



Direction territoriale Méditerranée

Renforcement parasismique des constructions existantes

Le Traitement contre la liquéfaction des sols en France Métropolitaine

Stéphane Brûlé

Aix en Provence, le 27 novembre 2014



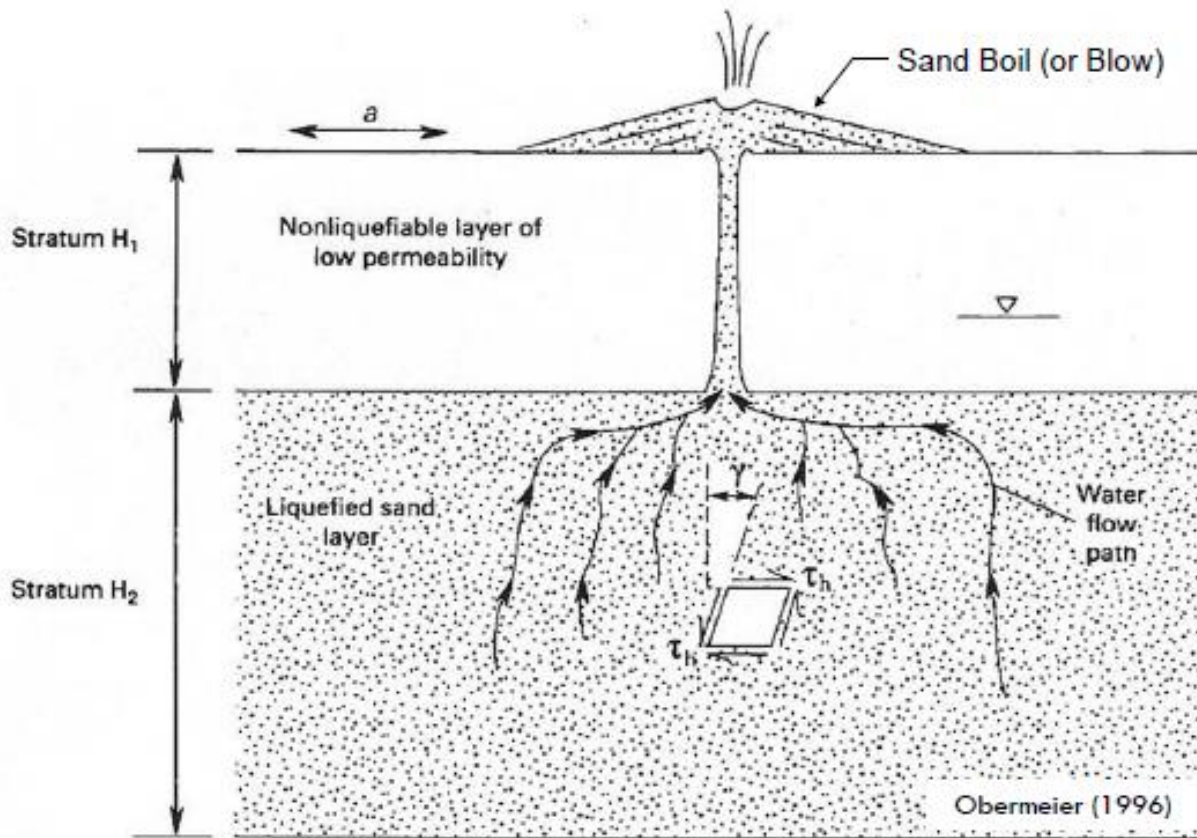
Introduction

La **liquéfaction** est une perte de résistance au cisaillement du sol saturé, créée par une quasi annulation de la contrainte effective par augmentation de la pression interstitielle.

Celle-ci peut être causée par des sollicitations monotones (parle de liquéfaction statique) ou lors d'un séisme par des sollicitations cycliques.

L'identification des sols susceptibles de liquéfaction concerne les couches étendues ou lentilles épaisses de sable lâches avec ou sans fines silteuses ou argileuses [EN 1998-5 §4.1.4 (2)P].

Introduction



Source : M.Tutle et al.



Plan de l'exposé

1. Contexte réglementaire
2. Retour d'expérience sur séismes récents : le séisme de Tohoku (2011)
3. Etudes de liquéfaction en France Métropolitaine



1989 Loma Prieta Earthquake, CA
(USGS)

1. Contexte réglementaire

Pour les ouvrages à **risque normal**, les critères et méthodes d'évaluation du potentiel de liquéfaction des sols en France ont évolué récemment sous l'effet d'un triple changement :

- législatif (JO, arrêté du 22 octobre 2010; décret n°2010-1254; arrêté du 25 octobre 2012),
- Dimensionnement technique avec l'application des Eurocodes (NF EN 1998-1, 3 et 5),
- Nouvelle carte délimitant les zones de sismicité du territoire (JO, décret n°2010-1255).

Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous action sismique, Guide technique, Presses des Ponts.



1. Contexte réglementaire

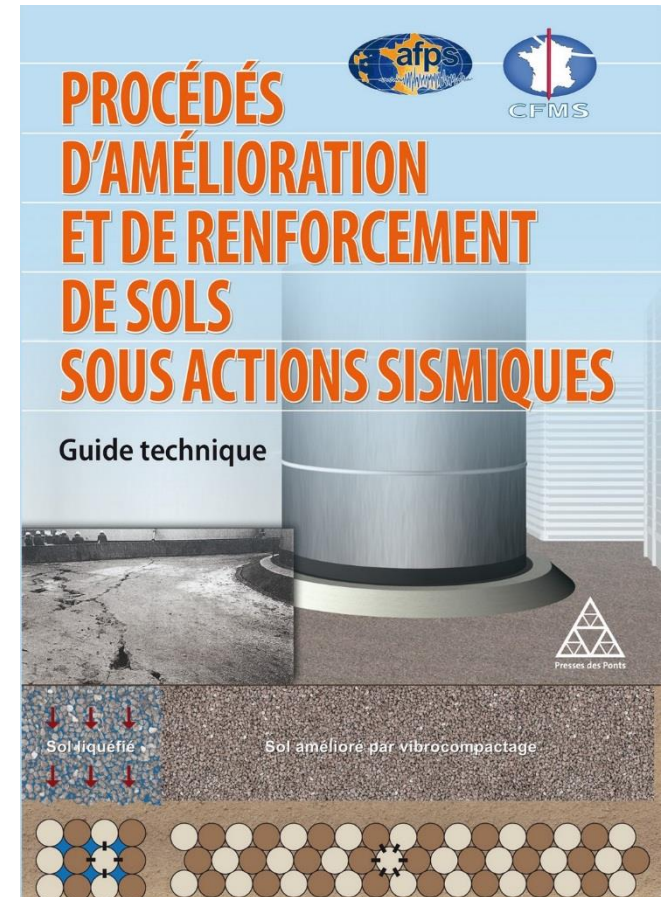
L'interdépendance entre les différents Eurocodes et les textes nationaux demande un temps suffisant de pratique pour apprécier la portée de ces nouveaux outils. Le retour d'expérience de l'analyse du potentiel de liquéfaction des sols et du dimensionnement de traitements anti-liquéfaction conformément à ce nouvel ensemble de textes est très récent, mais permet déjà d'en dégager les principales idées fortes.

La norme EN 1998 demande d'améliorer les sols susceptibles de se liquéfier sous séisme y compris en cas de choix de fondations profondes.

1. Contexte réglementaire

Afin de préciser ou de compléter certaines dispositions relatives l'analyse et au traitement contre la liquéfaction des sols :

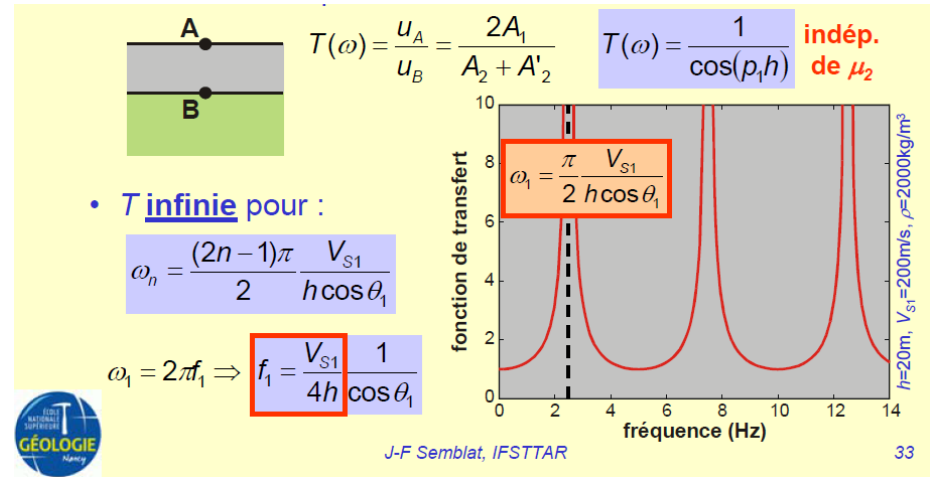
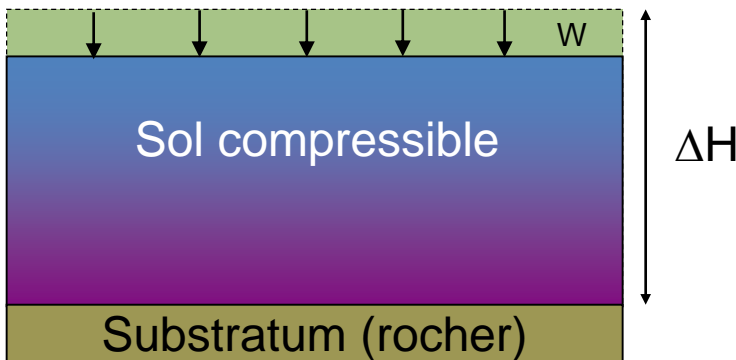
→ le Guide AFPS/CFMS intitulé « **Procédés d'amélioration et de renforcement des sols sous actions sismiques** »



1. Contexte réglementaire

L'augmentation de la compacité du sol se traduit par l'augmentation du **CRR**, le cyclic résistance ratio ou taux de résistance au cisailment cyclique du sol.

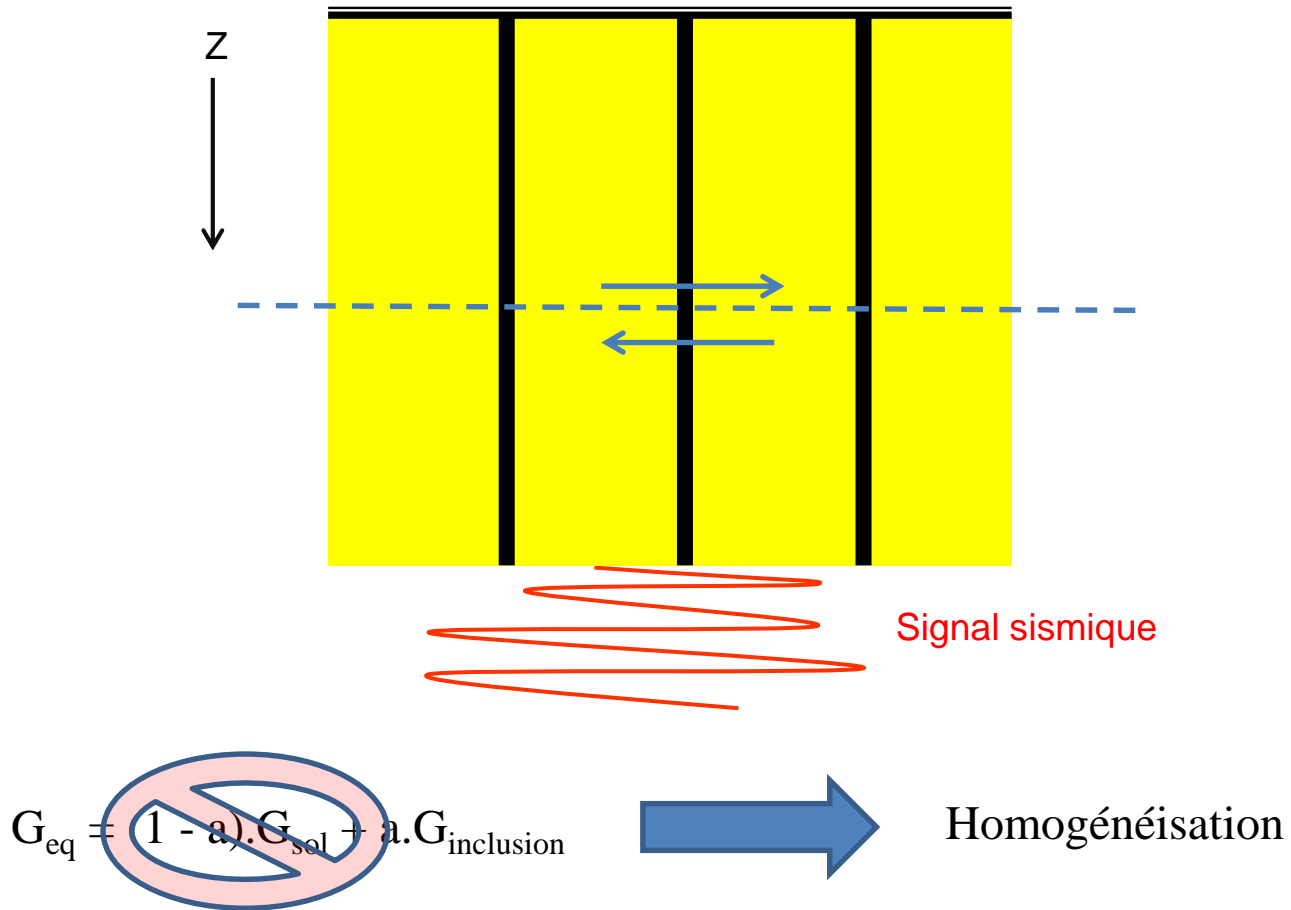
$$F_s = MSF \times CRR_{7,5} / CSR$$



*Nota : en modifiant les propriétés mécaniques d'un sol reposant sur un substratum sismique, il y a une modification de la fonction de transfert, donc il y a également une action sur le **CSR**, le cyclic stress ratio ou taux de contrainte cyclique engendré par le séisme.*

Les principales évolutions présentées dans le guide AFPS/CFMS

Le module de cisaillement



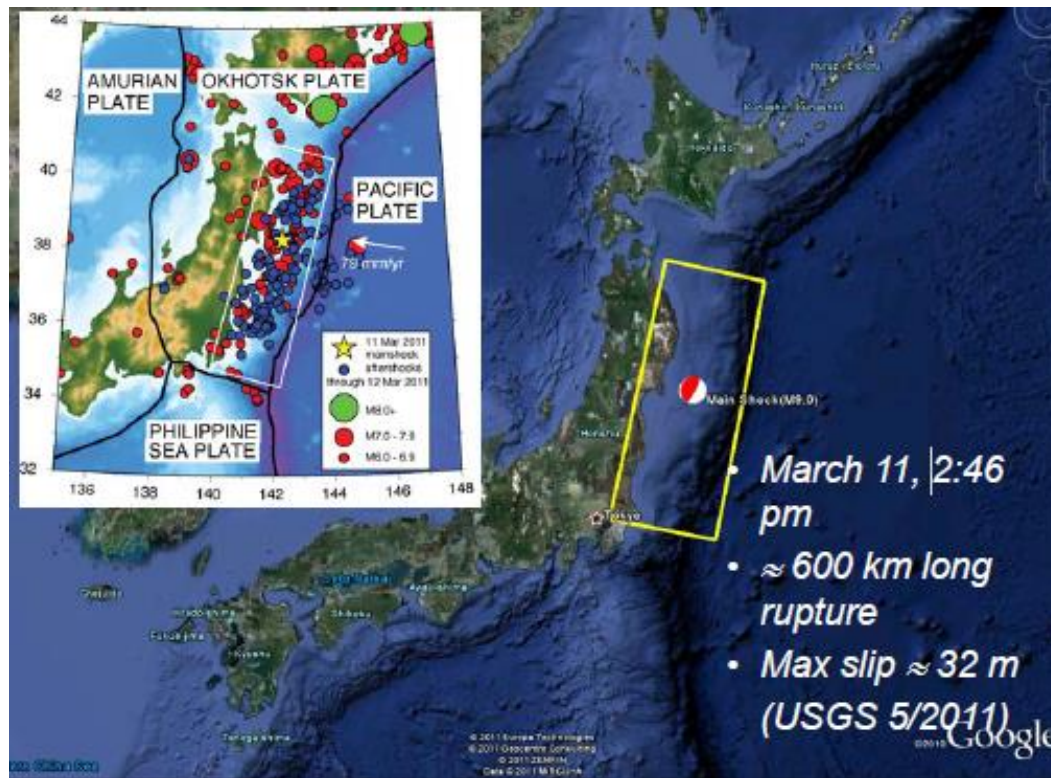
Plan de l'exposé

1. Contexte réglementaire
2. Retour d'expérience
3. Etudes de liquéfaction en France Métropolitaine



2. Retour d'expérience

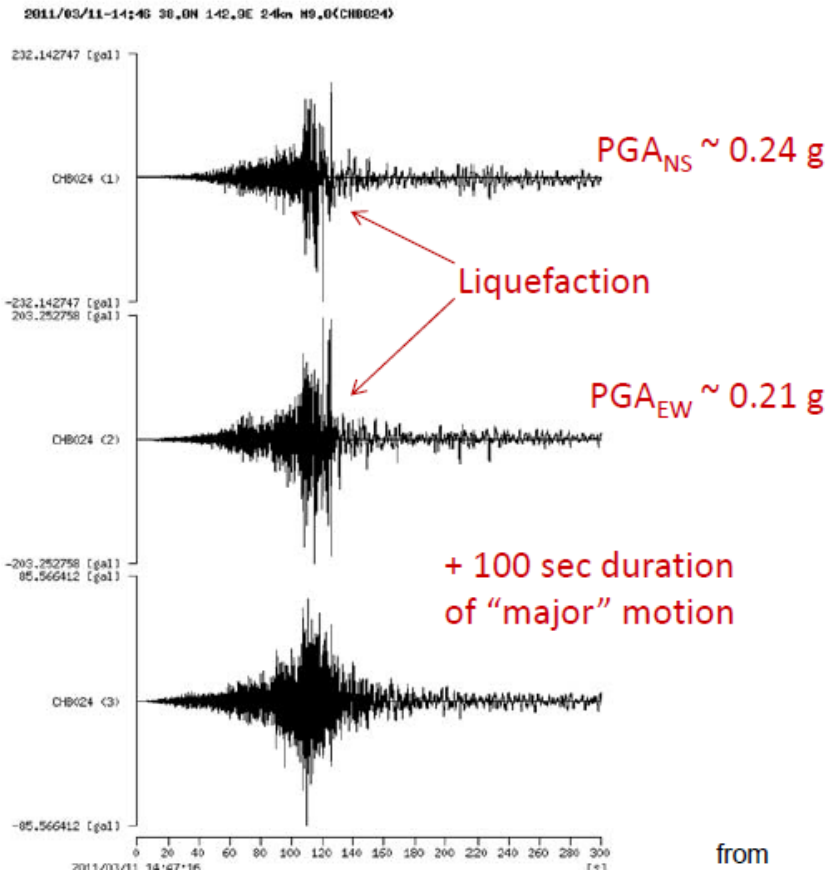
Manifestation de la liquéfaction lors de séismes récents et de forte magnitude : cas du Séisme de Tohoku (M.9), sur la Côte Pacifique du Japon, le 11 mars 2011, sur la ville d'Urayasu (Baie de Tokyo) située à environ 370 km au sud-ouest de l'épicentre.



2. Retour d'expérience

Les accélérations enregistrées dans la région de la baie de Tokyo n'ont pas dépassé 3 m/s^2 (Yasuda et al., 2012).

K-Net CHB024



Source : R.Boulanger

from



2. Retour d'expérience

Ce sont des valeurs d'accélération proches des accélérations maximales de dimensionnement comparables avec celles en France continentale pour le dimensionnement d'ouvrages à risque normal ($a_g \times S = 2,6 \text{ m/s}^2$ pour une zone de sismicité 4 où $a_{gr} = 1,6 \text{ m/s}^2$, pour une classe de sol E où le paramètre de sol $S = 1,8$ et pour un bâtiment ayant un coefficient d'importance de II).

La durée de la sollicitation sismique du séisme de 2011 a été particulièrement longue du fait de la taille exceptionnelle de la surface de rupture (~500 km x 200 km), de l'ampleur du mouvement co-sismique le long de la zone de rupture, (Imakiire et al., 2012) et de larges répliques s'étant produites peu après le séisme principal.

Cette durée très longue de la sollicitation sismique a généré un nombre de cycles de chargement cycliques particulièrement important et a conduit à la liquéfaction des sols (Unjoh et al., 2012).

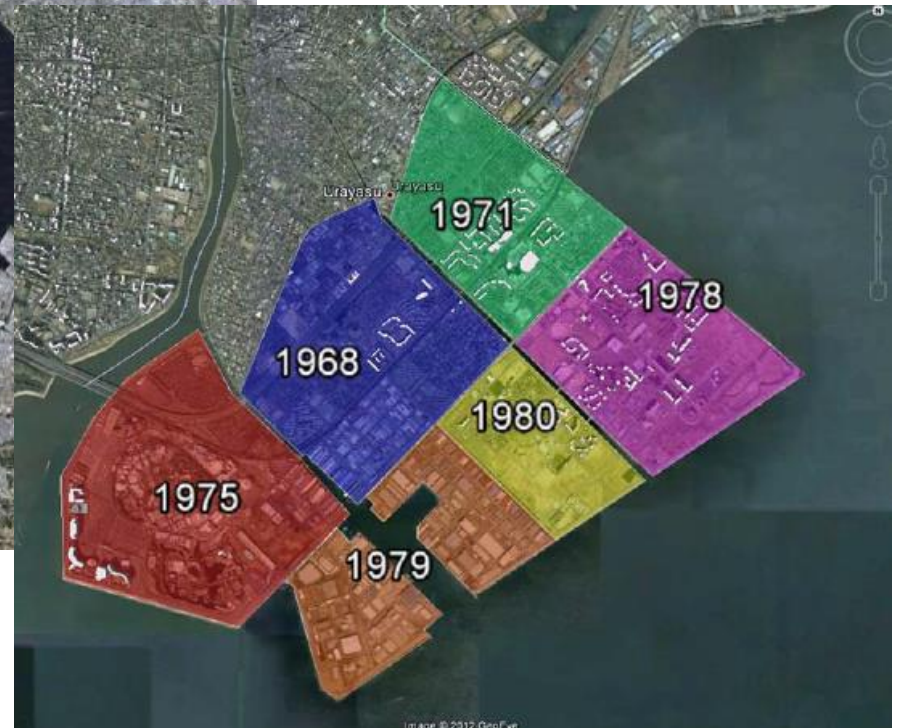
2. Retour d'expérience



Source : R.Boulanger

Source : K.Tokimatsu

Ville d'Urayasu (Baie de Tokyo)



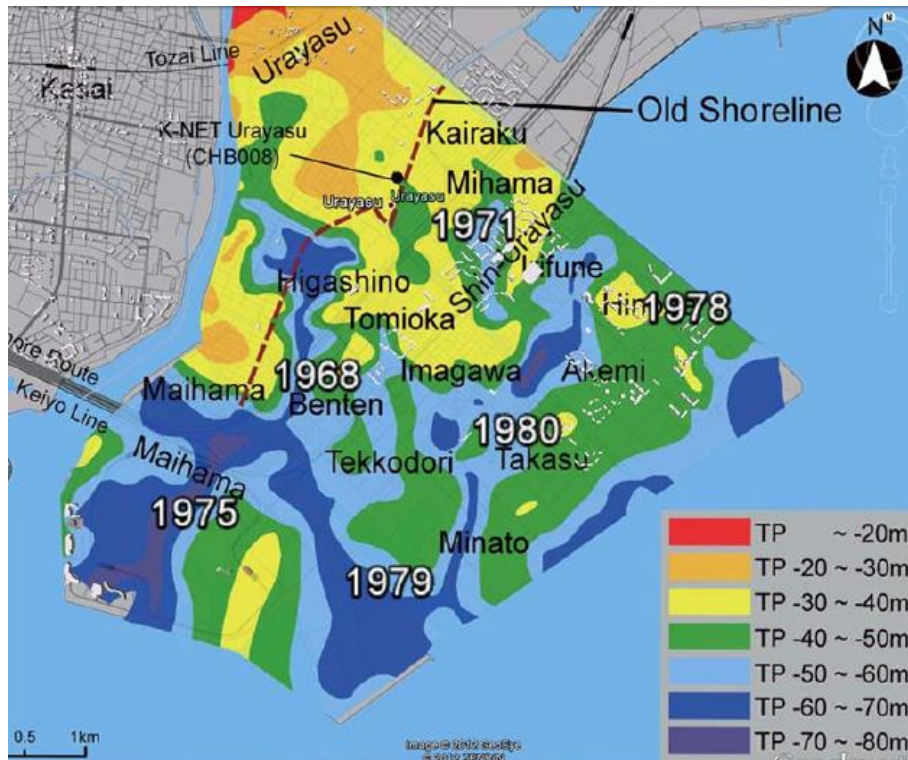
Date de mise en œuvre des remblais de surface récents

2. Retour d'expérience

Source : R.Boulanger



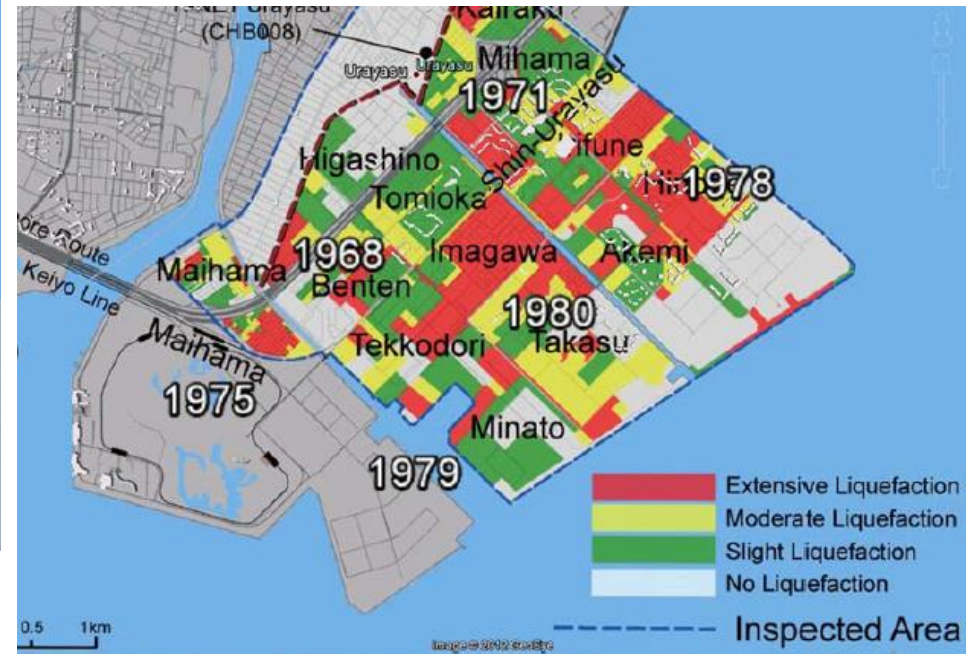
2. Retour d'expérience



Épaisseur des sédiments compressibles

Source : K.Tokimatsu

Diagnostic liquéfaction des sols



“Most of the non-damaged areas in the reclaimed land had been treated with some ground improvement method such as sand compaction piles and gravel drain.”

Katsumata & Tokimatsu (2012)

2. Retour d'expérience

Manifestation de la liquéfaction en zone continentale (loin des limites de plaques). Le cas de la zone sismique de New Madrid (Missouri) et son activité sismique de 1811 -1812 (plus de 1 000 séismes, dont certains $M > 7$): des indices visibles sur environ 10 000 km² (M. Tuttle).



Plan de l'exposé

1. Contexte réglementaire
2. Retour d'expérience
3. Etudes de liquéfaction en France Métropolitaine



3. Etudes de liquéfaction en France Métropolitaine

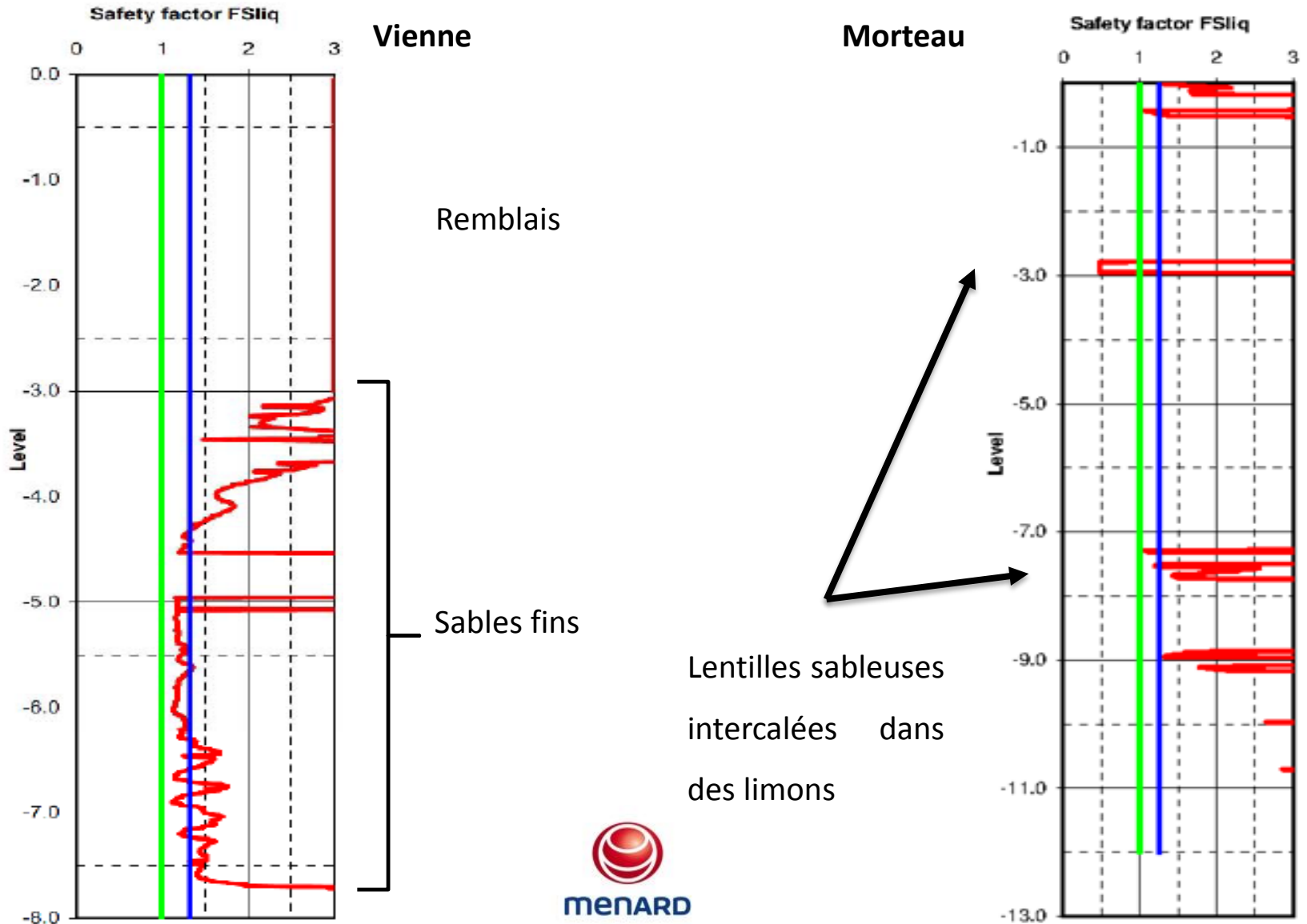
Pour l'analyse du potentiel de liquéfaction des sols, un point fondamental est de considérer un niveau de la nappe ainsi qu'un niveau de la surface du sol approprié. L'Eurocode 8-5 (§4.1.4.(2)P) indique précisément que l'étude de la susceptibilité des sols à la liquéfaction "doit être effectuée pour les conditions de site en champ libre (niveau de la surface du sol, niveau de la nappe phréatique), prédominantes durant la vie de la structure."

3. Etudes de liquéfaction en France Métropolitaine

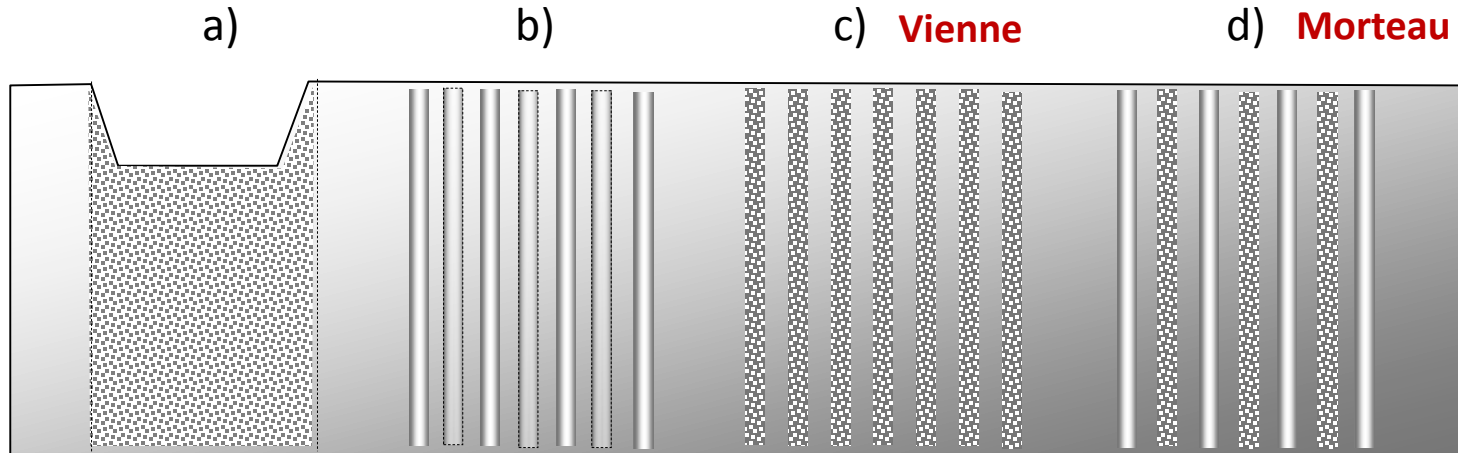
Deux exemples de chantiers réalisés en 2013 : Morteau (Doubs) et Vienne (Isère). Pour les deux sites, il s'agit de bâtiments de type industriel ou commercial, exposés à un niveau de **sismicité 3**, modéré, selon le nouveau zonage français. Dans les deux cas, il s'agissait de **bâtiment de catégorie II** selon la norme EN 1998, ce qui conduit à retenir une accélération maximale de surface de **1.6 m/s²**. La magnitude retenue est prise égale à 6.

- *Emploi de méthodes basées sur des corrélations entre mesures in situ et contrainte de cisaillement critique sur des sites ayant ou non liquéfié (annexe B de l'EN 1998-5. L'EN 1998-5 (§4.1.4 (11) P).*
- *Coefficient de sécurité minimal de 1.25 entre le taux de résistance au cisaillement cyclique du sol (CRR) et le taux de contrainte cyclique engendré par le séisme (CSR). L'évaluation du potentiel de liquéfaction a été menée sur la base d'essais au pénétromètre statique ou Cone Penetration Test (CPT) en anglais.*

3. Etudes de liquéfaction en France Métropolitaine

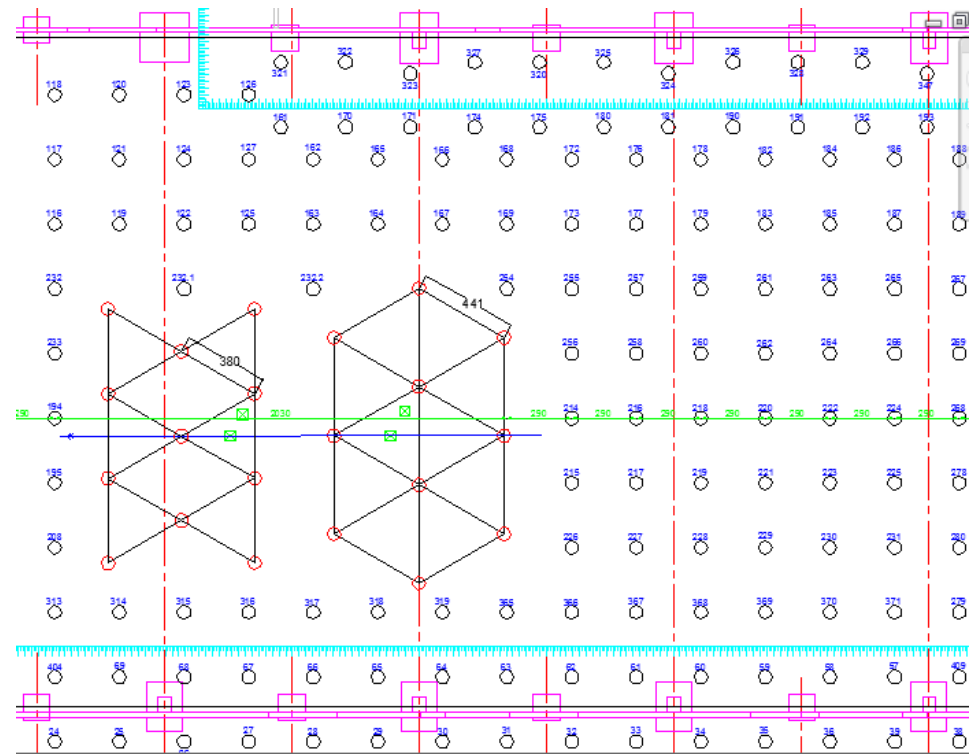


3. Etudes de liquéfaction en France Métropolitaine



Principe de traitement des sols contre la liquéfaction

- a) Densification des sols dans la masse par compactage dynamique ou vibro-compactage.
- b) Réalisation d'inclusions rigides verticales.
- c) Drainage vertical + homogénéisation par colonnes ballastées.
- d) Solution mixte de renforcement par éléments verticaux rigides et drainage vertical par colonnes ballastées.



Site de Vienne

- 2 maillages de colonnes ballastées ont été testés : 2.5×2.5 et 2.9×2.9 m.
- Phase 1 : approche par homogénéisation (Hashin) conduisant à un module de cisaillement $G_{\text{équivalent}}$ supérieur à celui du sol initial.
- Phase 2 : prise en compte de l'amélioration des sols entre les colonnes par réalisation de sondages au pénétromètre statique.

Conclusions

Merci pour votre attention



Christchurch (M6.3) – New Zeland – Cubrinovski & Green et al. (2011)