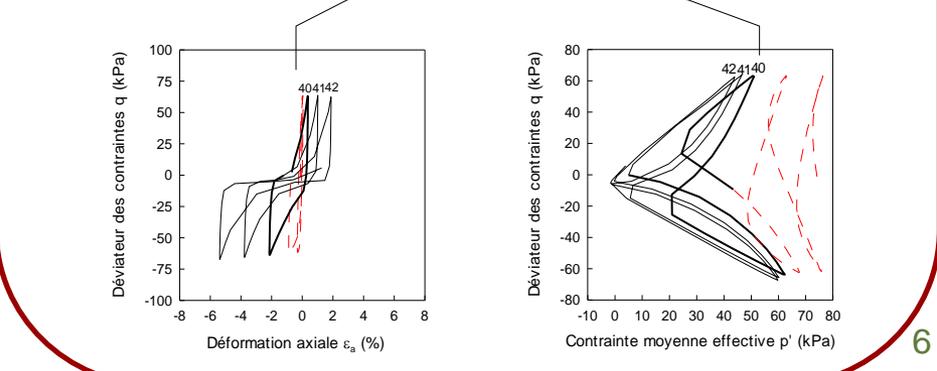
Liquéfaction vraie et mobilité cyclique



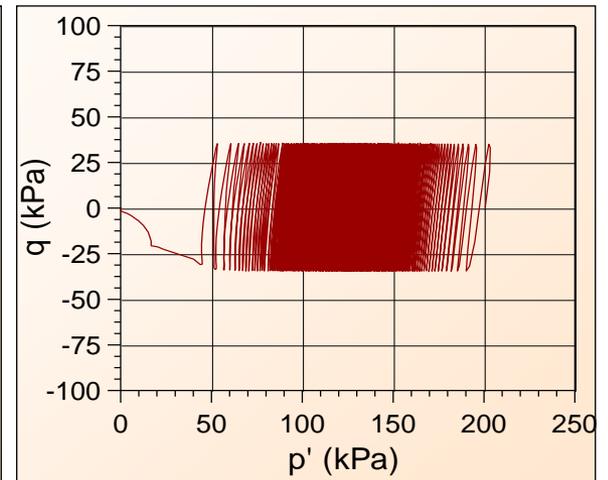
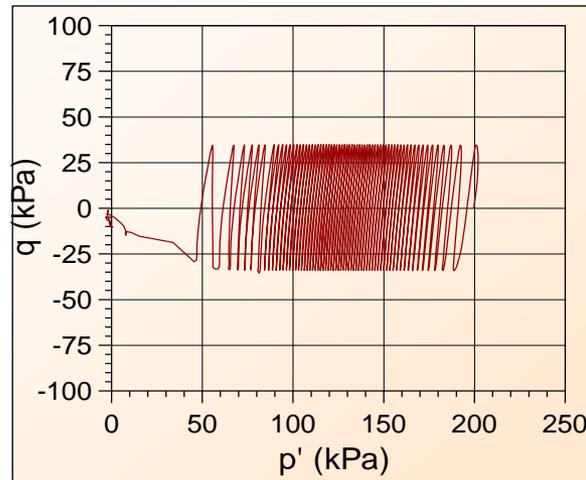
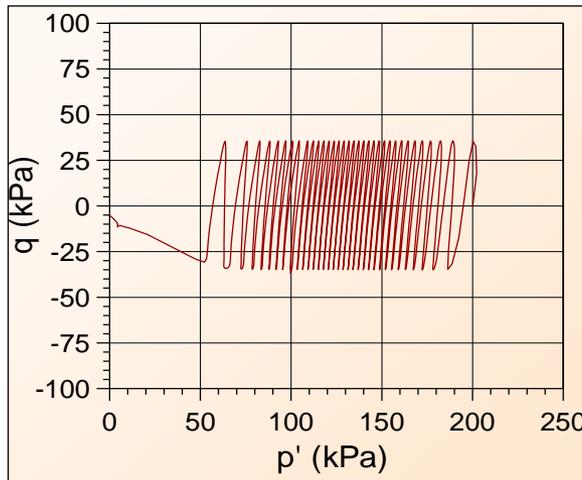
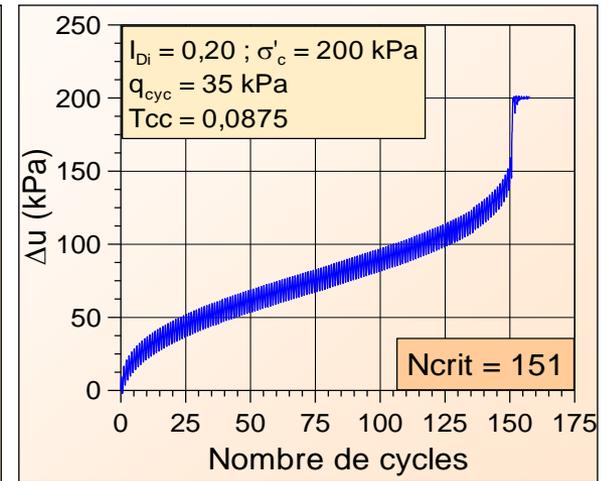
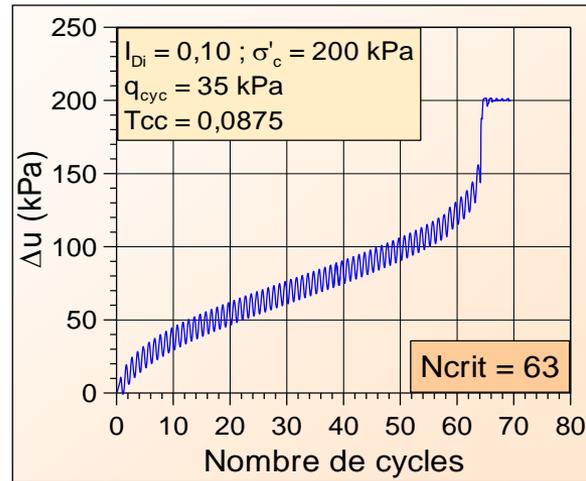
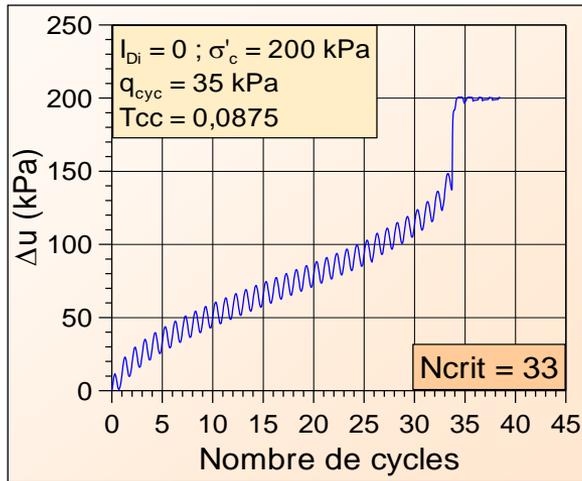
LIQUÉFACTION



MOBILITÉ CYCLIQUE

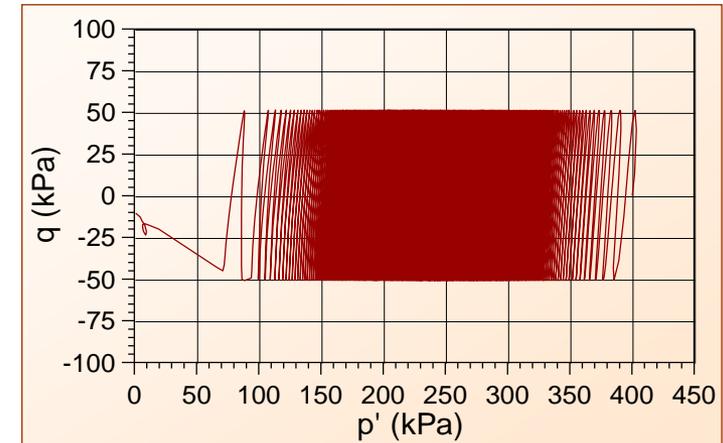
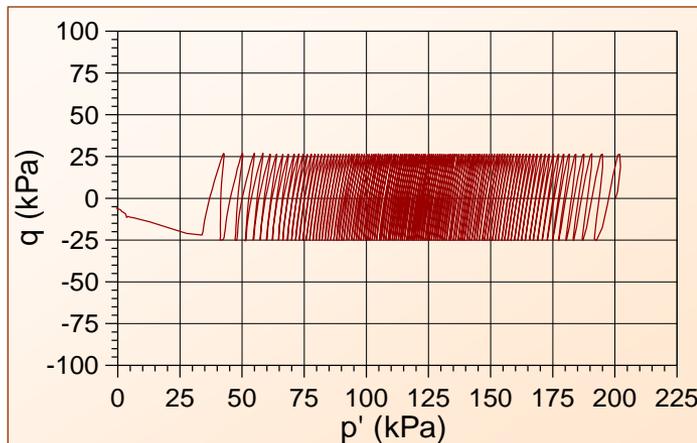
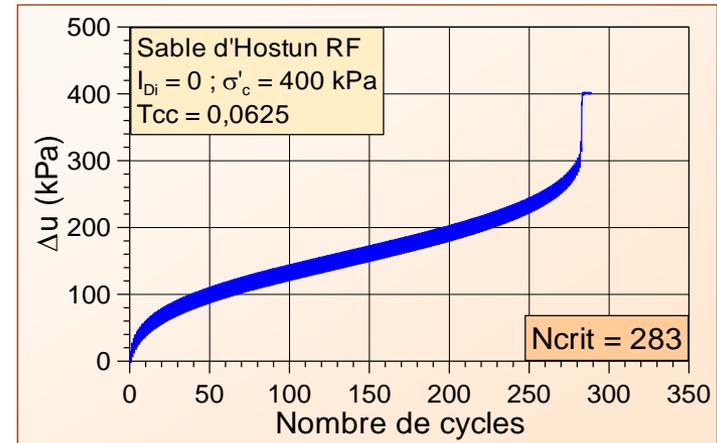
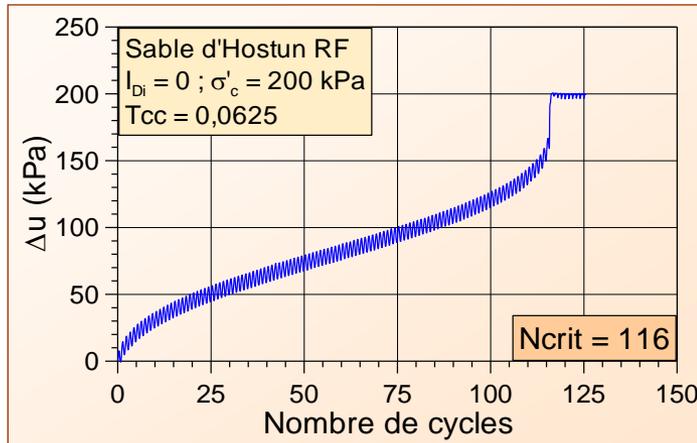


➤ Influence de la densité relative



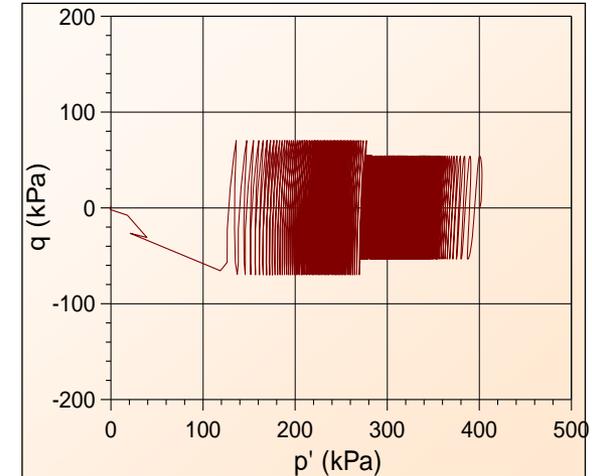
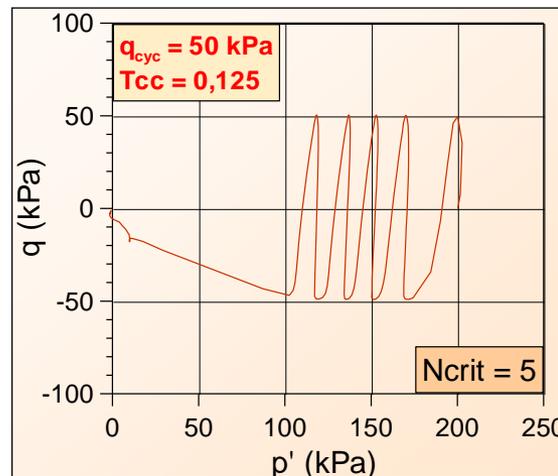
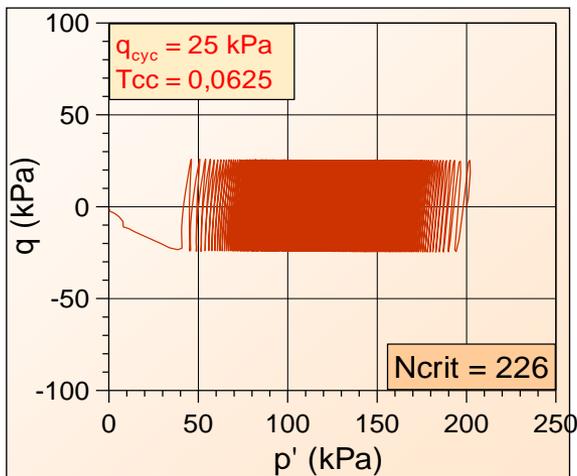
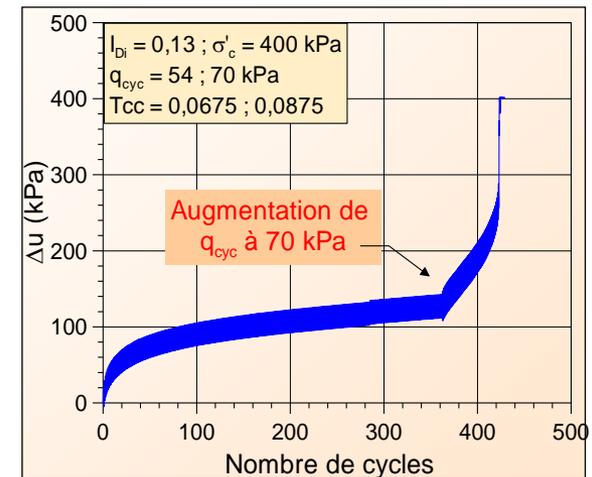
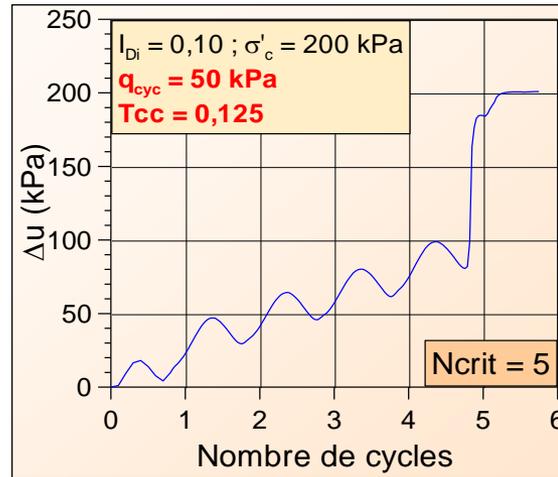
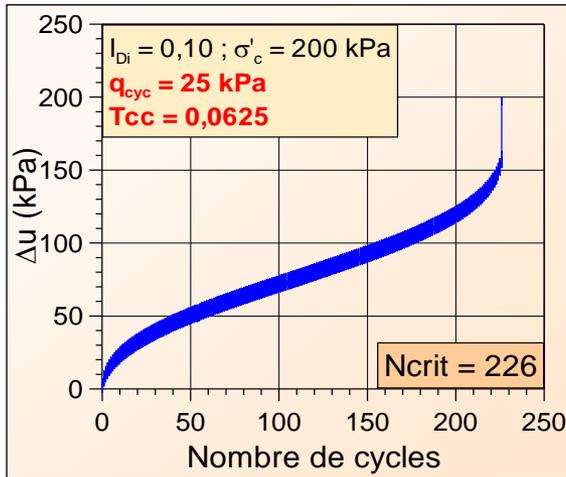
➔ Plus la densité relative est grande, plus le nombre de cycles pour provoquer la liquéfaction est petit.

➤ Influence de la contrainte de consolidation



➡ La contrainte de consolidation a pour effet d'augmenter la résistance du sol à la liquéfaction.

➤ Influence de l'amplitude de chargement



➡ L'augmentation de l'amplitude de chargement cyclique induit une liquéfaction du sol beaucoup plus précoce. Une amplitude inférieure à la résistance résiduelle du sol renforce sa stabilisation.

Evaluation de la résistance des sols au cisaillement cyclique

➤ **Courbes RCC : $(\tau_{cyc}/\sigma'_c, \log N)$**

$$CSR = (\tau_{av}/\sigma'_{vo}) = 0.65(a_{max}/g)(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})r_d$$

$$\frac{\tau_{cyc}}{\sigma'_c} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \tau_{cyc} = \frac{q_{cyc}}{2} & \text{demi déviateur cyclique} \\ \sigma'_c & \text{contrainte de consolidation} \end{cases}$$

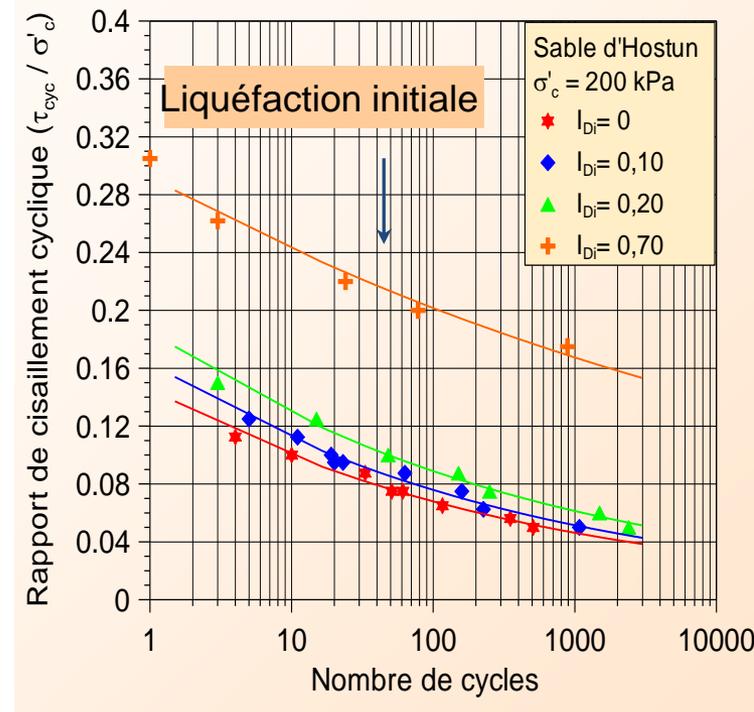
➤ **Critères du choix du cycle critique (N_{crit})**

● **Liquéfaction vraie (sable lâche) :**

- Nombre de cycle nécessaire qui induit une rupture par écoulement

● **Mobilité cyclique (sable dense) :**

- Cycle correspondant à la liquéfaction initiale
- Niveau de déformation cumulé crête à crête



Caractérisation à l'échelle de l'ouvrage

➤ **Projet Liquepac (Eccorev)**

Caractérisation du risque de liquéfaction sous sollicitation sismique d'ouvrages hydraulique en remblai existants ou projetés en basse vallée du Rhône

Objectifs du projet Liquepac (Eccorev)

- Recherche bibliographique sur les cas renseignés d'ouvrages hydrauliques ayant subis une rupture par liquéfaction des sols sous sollicitations sismiques
- Synthèse sur les différentes méthodes d'évaluation du potentiel de liquéfaction ainsi que leurs domaine de validité (application au digues en remblai)
- Analyse vis-à-vis de l'aléa sismique des zones identifiées comme sensibles au risque de liquéfaction en basse vallée du Rhône

Journée
Eccorev

6 février 2018

Approches d'évaluation

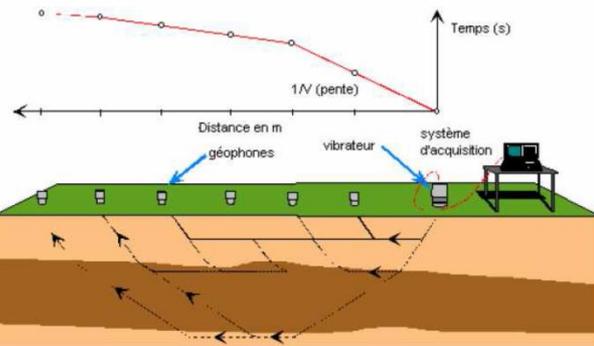
➤ Approches qualitatives

- Susceptibilité: identification des matériaux et configuration de l'ouvrage

➤ Approches par contraintes cycliques

- Taux de Contrainte Cyclique (CSR) v/s Taux de Résistance Cyclique (CRR)

Reconnaitances géophysiques (haut rendement)



Journ
Eccol

6 février 2010

Schéma de l'essai des ondes en surface, méthode de réfraction sismique

Reconnaitances géotechniques

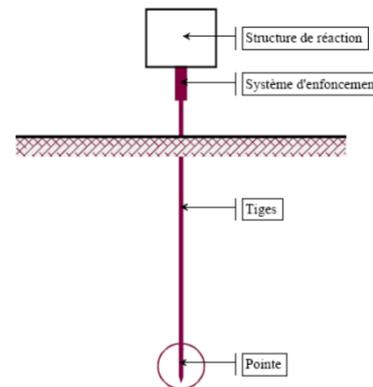


Schéma du pénétromètre statique

Analyse en laboratoire



Le triaxial cyclique

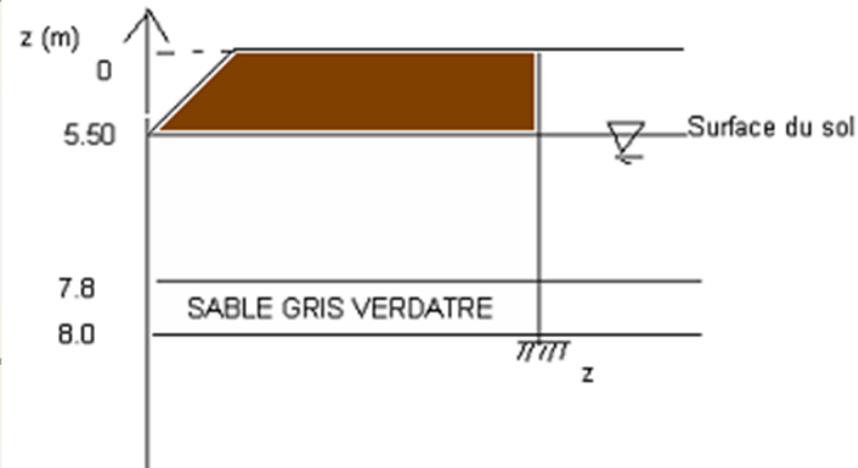
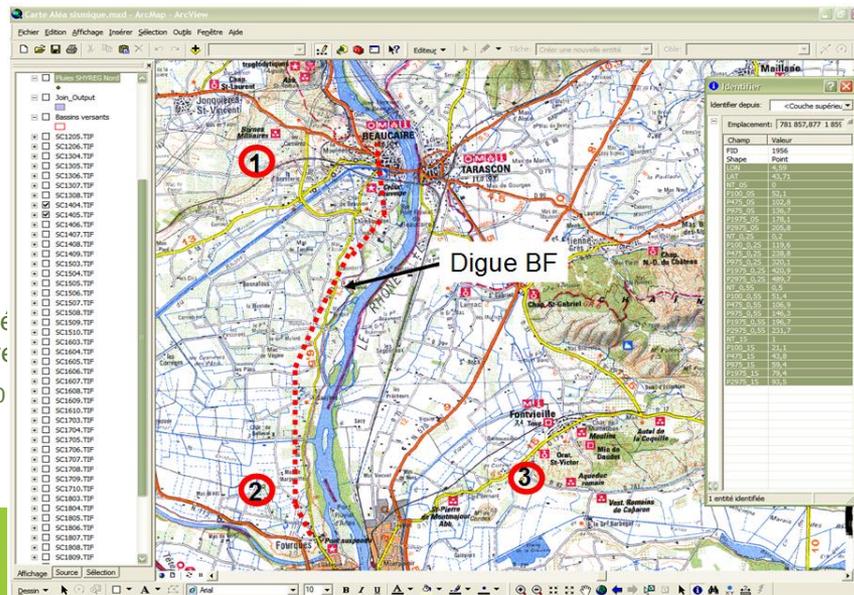
Source: www.brrc.be

➤ Approches numériques

Etude de cas

Tronçon de digue en basse vallée du Rhône

- Séisme – Taux de Contrainte Cyclique (CSR):
 - Magnitude $M_{max} = 5,7$; Accélération $PGA = 0,17g$
- Taux de Résistance Cyclique (CRR):
 - Essais de pénétration CPT
 - F_s très variable : 0,5 à 1,8 ($F_s < 1$ localement)



Journé
Eccore

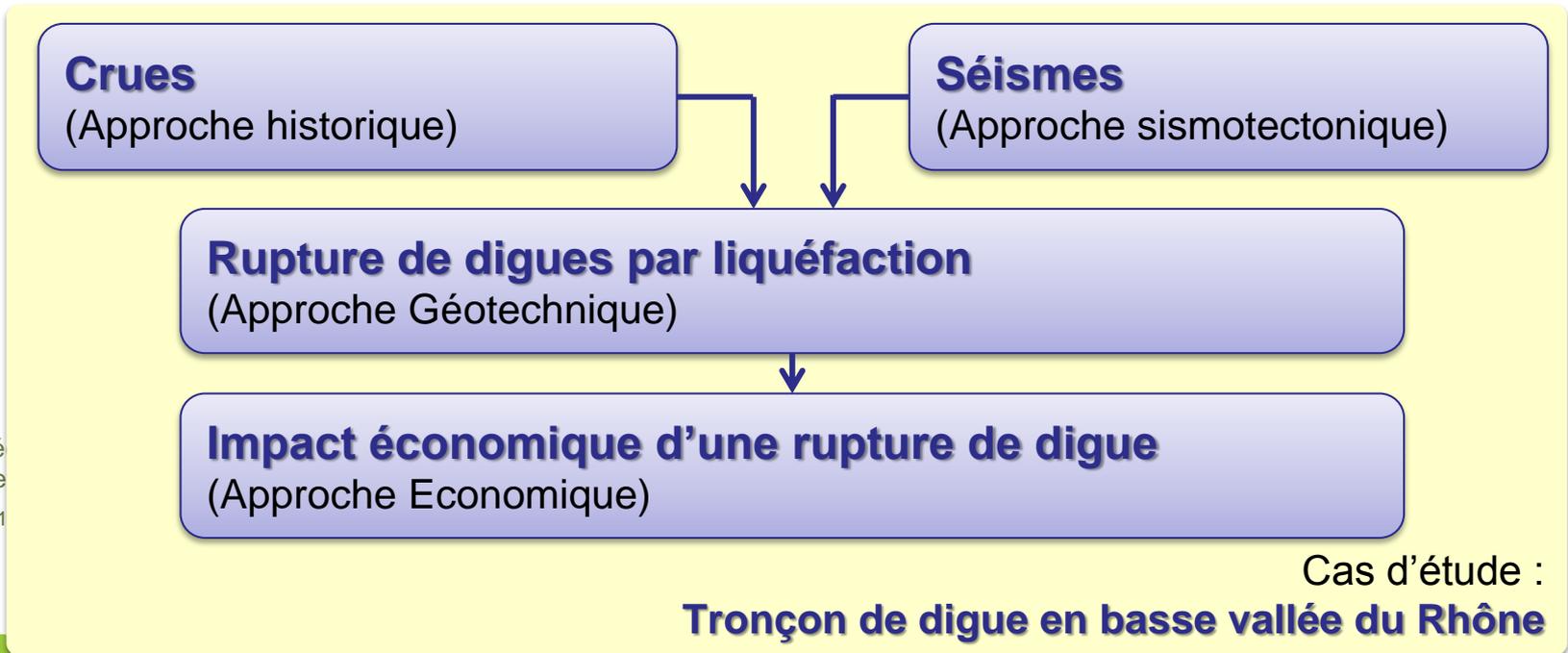
6 février 20

➤ **Projet LiDiCam (OT-MED)**

Objectifs

Caractérisation du risque de rupture par liquéfaction des ouvrages hydrauliques dans la basse vallée du Rhône

=> Approche pluridisciplinaire



Journé
Eccore
6 février 201

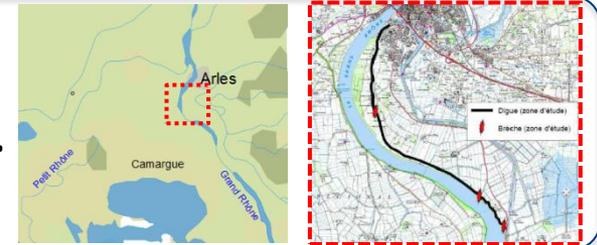
➤ **Projet LiDiCam (OT-MED)**

Résultats

Analyse bibliographique

Crues historiques, configurations des digues existantes, ...

- **Détermination d'une zone d'étude spécifique**



Approche Sismotectonique

Caractérisation des failles actives concernant potentiellement la zone d'étude

- **Failles de Nîmes et de Salon-Cavaillon**



Approche Géomécanique

Analyse en laboratoire et évaluation du potentiel de liquéfaction

- **Récupération de sondages carottés**
- **Essais triaxiaux cycliques**



1. Triaxial compression frame (Fig. 3-2)
2. Submersible load cell (Fig. 3-2)
3. Triaxial cell (Fig. 3-2)
4. Displacement transducer (Fig. 3-5)
5. Mounting bracket (Fig. 3-5)
6. Pressure transducer block (Fig. 3-7)
7. Pressure transducer (Fig. 3-6)
8. Compact Dynamic Controller (CDC) (Fig. 3-8)
9. Actuator (Fig. 3-11)
10. Automatic Valve Change device (AVC) (Fig. 3-10)
11. Rotational valve (Fig. 3-12)
12. Air receiver (Fig. 3-10)
13. Signal conditioning module (Fig. 3-15)
14. Water distribution panel (Fig. 3-15)
15. De-airing tank
16. Valve panel
17. Valve panel



Conclusions et Perspectives

- Les ouvrages hydrauliques en remblai sont naturellement susceptibles à la liquéfaction. L'aléa sismique en basse vallée du Rhône n'est pas négligeable.
- L'évaluation à l'échelle de l'échantillon au laboratoire donne accès à des informations intéressantes concernant les différents paramètres qui influencent le comportement des sols vis-à-vis de la liquéfaction.
- Les méthodes d'évaluation de la liquéfaction à l'échelle de l'ouvrage sont assez variées et délicates, restant essentiellement empiriques. Ceci souligne l'importance de développer des approches numériques.
- Les projets Liquepac et LiDiCam ont révélé l'intérêt d'intégrer des approches historiques et économiques (à l'échelle de l'ouvrage et de systèmes d'endiguement), en complément des approches géotechniques et sismo-tectoniques généralement mobilisées pour l'évaluation du risque de liquéfaction.



Merci pour votre attention !

**N. Benahmed (Irstea), C. Carvajal (Irstea),
G. Bambara (Irstea), O. Bellier (Cerege), P. Allard
(ESPACE), O. Chanel (AMSE, CNRS-AMU)**

Journée ECCOREV

« Aléas naturels: de l'étude à l'application – 8 ans de
collaboration au sein d'ECCOREV »

6 février 2018, Irstea, Aix-en-Provence



www.irstea.fr

