

Caractériser et prévenir la liquéfaction des sols sous les ouvrages : le projet ISOLATE

Jean-François Semblat, Philippe Reiffsteck, Evelyne Foerster, Fernando Lopez-Cabellero, Jean Canou, Annette Esnault-Filet, François Voldoire

▶ **To cite this version:**

Jean-François Semblat, Philippe Reiffsteck, Evelyne Foerster, Fernando Lopez-Cabellero, Jean Canou, et al.. Caractériser et prévenir la liquéfaction des sols sous les ouvrages : le projet ISOLATE. 10ème Colloque National de Génie Parasismique AFPS 2019, Sep 2019, Strasbourg, France. hal-02442856

HAL Id: hal-02442856
https://cnrs.hal.science/hal-02442856

Submitted on 16 Jan 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Caractériser et prévenir la liquéfaction des sols sous les ouvrages : le projet ISOLATE

Jean-François Semblat[(1)] — Philippe Reiffsteck[(2)] — Evelyne Foerster[(3)]
Fernando Lopez-Cabellero[(4)] — Jean Canou[(5)] — Annette Esnault-Filet[(6)]
François Voldoire[(7)]

[(1)] IMSIA (UMR9219), CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris
828 bd des maréchaux, F-91762 Palaiseau cedex, jean-francois.semblat@ensta-paris.fr
[(2)] IFSTTAR, Département GERS, 14-20 bd Newton, F-77447 Marne la Vallée Cedex 2
[(3)] CEA Paris-Saclay, Laboratoire d'Etudes de Mécanique Sismique
F-91191 Gif-sur-Yvette Cedex
[(4)] Laboratoire MSS-Mat. CNRS UMR 8579, CentraleSupélec,
8/10 Rue Joliot-Curie, F-91190 Gif-Sur-Yvette
[(5)] Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Navier,
6 et 8 av. Blaise- Pascal, F-77455 Marne- la- Vallée cedex 2
[(6)] Solétanche-Bachy, 280 av. Napoléon Bonaparte - 92500 Rueil-Malmaison
[(7)] EDF R&D – EDF Lab Paris Saclay, 7 bd Gaspard Monge, F-91120 Palaiseau

RÉSUMÉ. *Le projet ISOLATE vise à mieux caractériser le phénomène de liquéfaction des sols sous séisme en laboratoire et in situ et à limiter les dommages sur les ouvrages et les réseaux urbains. Il est organisé autour de cinq thématiques : 1/ caractérisation à l'échelle du matériau, 2/ caractérisation à l'échelle du sol de fondation et évaluation des effets d'échelle, 3/ analyse des effets de la liquéfaction sur les ouvrages, 4/ réduction du risque et évaluation d'une méthode de mitigation innovante, 5/ recommandations pratiques et valorisation des résultats. La participation au projet d'acteurs académiques reconnus dans le domaine de la géotechnique, du risque sismique, de l'expérimentation et de la modélisation physique et numérique (CEA, CS, ENPC, IFSTTAR) sous-tend la pertinence des actions proposées ; celle d'acteurs industriels majeurs (EDF, SB) garantit que les avancées scientifiques et techniques obtenues dans ce projet bénéficieront aux acteurs économiques.*

ABSTRACT. *The ISOLATE project aims at better characterizing the liquefaction of soils under seismic excitations in the lab and on site as well as limiting the damages to structures and lifelines. It is organized through five main topics: 1/ characterization at the scale of the material, 2/ characterization at the scale of the subgrade and assessment of scale effects, 3/ analysis of the effects of liquefaction on structures, 4/ risk reduction and assessment of an innovative mitigation method, 5/ recommendations for practitioners and publicizing the results. The involvement of renowned academic institutions in the fields of geotechnics, seismic risk, experimental, physical and numerical modelling (CEA, CS, ENPC, IFSTTAR) underlies the relevance of the proposed actions; that of major industrial stakeholders (EDF, SB) guarantees that the scientific and technical outcomes of this project will benefit to the economical field.*

MOTS-CLÉS : *liquéfaction, sols, géotechnique, expérimentation, modélisation physique, modélisation numérique, ouvrages.*

KEYWORDS: *liquefaction, soils, geotechnics, experiments, physical modelling, numerical modelling, structures.*

1 Impacts de la liquéfaction

La liquéfaction des sols sous séisme est un phénomène dévastateur conduisant à une perte de portance des sols de fondation, des glissements par écoulement de grande ampleur, une ruine des ouvrages et à d'importants dommages aux réseaux urbains (e.g. port de Nice, 1979 ; ruine de barrages lors du séisme de Tohoku, 2011, cf Fig.1). L'évolution récente de la réglementation parasismique (décrets n°2010-1254 et 1255 du 22 oct. 2010) conduit en France à la réévaluation du risque de liquéfaction sur un grand nombre d'ouvrages (remblais, digues, barrages, murs, fondations d'ouvrage d'art). Si de nombreuses études ont été menées depuis les années 60, elles posent encore des questions d'application, surtout en France, où le retour d'expérience réelle est faible. Par exemple, le critère chinois proposé par Wang (1979) et modifié récemment par Bray et Sancio (2006), n'est pas adapté aux sols « intermédiaires » (part de fines significative) et reste à valider. Il est encore nécessaire d'améliorer la compréhension et la modélisation des mécanismes de liquéfaction, en s'appuyant sur des essais pertinents aussi bien in situ qu'en laboratoire.

L'objectif du projet Isolate est donc d'améliorer la caractérisation du potentiel de liquéfaction des sols naturels et leurs modélisations physiques et numériques en vue de vérifier le comportement des géo-structures réelles et de réduire le risque de liquéfaction (mitigation) en conformité avec la réévaluation de l'aléa sismique.

(a) (b) (c)

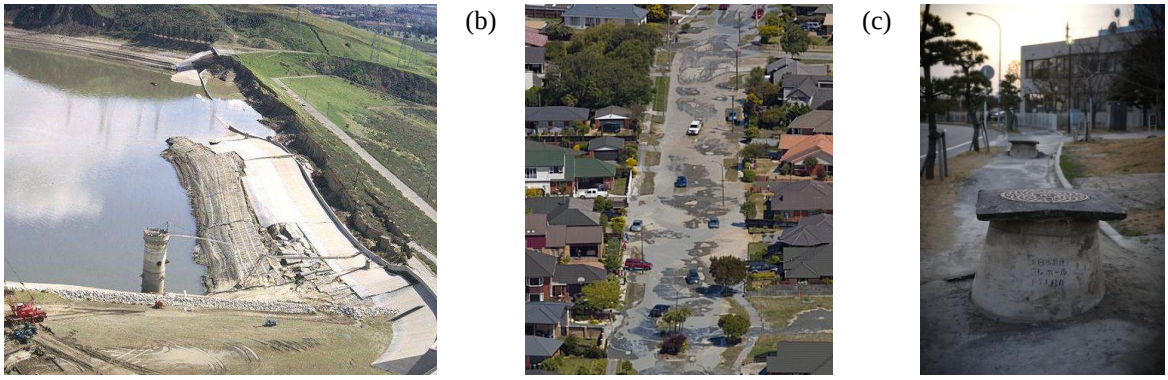


Figure 1. *Effets de la liquéfaction lors des séismes de : (a) San Fernando (USA, 1971), (b) Christchurch (Nouvelle-Zélande, 2011), (c) Tohoku (Japon, 2011).*

Le verrou principal ressenti par l'ingénierie est le manque d'étalonnage des méthodes (absence d'un retour d'expérience en France sur des sites de référence). En conséquence, ce projet a l'ambition de mettre à disposition de la profession une série d'outils, allant du test homogène en laboratoire jusqu'au modèle physique d'ouvrage en centrifugeuse ou sur table vibrante, en passant par un nouvel outil de caractérisation in situ. Ce projet permettra donc de mieux quantifier le risque et les diverses incertitudes associées, de proposer une méthode de mitigation innovante, ainsi que des recommandations à destination de la profession.

2 Pertinence et thématiques principales

Pour évaluer le risque sismique sur les ouvrages géotechniques, et plus spécifiquement leur vulnérabilité par apparition de liquéfaction, les analyses se basent habituellement sur une approche d'identification géotechnique en laboratoire (essais triaxiaux cycliques, boîte de cisaillement, centrifugeuse) s'appuyant sur la caractérisation de la structure granulométrique (influence des fines) ainsi qu'une approche mécanique simplifiée cherchant à simuler le phénomène dans des conditions maîtrisées homogènes (saturation et absence de drainage). Cette caractérisation sert à définir le potentiel de liquéfaction et à fournir des données d'entrée pour les analyses par modélisation.

Il demeure nécessaire d'évaluer les procédures aptes à caractériser le comportement dynamique des sols saturés en relation avec leur état physique (type de structure, anisotropie, densité), de quantifier les biais et de définir les meilleurs protocoles expérimentaux pour différentes échelles et non seulement les sols de base (argiles, limons et silts, sables et graves), mais surtout pour les nombreux sols intermédiaires naturels prélevés sur des sites réels ou reconstitués, moins étudiés. Il est important de pouvoir caractériser les sols sur des chemins de sollicitation les plus proches possibles de ceux appliqués lors d'un séisme, notamment via un dispositif de type boite de cisaillement (assez peu utilisé par les laboratoires géotechniques en France). Le projet Isolate propose également de nouvelles procédures expérimentales permettant de quantifier les incertitudes associées au mode opératoire, notamment en termes de préparation des échantillons (prélèvement/reconstitution) pour une meilleure prise en compte de la variabilité des sols naturels.

D'autre part, les méthodes actuelles d'analyse de la tenue des ouvrages vis-à-vis de la liquéfaction reposent sur des approches simplifiées, souvent empiriques, dont les prédictions sont parfois éloignées des observations, et des modélisations numériques utilisant des modèles de comportement dédiés, servant à établir l'apparition de la liquéfaction. Ces modélisations requièrent de renforcer le lien avec la caractérisation expérimentale, à la fois pour l'accès aux données à diverses échelles et pour construire des éléments probants de validation. De plus, des recherches sur des techniques numériques avancées sont encore nécessaires afin de modéliser le processus complet de liquéfaction (initiation, écoulement plastique et phase post-liquéfaction).

Enfin, un dernier enjeu concerne l'amélioration des sols sableux de la façon la moins intrusive possible en limitant l'impact environnemental. Une alternative aux solutions actuelles qui consistent à injecter des coulis à base de produits chimiques, est d'utiliser une méthode de bio-calcification permettant d'augmenter significativement la résistance mécanique et la cohésion des sols, sans trop modifier leur perméabilité initiale. Ce type de procédé pourrait être utilisé sur des terrains perméables, sableux ou limoneux, saturés ou non, pour réduire le risque de liquéfaction des sols.

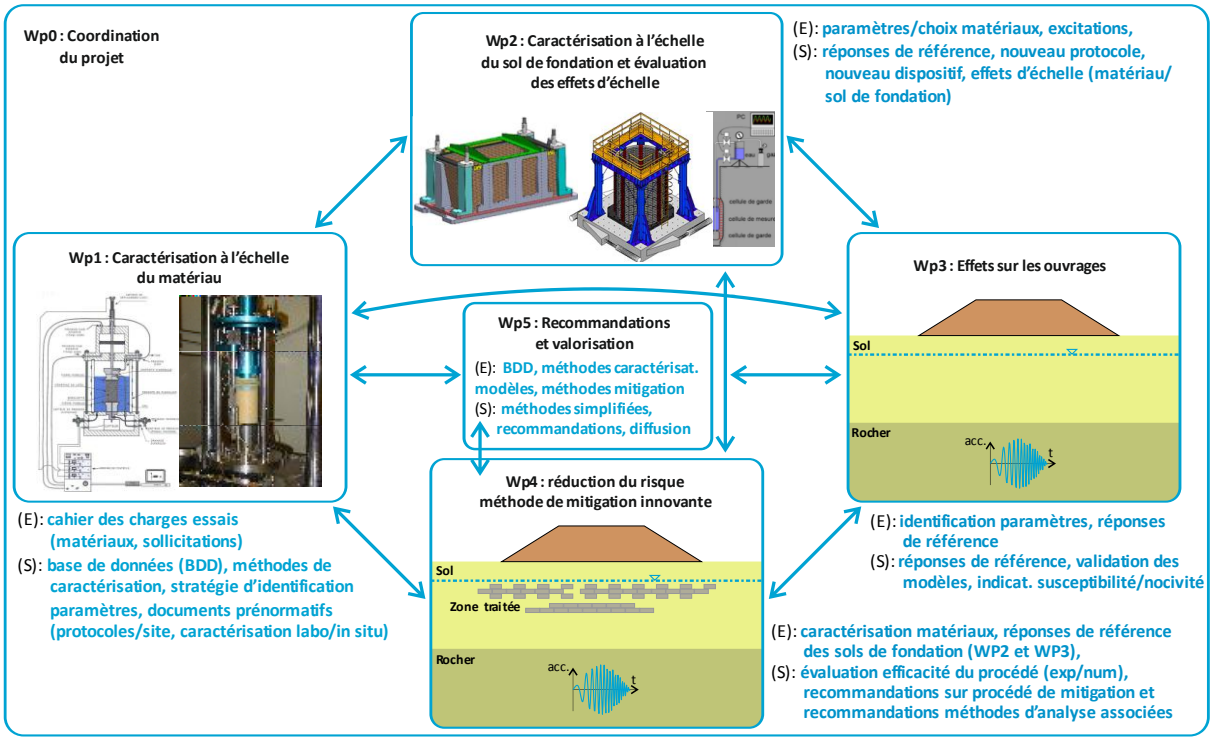


Figure 2. *Schématisation des WP et des interactions (entrées (E)/sorties (S)).*

Le projet ISOLATE vise ainsi à améliorer les méthodes de caractérisation et de modélisation de la liquéfaction des sols sous séisme, afin de proposer des techniques de remédiation potentielles. Les objectifs scientifiques sont les suivants : (1) Améliorer la compréhension du comportement des sols dits intermédiaires vis-à-vis de la liquéfaction ; (2) Proposer des méthodes expérimentales innovantes pour caractériser la liquéfaction à différentes échelles : échelle matériau (appareil triaxial, boîte de cisaillement), échelle intermédiaire sur sol de fondation reconstitué (centrifugeuse, essais sur table vibrante), échelle de l'ouvrage (pressiomètre) ; (3) Proposer et mettre en œuvre des méthodes de simulation de complexité croissante : méthodes basées sur des approches simplifiées et conservatives et méthodes avancées permettant de modéliser finement le phénomène de liquéfaction, avec les éléments de validation nécessaires ; (4) Caractériser et valider des solutions techniques innovantes de renforcement des sols en fonction du niveau d'aléa sismique attendu (approches probabilistes).

Du point de vue de la méthodologie et de l'organisation du projet, les objectifs scientifiques déclinés ci-dessus sont regroupés au travers de quatre thématiques (ou « WP ») :

– WP1 - Caractérisation à l'échelle du matériau

– WP2 - Caractérisation à l'échelle du sol de fondation et évaluation des effets d'échelle

– WP3 - Effets de la liquéfaction sur les ouvrages

– WP4 - Réduction du risque et méthode de mitigation innovante

Chaque WP vise à produire des résultats scientifiques mais aussi des protocoles qui alimenteront des recommandations et valorisations utiles pour la profession, et produites par le WP5 (cf Figure 2). Le WP0 permet de coordonner l'ensemble des actions, de veiller à la qualité des livrables et d'apporter les éléments correctifs lorsque nécessaire.

3 Méthodes de caractérisation et de mitigation

3.1 Caractérisation à l'échelle du matériau (WP1)

Il s'agit de définir les paramètres alimentant les méthodes numériques ainsi que les procédures aptes à caractériser le comportement des sols saturés sous sollicitations dynamiques en relation à leur état physique. Pour ce faire, une division préalable des sols sera nécessaire selon des critères de composition granulométrique, de plasticité, d'état de densité, d'état initial, etc. Au moins trois catégories granulométriques de sols seront proposées (sols sableux avec différents pourcentages de fines) puis caractérisées par un programme exhaustif d'essais détaillés (drainés, non drainés, monotones et cycliques sur chemins de cisaillement ou triaxiaux).

Pour la stabilité des ouvrages, l'estimation de la résistance résiduelle constitue un enjeu fort. Les essais de cette tâche fourniront des éléments essentiels pour caractériser l'état ultime en fin de séisme, car il n'existe pas en France de résultat de résistance résiduelle sur un chemin de cisaillement. Cette partie expérimentale sera complétée par une modélisation numérique apte à reproduire le comportement dynamique des sols soumis à des sollicitations rapidement variables dans le temps à différentes échelles. Le Tableau I synthétise l'effort de caractérisation entrepris. Les différentes tâches du WP1 se décomposent ci-après.

Le nombre indicatif d'essais à différentes échelles est de plusieurs centaines (cf Tableau I) : triaxial/colonne résonante, boîte de cisaillement, triaxial cyclique, chambre d'étalonnage, centrifugeuse, table vibrante, expansion in situ. Ces valeurs indicatives de nombre d'essais sont calculées en première approche à partir du nombre de densités, de mélanges en comptant 3 éprouvettes. Le résultat final tient compte du fait que, pour tracer une courbe RCC / Nombre de cycles, il faut déterminer 3 à 5 points (répétabilité comprise).

Ce nombre d'essais peut être diminué si une caractérisation mécanique basée sur les essais classiques destinée à caler les modèles rhéologiques existe déjà dans la littérature. Les variations de mélanges (fines non plastiques et plastiques) ne sont pas toutes nécessaires dans ce cas.

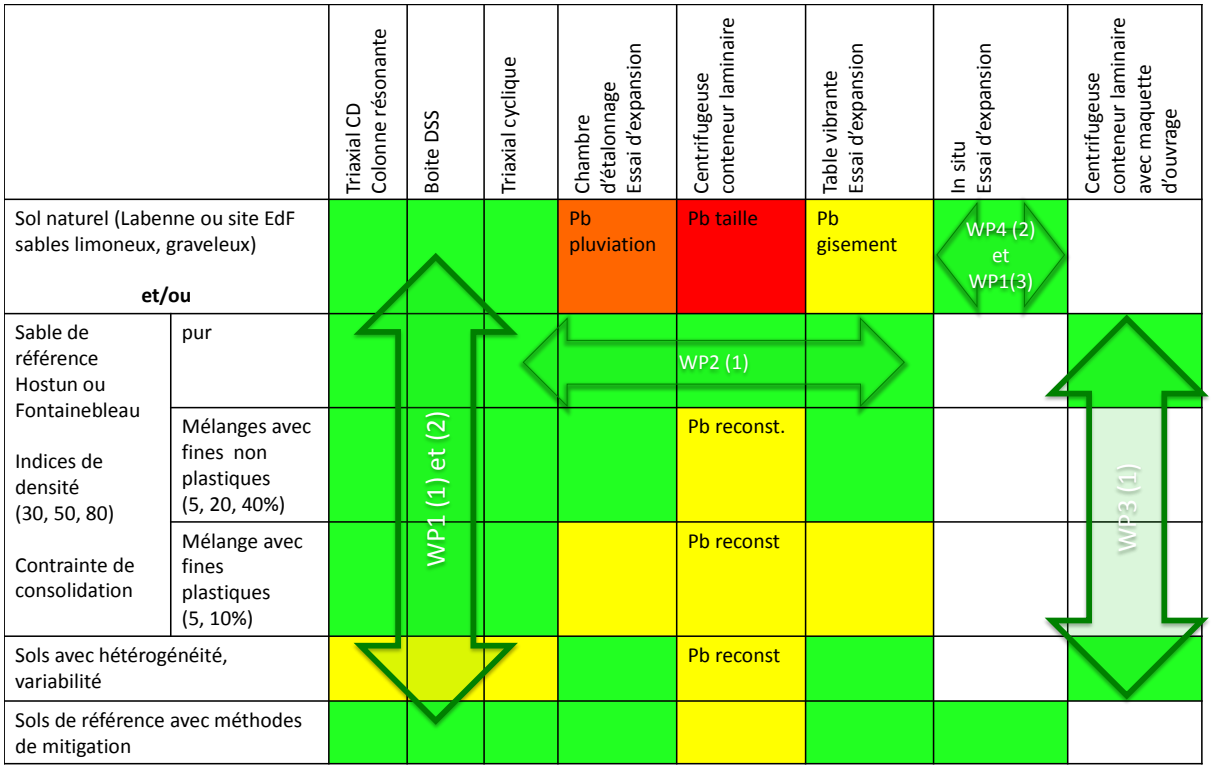


Tableau I. *Types de sols et méthodes expérimentales à différentes échelles.*

3.2 Caractérisation à l'échelle du sol de fondation et évaluation des effets d'échelle (WP2)

La calibration des modèles numériques et la vérification de leurs capacités prédictives nécessitent une meilleure compréhension du phénomène de liquéfaction à l'échelle structurelle sur les sols de fondation et des études de cas bien documentées sur des sols connus des modélisateurs. Dans ce cadre, des essais en laboratoire sur colonne de sable de référence caractérisé en WP1 seront réalisés en centrifugeuse (macro-gravité n-g) et sur table vibrante (gravité naturelle 1-g). Les résultats du programme d'essais fournissent une base de données expérimentale sur sol de fondation qui permettra ensuite d'analyser les effets d'échelle, les artefacts liés à chacun des dispositifs expérimentaux et de valider les modèles numériques (cf WP3).

Afin de reproduire le comportement in situ d'une colonne de sol susceptible de se liquéfier, la colonne doit être reconstituée dans un conteneur permettant de limiter les effets de bords. Dans ce cadre, le recourt à un conteneur laminaire (Figure 3, cf Kutter 1995 ; Jafarzadeh F. 2004 ; Ueng et al. 2006 ; Turan et al. 2009 ; Rovithis 2013) est plus approprié que l'utilisation de conteneurs rigides ou ESB (Equivalent Shear Beam). Le premier objectif du WP2 est donc d'établir des protocoles expérimentaux pour la réalisation d'essais en conteneurs laminaires en s'inspirant des méthodes de reconstitution élaborées dans le WP1.

Le second objectif, porte sur l'analyse de l'influence de la présence de fines vis-à-vis de la susceptibilité à la liquéfaction. Les résultats expérimentaux sur colonne de sol (n-g et 1-g), associés aux résultats d'essais en laboratoire, apporteront in fine des éléments pour la détermination du domaine d'application des indicateurs normatifs pour évaluer ce risque. L'échelle importante visée sur table vibrante permettra ainsi la réalisation de tests du type pressiomètre cyclique afin de déduire les indicateurs et de les corréler avec les phénomènes de liquéfaction observés. Ainsi l'évaluation de la résistance post-liquéfaction pourra être déduite.

Le troisième objectif est de produire des données pour valider les développements numériques du WP3.

(a) (b) (c)

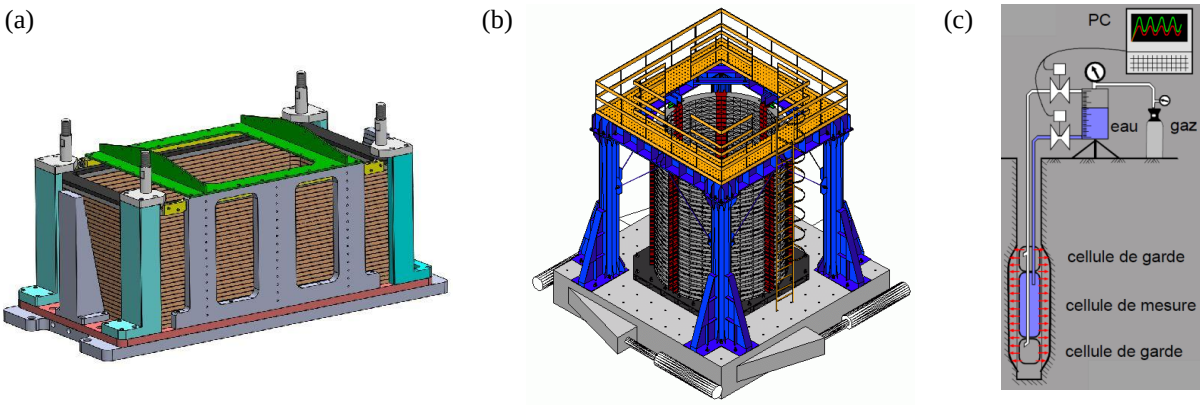


Figure 3. *Dispositifs expérimentaux : (a) conteneur laminaire sur centrifugeuse (IFSTTAR), (b) conteneur laminaire sur table vibrante (CEA), (c) pressiomètre cyclique in situ.*

3.3 Effets de la liquéfaction sur les ouvrages (WP3)

La démarche courante afin d'évaluer le risque sismique consiste principalement à :

– définir le mouvement sismique en fonction des caractéristiques de la source sismique, du taux d'activité sismique, du trajet source-site et des effets de la géologie locale.Ces effets englobent les effets locaux dus au comportement non linéaire des sols ainsi que les mouvements de terrain et la liquéfaction des sols ;

– estimer l'endommagement des ouvrages soumis au mouvement sismique qui peut être affecté par l'histoire de chargement (i.e., effet réplique) et par des effets relatifs à l'interaction entre ces ouvrages et le sol ;

– évaluer l'impact de ces dommages sur le fonctionnement des ouvrages considérés ;

– estimer les impacts socio-économiques liés à l'endommagement physique des ouvrages.

Dans ce volet, nous nous focalisons plus spécifiquement sur les effets de site locaux conduisant à l'apparition de la liquéfaction et à l'interaction entre le sol de fondation et l'ouvrage. L'évaluation du risque de liquéfaction sur un site donné, de ses conséquences éventuelles et des solutions de remédiation envisageables constitue un enjeu économique et social important. Ce risque peut être exprimé par l'intermédiaire d'un coefficient de sécurité à la liquéfaction, qui prend en compte la résistance du sol par rapport aux efforts produits par le séisme.

Les caractéristiques et les propriétés des matériaux sont définies à l'aide des essais au laboratoire ou in-situ (WP1 et WP2). Cependant, les contraintes et les déformations induites par le séisme dans le profil du sol sont estimées à partir de simulations numériques de l'ouvrage avec des modèles en contraintes totales. Ces types de modèles ne sont pas adaptés pour estimer le comportement du sable (i.e., comportement contractant ou dilatant) et par conséquent l'évolution temporelle de la pression interstitielle lors du chargement sismique.

Ce volet vise quatre objectifs définissant chacun des axes de recherches déclinés en tâches :

i. Mise au point d'essais d'interaction sol de fondation / ouvrage en conditions contrôlées ;

ii. Confrontation expérimentale/numérique ;

iii. Définition et hiérarchisation des indicateurs pertinents pour quantifier la stabilité et le niveau d'endommagement de l'ouvrage via des approches en performance ;

iv. Confrontation des critères simplifiés d'évaluation du risque de liquéfaction aux observations expérimentales (WP2 et WP5).

Parmi les codes et approches utilisés, nous pouvons citer : GEFDyn (Aubry et Modaressi, 1996) et Code_Aster (open source), permettant une modélisation du sol 2D/3D couplées (formulation u − pw) par la méthode des éléments finis (modèle élastoplastique multi-mécanismes « ECP/Hujeux »), SEM2DPACK (Oral, 2016 ; Oral et al., 2017) utilisant la méthode des éléments spectraux en 2D (P-SV / SH) dans des sols saturés en

conditions non drainées (modèle élastoplastique d'Iwan et modèle front de liquéfaction d'Iai ; SWAP3C (Santisi d'Avila et al., 2012, 2013) utilisant la méthode des éléments finis pour simuler la propagation des ondes sismiques en conditions non drainées (modèle de comportement du sol similaire à celle du cas précédent).

3.4 Réduction du risque et méthode de mitigation (WP 4)

L'objectif de ce volet est de valider et de démontrer l'efficacité d'un traitement de mitigation contre les risques de liquéfaction mis en œuvre in situ dans un modèle physique (table vibrante CEA et centrifugeuse IFSTTAR) selon les spécifications issues des essais de WP2 et WP3 et de réaliser des simulations numériques pertinentes pour modéliser le phénomène.

Ce volet est divisé en deux grandes parties, l'une expérimentale et l'autre numérique :

– Grâce à l'expérience acquise dans WP2, le CEA et l'IFSTTAR valident des protocoles expérimentaux pour la réalisation des essais 1-g sur table vibrante et n-g en centrifugeuse. En conséquence, à partir d'un sol de « référence », où les techniques de reconstitution et la répétabilité de l'essai seront déjà validées, on appliquera le système Biocalcis afin de tester et d'évaluer l'effet de la bio-calcification sur la réduction du risque liquéfaction des sols testés. Le protocole final d'injection sera déterminé en fonction de la configuration du modèle et des options de montage et d'instrumentation. Un suivi des paramètres d'injection et de bio-calcification permettra de confirmer le taux de calcite formé, qui sera également déterminé par des prélèvements post-traitement.

–L'un des facteurs déterminant tient à la combinaison d'une fraction de sol non traité et d'une fraction de sol traité en place. Les différentes configurations spatiales possibles peuvent ainsi produire des variations de comportement très importantes (Montoya-Noguera et Lopez-Caballero, 2016). Il s'agit donc d'évaluer numériquement l'effet de la variabilité spatiale induite par les traitements de sol sur la résistance à la liquéfaction d'un dépôt de sol et de quantifier ses conséquences sur l'ouvrage simulé dans le WP3. Pour évaluer l'efficience de la zone traitée, le niveau d'endommagement de l'ouvrage sera estimé pour différents niveaux d'efficacité, soit différentes fractions spatiales en allant de non traitées jusqu'à entièrement traitées.

3.5 Recommandations et valorisation (WP5)

Le projet apportera à la profession un addendum à la recommandation AFPS 2020. Il mettra à la disposition de l'ingénierie des outils numériques et expérimentaux validés qui réduiront le coût des études :

1. base de données pour le choix des paramètres,
2. modèles de comportement validés sur plusieurs ouvrages,
3. boite de cisaillement pour caractérisation des sables en laboratoire,
4. pressiomètre cyclique pour caractérisation du sol in situ,
5. confortement du procédé de mitigation du risque de liquéfaction par calcification bactérienne.

Il est en particulier attendu sur les aspects expérimentaux de faire des recommandations sur :

– les méthodes de prélèvement d'échantillons afin de conserver leur représentativité tout au long de la réalisation des essais de caractérisation en laboratoire ;
– le niveau d'incertitude toléré pour la mesure des grandeurs d'intérêt principales (module d'Young, module de cisaillement, modules de rigidité et amortissement en fonction de la distorsion, potentiel de liquéfaction, …) ;
– le protocole expérimental à observer pour caractériser un sol au regard d'un aléa sismique donné ;
– la manière d'utiliser les résultats expérimentaux pour des justifications de sûreté avec effet d'échelle ;
– des protocoles expérimentaux permettant de caractériser des sols réels cibles à partir de sols reconstitués ;
– des propositions d'évolution de pratiques basées sur les essais CPT / SPT et des abaques standardisés à permettant de mesurer plus finement le comportement à la liquéfaction des sols (e.g. pressiomètre cyclique).

Concernant l'évaluation des conséquences de la liquéfaction sur les ouvrages, il est attendu des recommandations sur :

– l'utilisation et/ou la modification des méthodes et critères simplifiés ;
– l'élaboration des données d'entrée des simulations numériques, leur calibration à partir des données expérimentales ;
– la validation de modèles sophistiqués permettant d'aller plus loin dans l'étude du risque de liquéfaction ;
– des indicateurs et des critères objectifs sur le risque de liquéfaction, par la confrontation des résultats expérimentaux et des modèles.

Concernant la mitigation du risque de liquéfaction des sols, il est attendu des recommandations quant à l'utilisation optimale de procédés de mitigation.

4 Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre du projet ANR Isolate (ANR-17-CE22-0009) soutenu par l'Agence Nationale pour la Recherche. L'ensemble des collègues des institutions partenaires sont également remerciés.

5 Bibliographie

Bray JD., Sancio RB. (2006), Assessment of the liquefaction susceptibility of fine-grained soils, *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, ASCE, 132: 1165-1177.

De Gennaro, V., Canou, J., Dupla, J.-C., Benahmed, N., 2004. Influence of loading path on the undrained behaviour of a medium loose sand. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 41, pp. 166-180.

Foerster, E. & Modaressi, H. (2007), Nonlinear numerical method for earthquake site response analysis II- case studies, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 5 (3): 325-345.

Javelaud E. (2015) Etat de l'art des méthodes d'évaluation du risque de liquéfaction. Cas des ouvrages à risques normal et spécial en France, *9ème Colloque national AFPS 2015*, IFSTTAR, Champs-sur-Marne.

Kutter, Bruce L. (1995) Recent Advances in Centrifuge Modeling of Seismic Shaking. *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics. 4*.

Li Z., Escoffier S., Kotronis P. (2013). Using centrifuge tests data to identify the dynamic soil properties: Application to Fontainebleau sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 52: 77–87

Lopez-Caballero, F., Modaressi-Farahmand-Razavi, A., and Stamatopoulos, C. A. (2016). Numerical evaluation of earthquake settlements of road embankments and mitigation by preloading. *Int. Journal of Geomechanics*, 16(5).

Montoya-Noguera, S. and Lopez-Caballero, F. (2016). Effect of coupling excess pore pressure and deformation on nonlinear seismic soil response. *Acta Geotechnica*, 11(1):191-207.

Nguyen T.L., Semblat J-F, Reiffsteck P., Lenti L. (2008) Anisotropic velocity and attenuation for shear waves in a layered soil by resonant column tests, *Seismological Society of America's 2008 Annual Meeting*, Santa Fe, New Mexico.

Reiffsteck P., Lossy D., Benoît J. (2012). *Forages, sondages et essais in situ géotechniques*, Presses de l'ENPC, 800 p.

Santisi d'Avila M.P., Pham V.A., Lenti L., Semblat J.F. (2018). Extended Iwan-Iai (3DXii) constitutive model for 1-directional 3-component seismic waves in liquefiable soils: application to the Kushiro site (Japan), *Geophysical Journal International*, 215(1): 252–266. doi: 10.1093/gji/ggy266

Santisi d'Avila M.P., Lenti L., Semblat J.F. (2012). Modeling strong seismic motion: 3D loading path vs wavefield polarization, *Geophysical Journal International*, 190: 1607-1624.

Semblat J.F., Pecker A. (2009). *Waves and Vibrations in Soils: Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction Works*, IUSS Press, 500 p.