



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Traitements et améliorations des sols LIQUÉFACTION / IR / ISR

JST DU 05/04/2023

Stéphane BRÛLÉ



Journée parrainée par KELLER



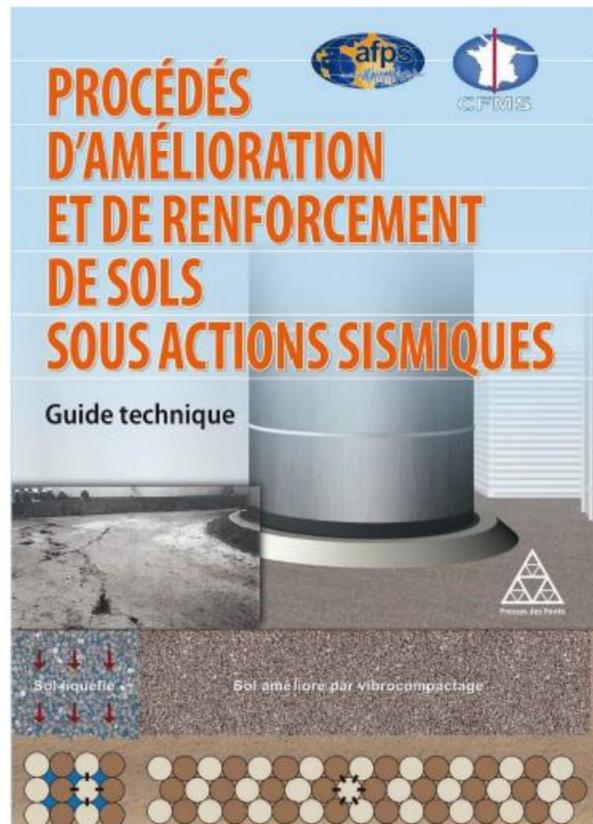
Sommaire

- Contexte de l'étude
- Le procédé d'Inclusion Rigide Refoulante (ISR)
- Mise en œuvre et résultats



cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



Maxime Périgault
Chargé d'Affaires



Christophe Raynaud
Conducteur de Travaux



Gillian Erbeja
Ingénieur Principal

Contexte de l'étude

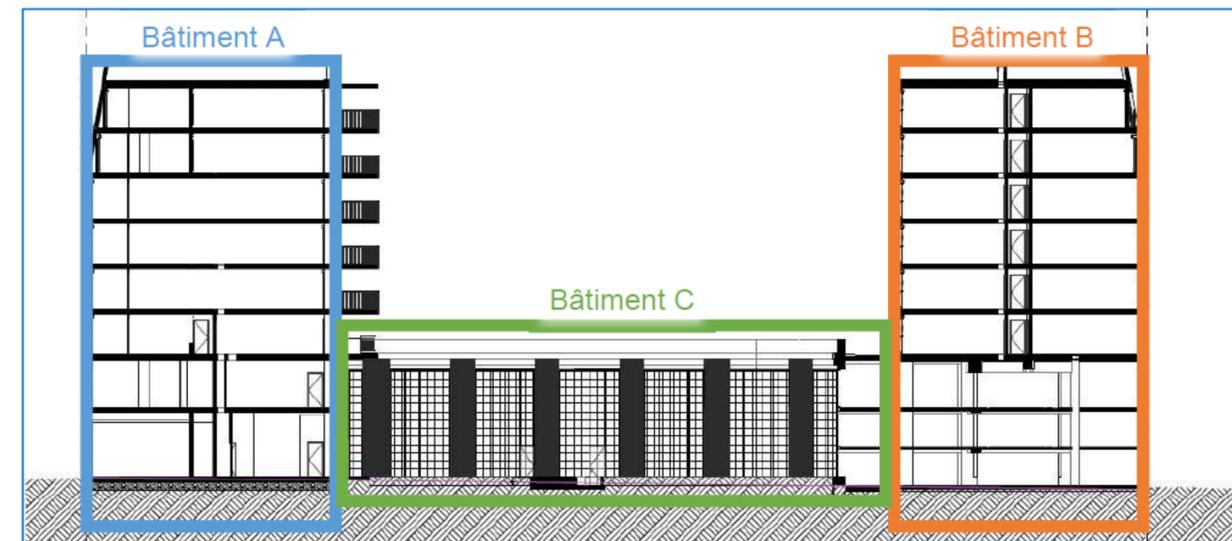


menARD

TRAITEMENT ET AMÉLIORATION DES SOLS
LIQUEFACTION / IR / ISR

Contexte de l'étude : travaux et objectifs

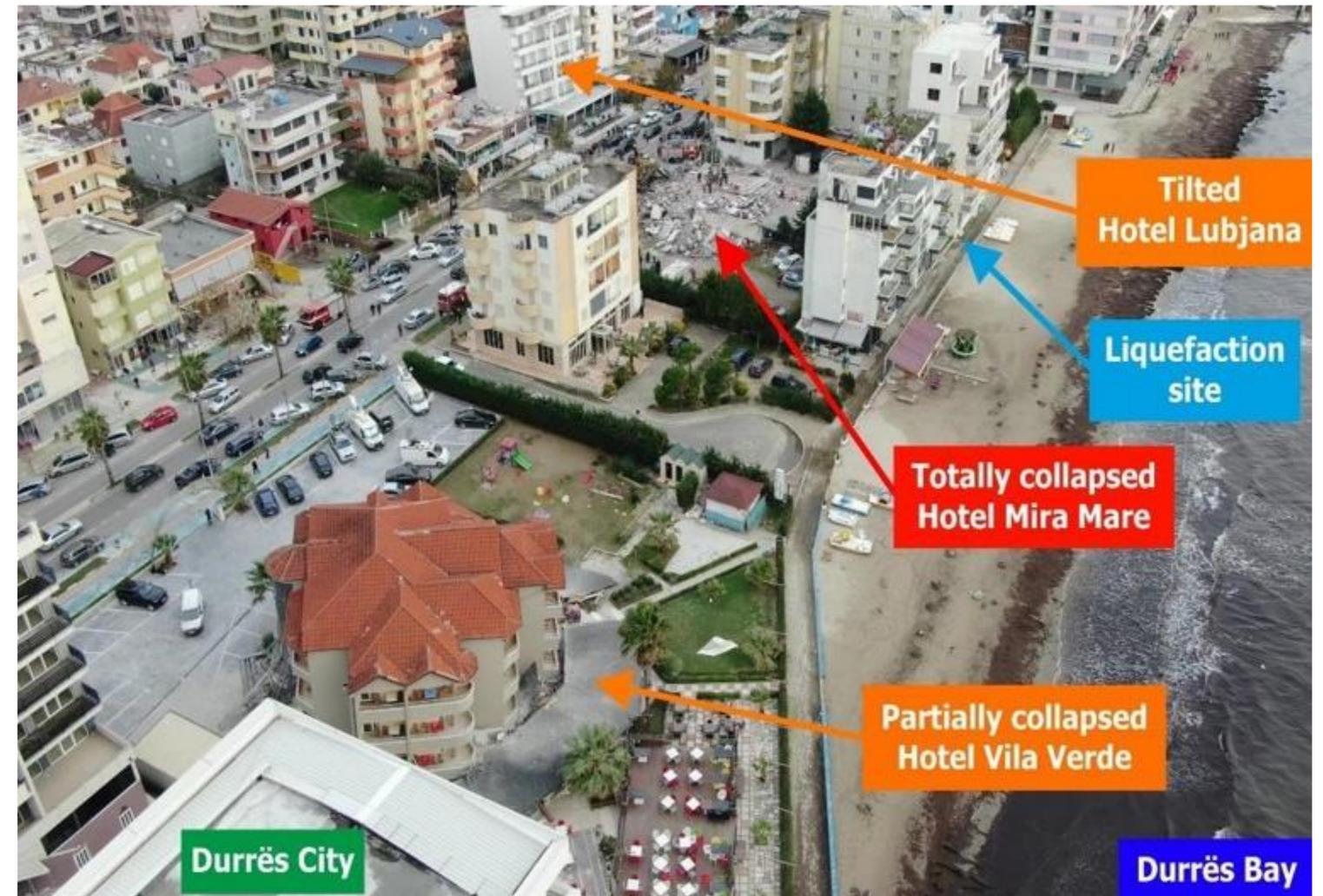
- Site localisé à Saint-Martin d'Hères (Isère) en périphérie de Grenoble pour des travaux en 2022.
- Travaux de renforcement de sol par inclusions rigides de type CMC (7 à 8 m/PF) sous radier de 4 bâtiments de logement.
- Bâtiments R+1 à R+7. Contraintes verticales de service entre 70 à 130 kPa.
- Limiter l'amplitude des tassements sous charges de services.
- Améliorer le coefficient de sécurité vis-à-vis de l'aléa liquéfaction. Objectif $F > 1.25$.



Contexte de l'étude : aléa liquéfaction des sols



<https://isde-sha.al/>



<https://isde-sha.al/>

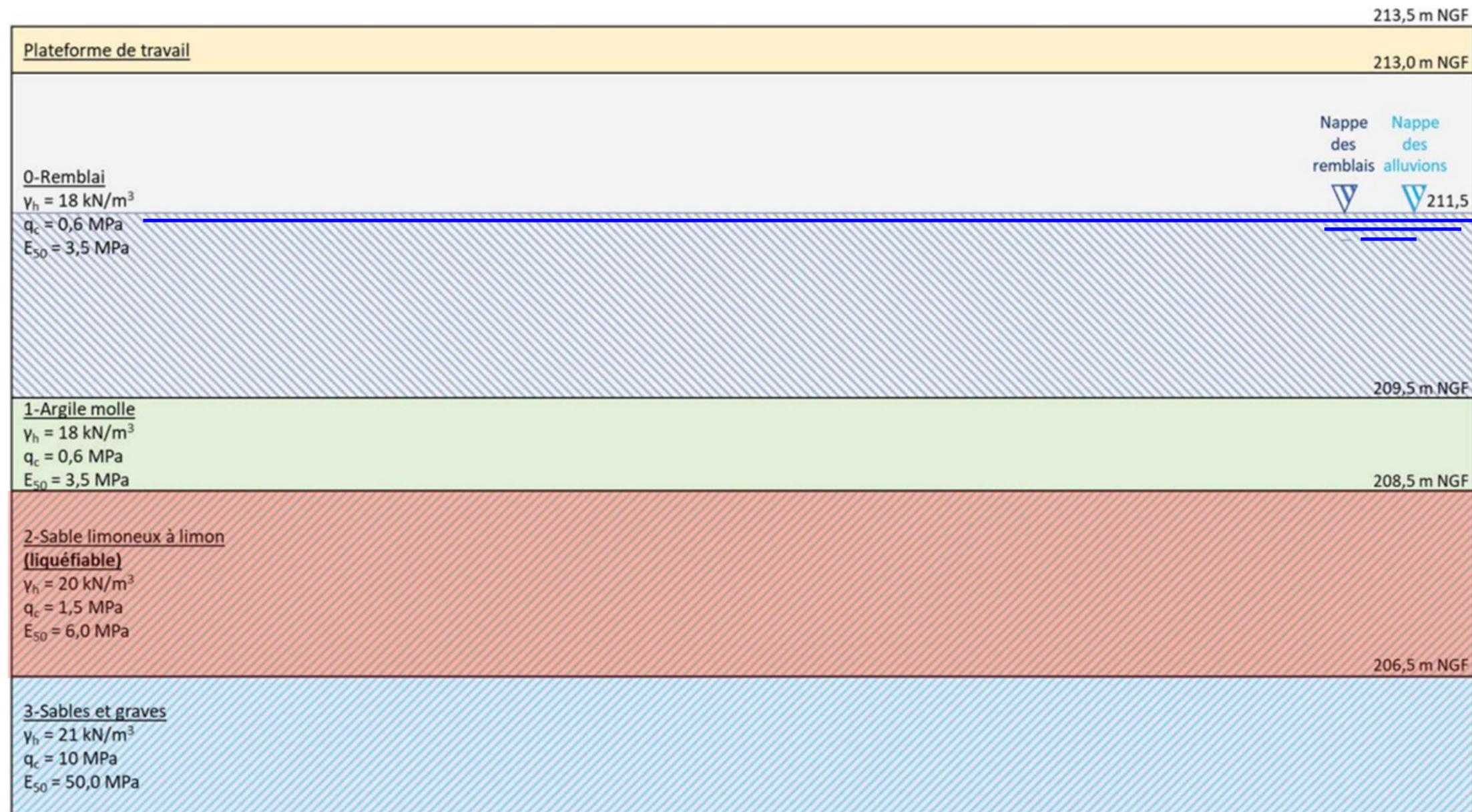
À consulter :

AFPS (2020). Rapport de la Mission Post-Sismique sur le séisme de Durrës en Albanie, du 26 novembre 2019.

EERI (2021). Mw 6.4 Albania Earthquake on Albania 26 november, 2019. Vol2: Seismology and geotechnical effects.

Phénomènes de liquéfaction survenus lors du séisme du 26 novembre 2019 à Durrës en Albanie

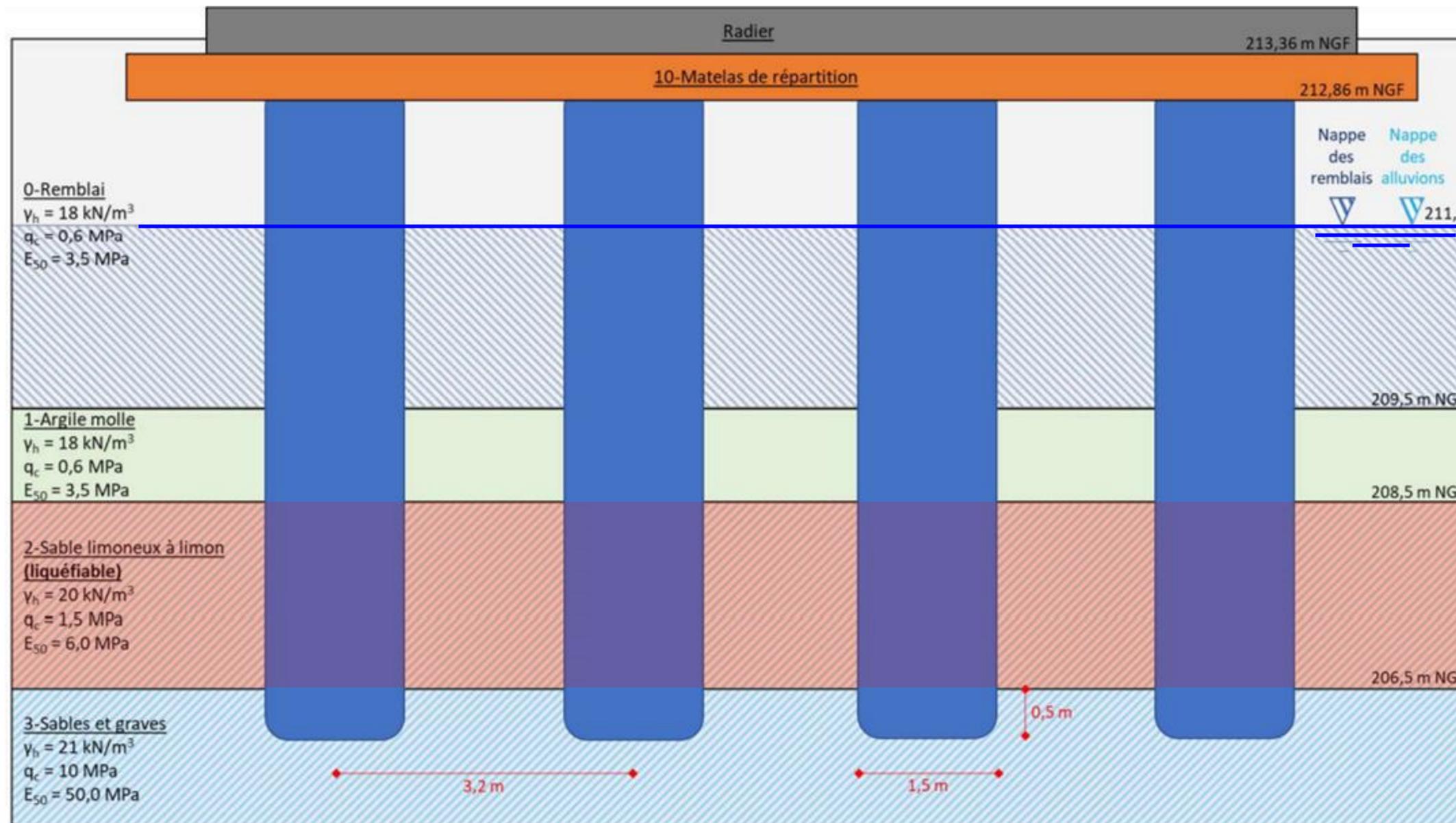
Contexte de l'étude : le modèle de sol



Rapport de sol G2 PRO de Ginger

Aléa liquéfaction

Contexte de l'étude : projet initial de renforcement

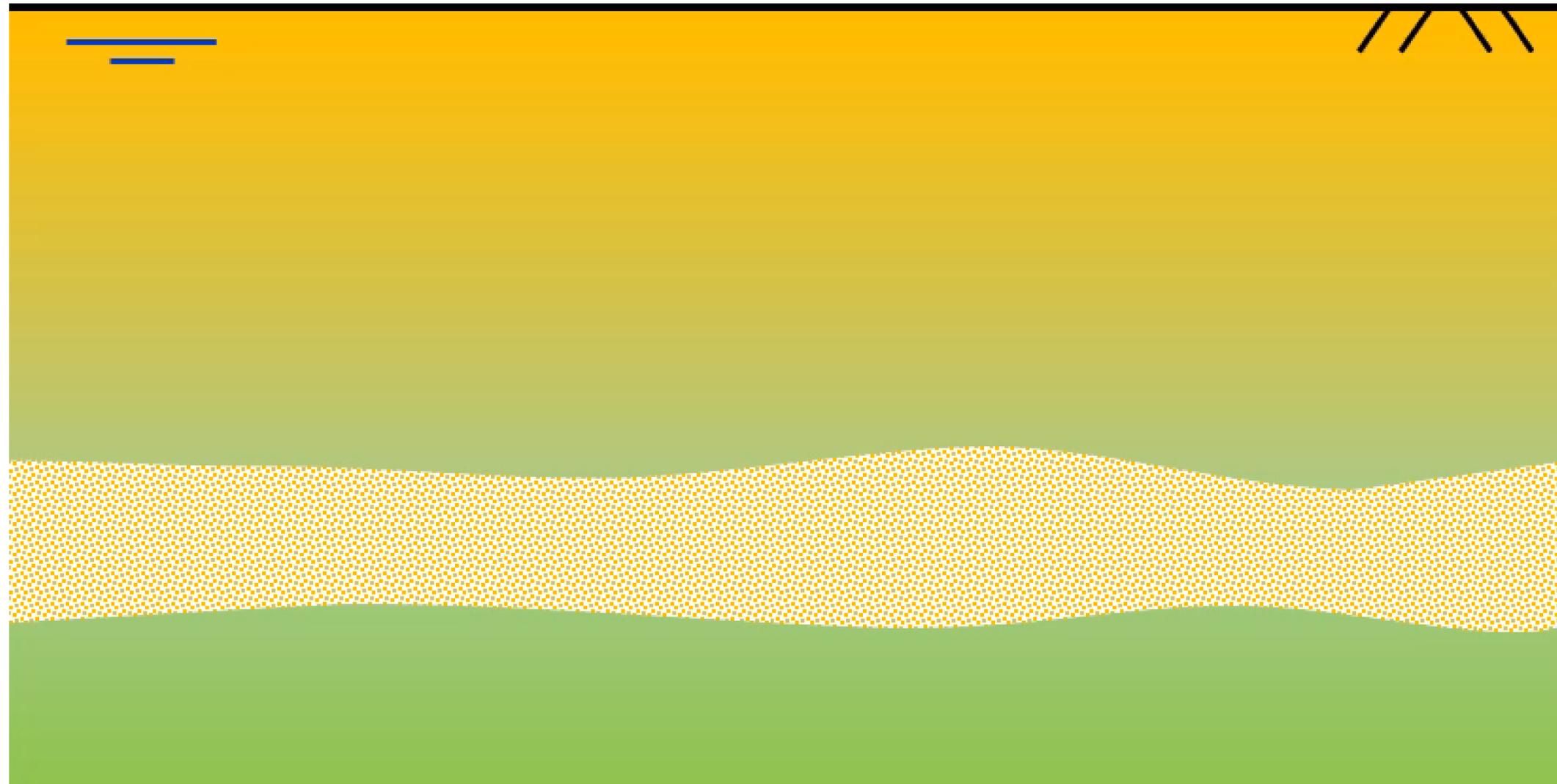


Rapport de sol G2 PRO de Ginger

Inclusions de 1,5 m de diamètre
Maille 3,2 x 3,2 m
Taux de substitution de 17,3 %

Aléa liquéfaction

Contexte de l'étude : projet final de renforcement



Chantier MENARD

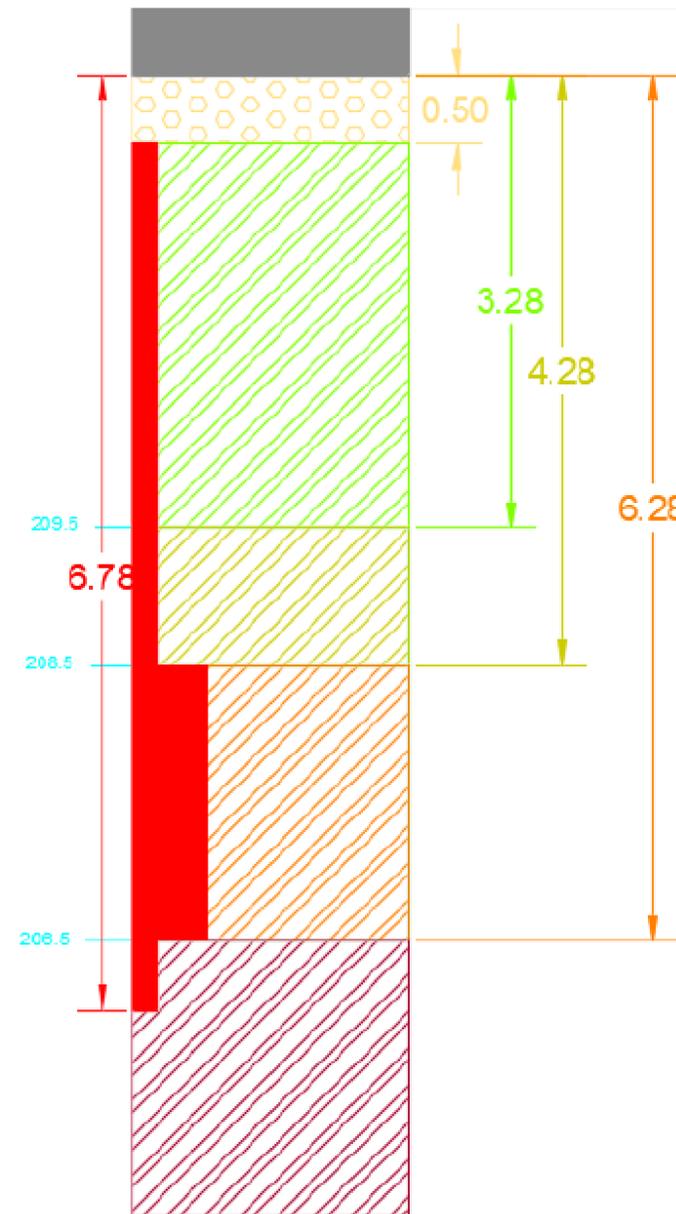
Inclusions de 0.65 m de diamètre
Maille 2.1 x 2.1 m
Taux de substitution de 7.5 %

Partie haute et ancrage : 0.32 m
de diamètre

Aléa liquéfaction

Contexte de l'étude : projet final de renforcement

	Épaisseur	P_{1^*}	E_M	α
	m	MPa	MPa	
Couche de forme	0.5	1.7	1.5	1/4
Remblais	3.4	0.3	3.0	2/3
Argiles molles	1.0	0.3	3.0	2/3
Sables limoneux	2	0.8	8.0	2/3
Sables et graviers		1.4	15.0	1/3



Chantier MENARD

Inclusions de 0.65 m de diamètre
Maille 2.1 x 2.1 m
Taux de substitution de 7.5 %

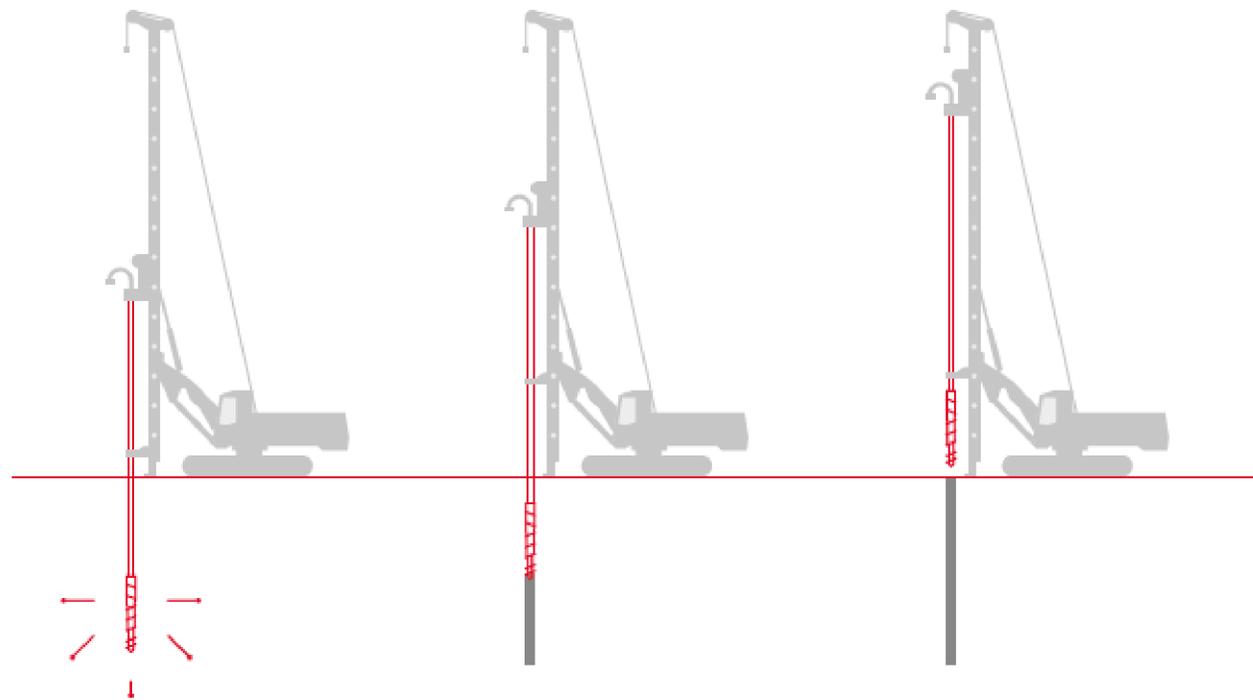
Partie haute et ancrage : 0.32 m
de diamètre

Aléa liquéfaction



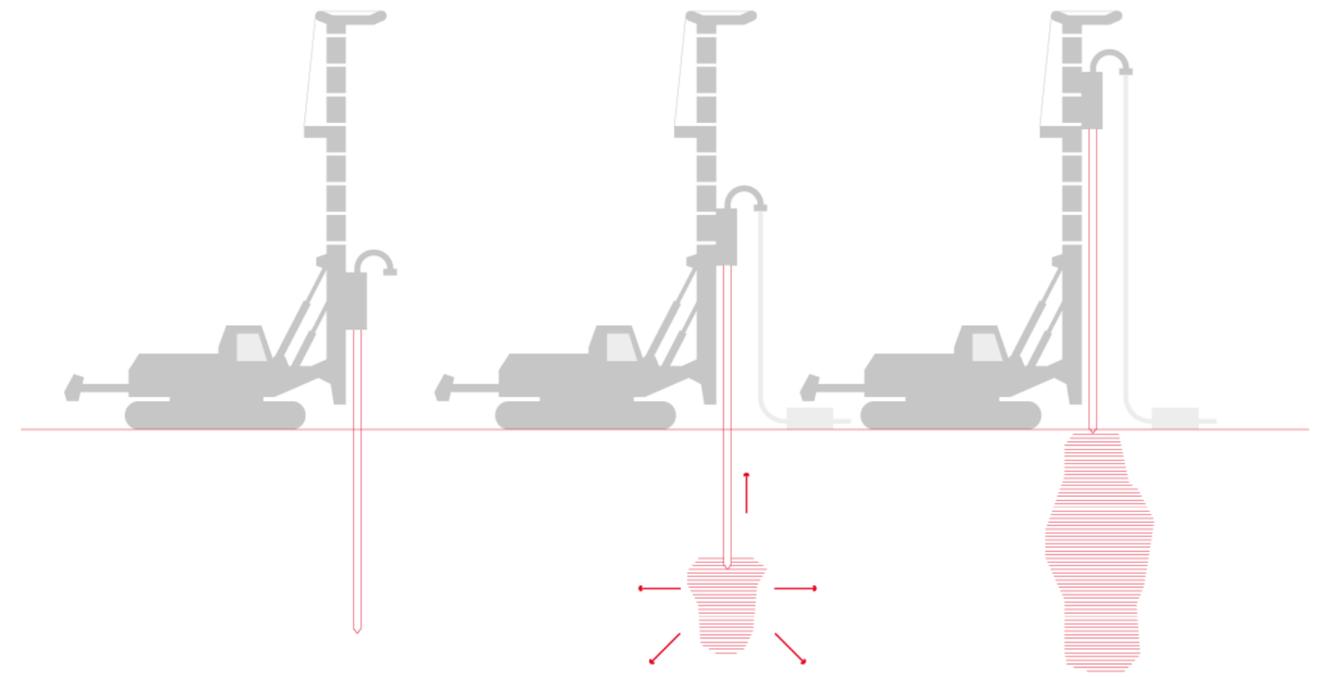
cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

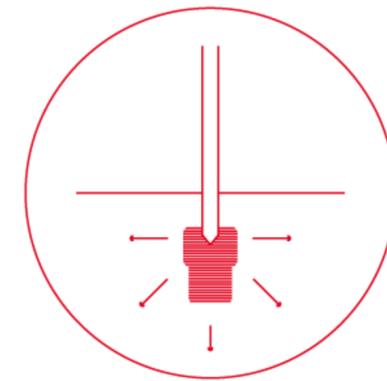


CMC

ISR



Le procédé ISR



menard

TRAITEMENT ET AMÉLIORATION DES SOLS
LIQUEFACTION / IR / ISR

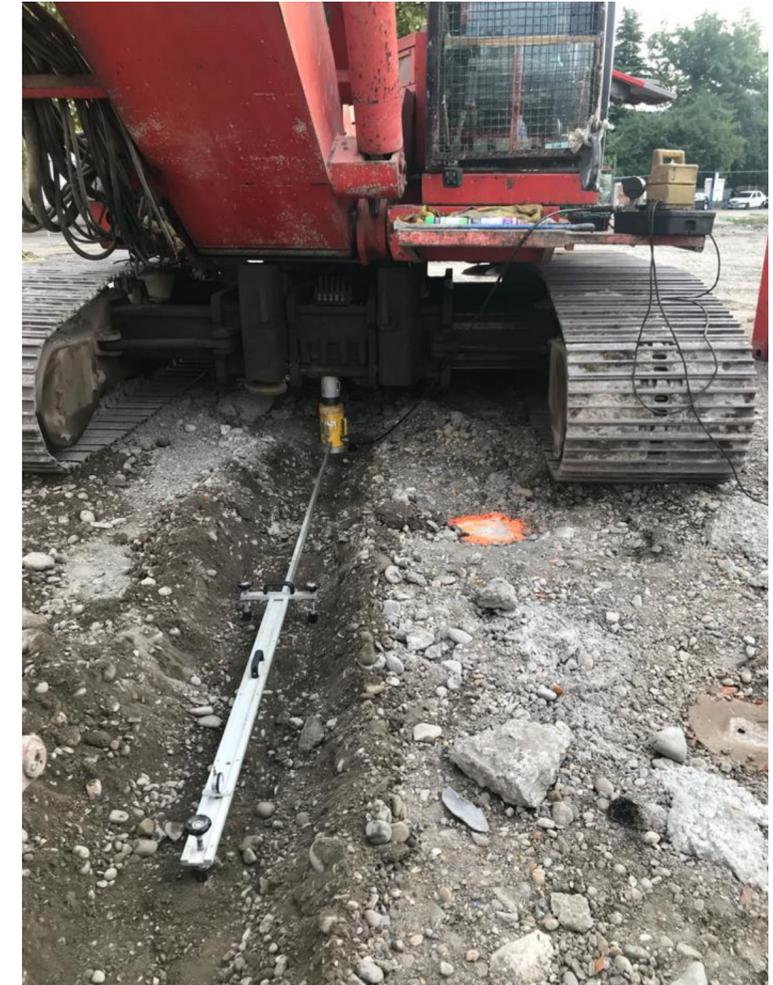
Le procédé ISR

- **L'Injection Solide Refoulante (ISR) ou Compactage Horizontal Statique (CHS)** est une technique utilisée pour :
 - Stabiliser et densifier les sols compressibles,
 - Atténuer la liquéfaction des sols en cas de séismes.
- Le traitement implique l'injection d'un mortier, généralement à haute viscosité, sous pression modérée et à un débit contrôlé, qui déplace le sol autour de l'outil de forage et le compacte ensuite.
- Le terrain est refoulé à la descente par l'outil de forage sur le diamètre de cet outil (généralement inférieur à 280 mm). À la remontée de l'outil, un refoulement complémentaire du sol est obtenu grâce à la pression exercée par le mortier d'injection mis en œuvre par la pompe située en surface.
- Les mortiers de compactage peuvent également être utilisés comme éléments de renforcement verticaux similaires aux inclusions rigides ou encore les Colonnes à Module Contrôlé (CMC).



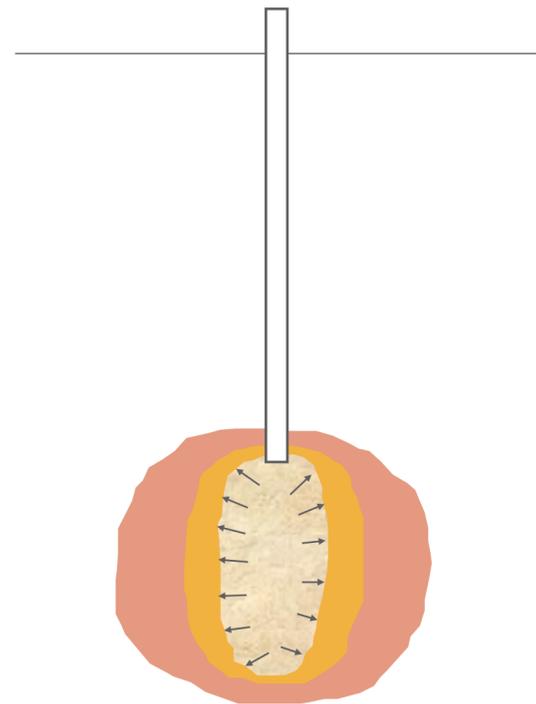
<https://www.menardfrance.fr/soil-expert-portfolio/injection-solide-refoulante/>

Le procédé ISR



<https://www.menardfrance.fr/soil-expert-portfolio/injection-solide-refoulante/>

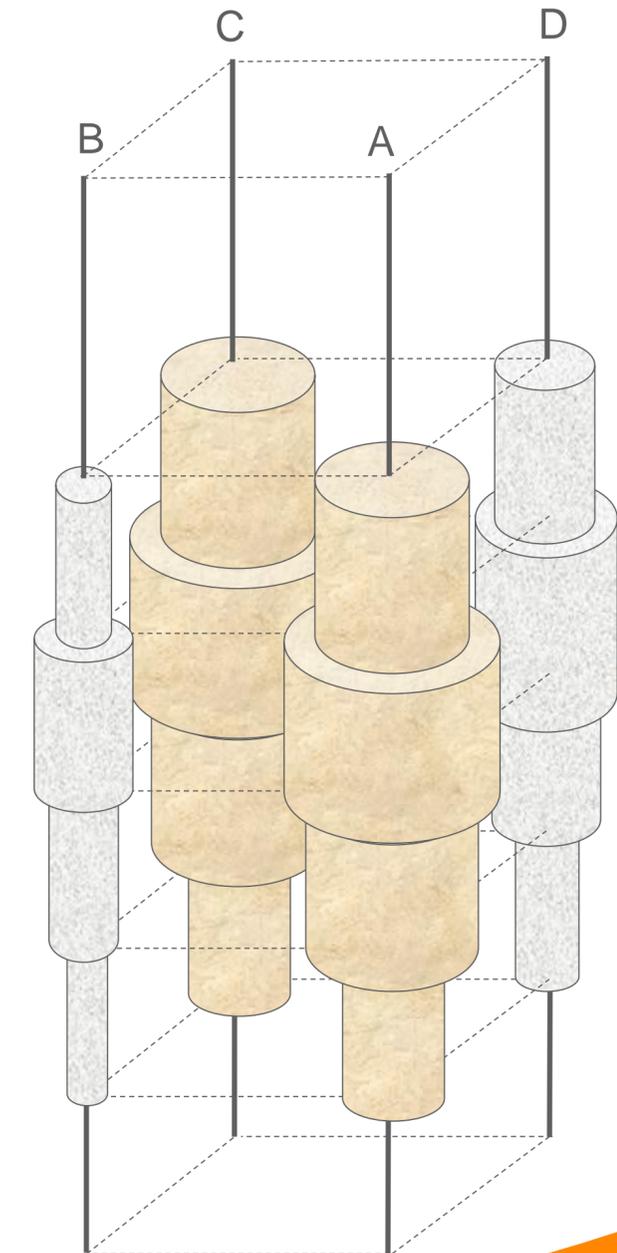
Le procédé ISR



- Matériau
- Domaine plastique
- Domaine pseudo-élastique

- La vitesse d'injection est limitée pour chaque sol, en fonction des caractéristiques du mortier.
- La contrainte verticale en place doit être suffisante pour permettre au mortier de déformer le sol horizontalement.
- La tarière refoulante permet d'avoir déjà un premier degré de compactage des sols environnants.
- La maille carrée permet de revenir faire un traitement en plusieurs phases en inter-maille.
- **La planche d'essai** est nécessaire avec sondages réalisés avant et après est nécessaire pour vérifier ou optimiser les taux d'incorporation.

<https://www.menardfrance.fr/soil-expert-portfolio/injection-solide-refoulante/>





cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



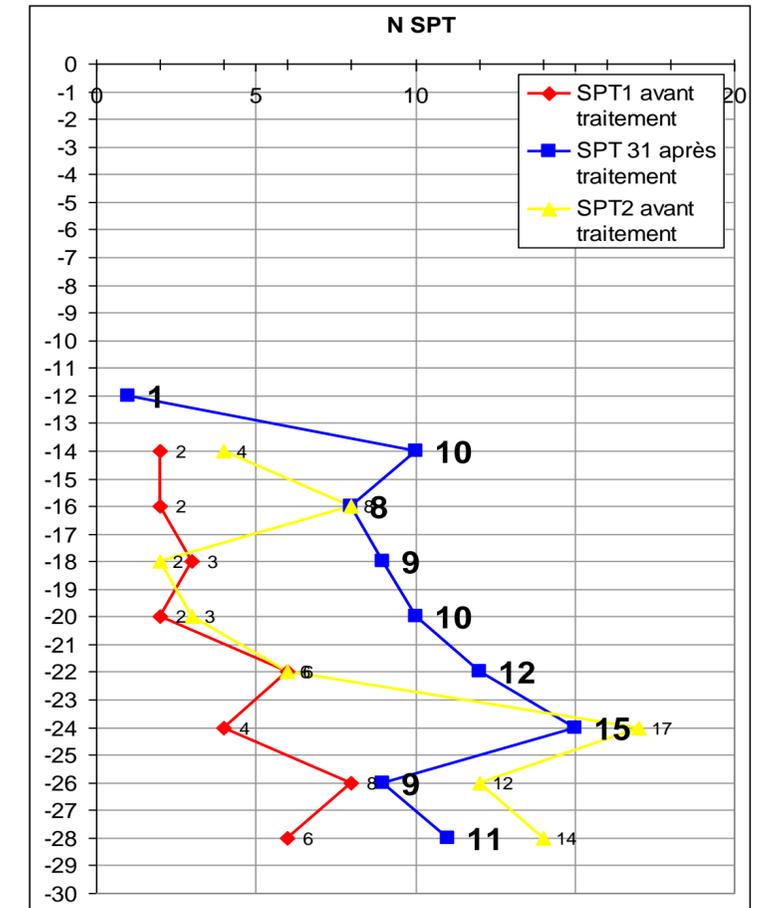
PRATIQUE DE

l'interaction sol-structure sous séisme



APPLICATION AUX FONDATIONS ET AUX SOUTÈNEMENTS

afnor
EDITIONS



Mise en œuvre et résultats



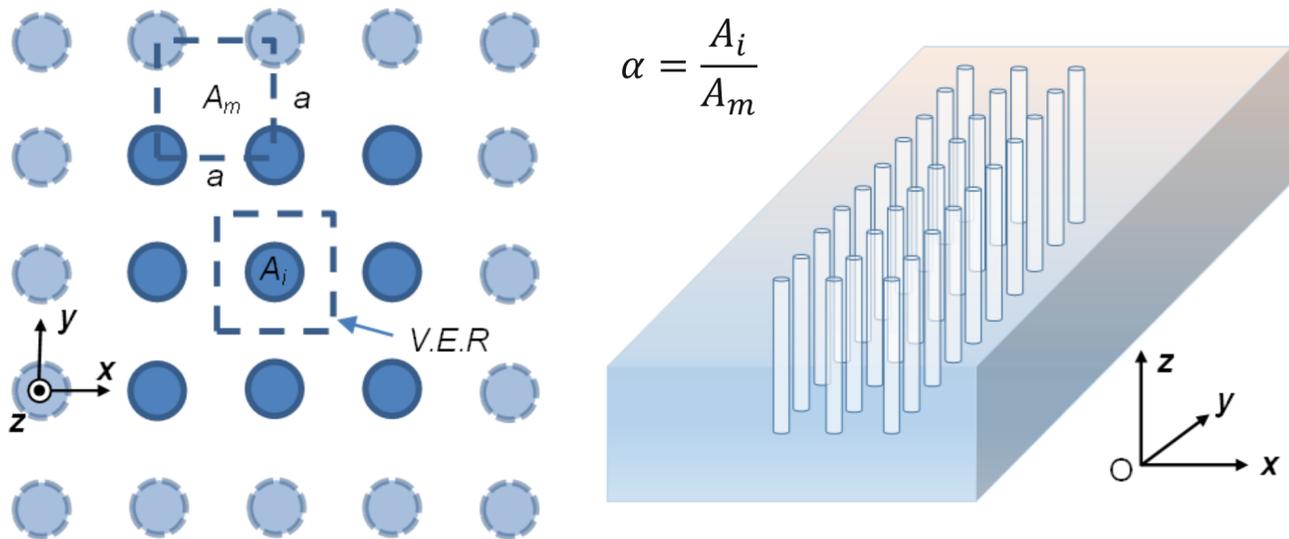
menard

TRAITEMENT ET AMÉLIORATION DES SOLS
LIQUEFACTION / IR / ISR

Mise en œuvre et résultat : approche initiale

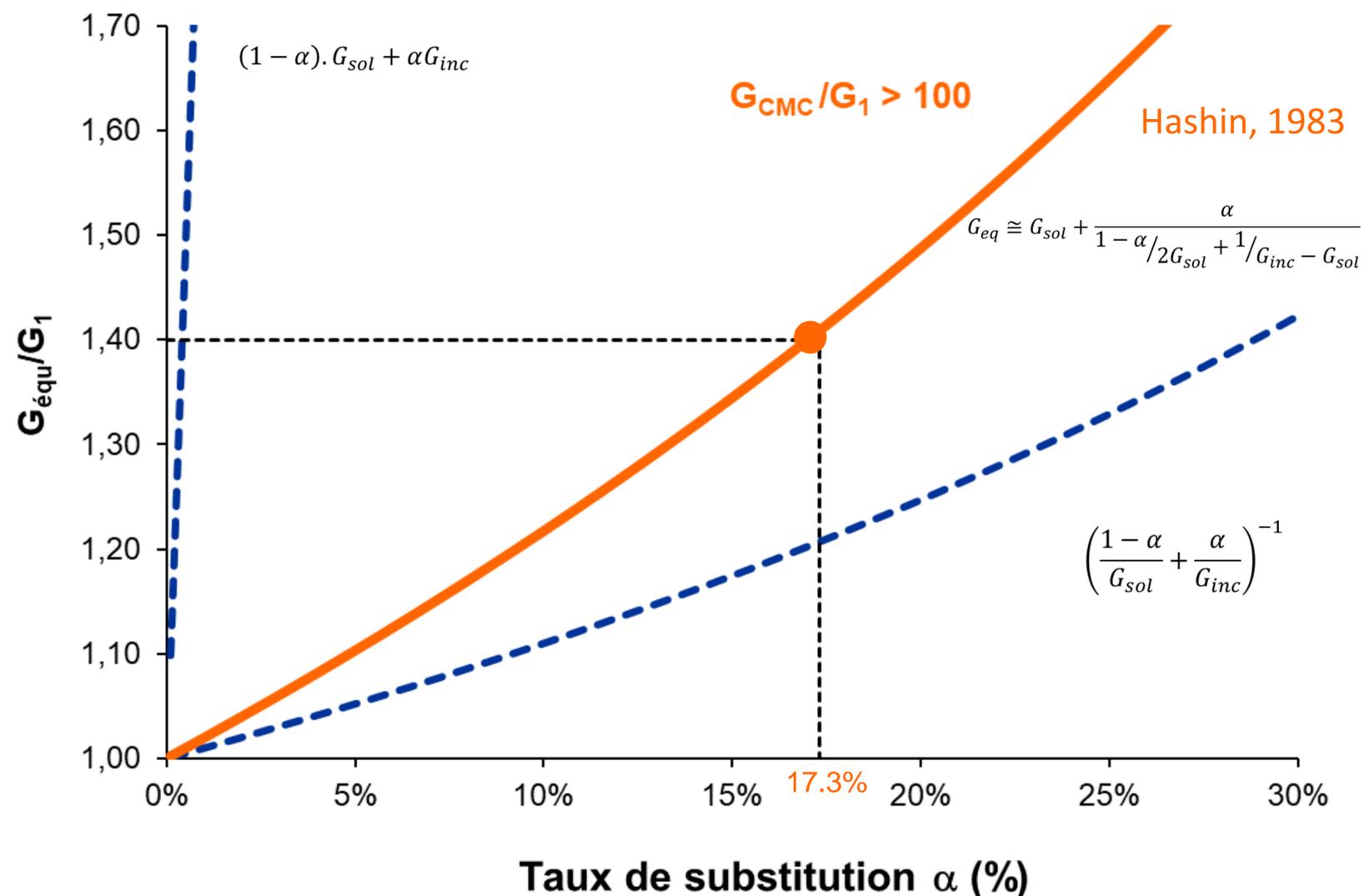
Amélioration du coefficient de sécurité par augmentation du module équivalent G_{eq} du sol renforcé.

Le module G_{eq} est obtenu par technique d'homogénéisation du sol composite.



Le coefficient de sécurité initial $F_{s\ initial}$ est de 0.93. Pour atteindre la valeur de 1.25 pour $F_{s\ final}$, il faut une augmentation de la résistance au cisaillement de 34.4%.

On recherche donc $G_{eq} / G_1 > 1.34$. Pour $G_{eq} / G_1 = 1.4$ on obtient $\alpha = 17.3\%$



Une solution possible : maille 2.3 x 2.3 m avec un diamètre de 1.5 m

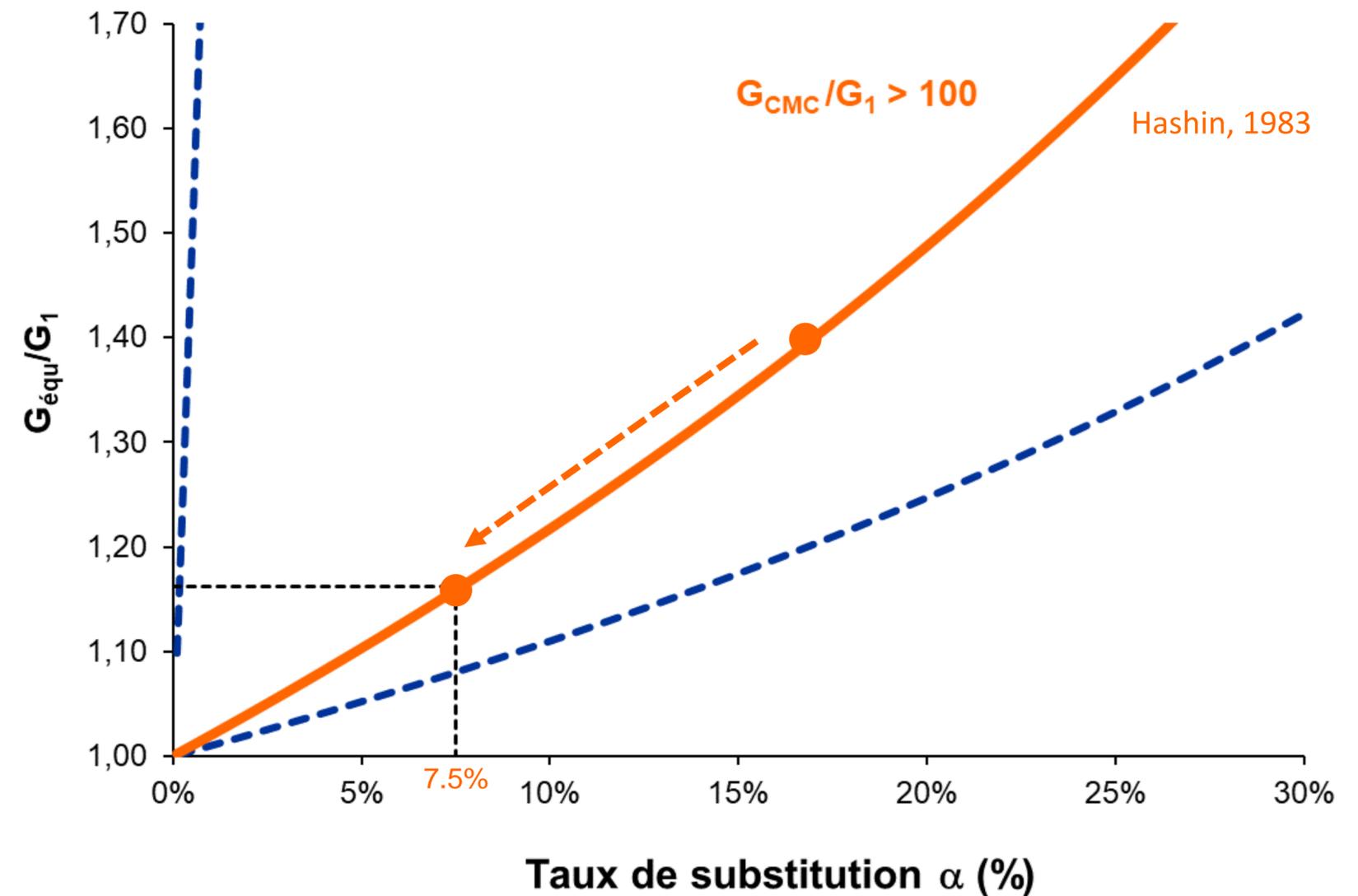
Mise en œuvre et résultat : approche optimisée

Choix d'un diamètre moins important, $\phi_{\text{ISR}} = 0.65 \text{ m}$.

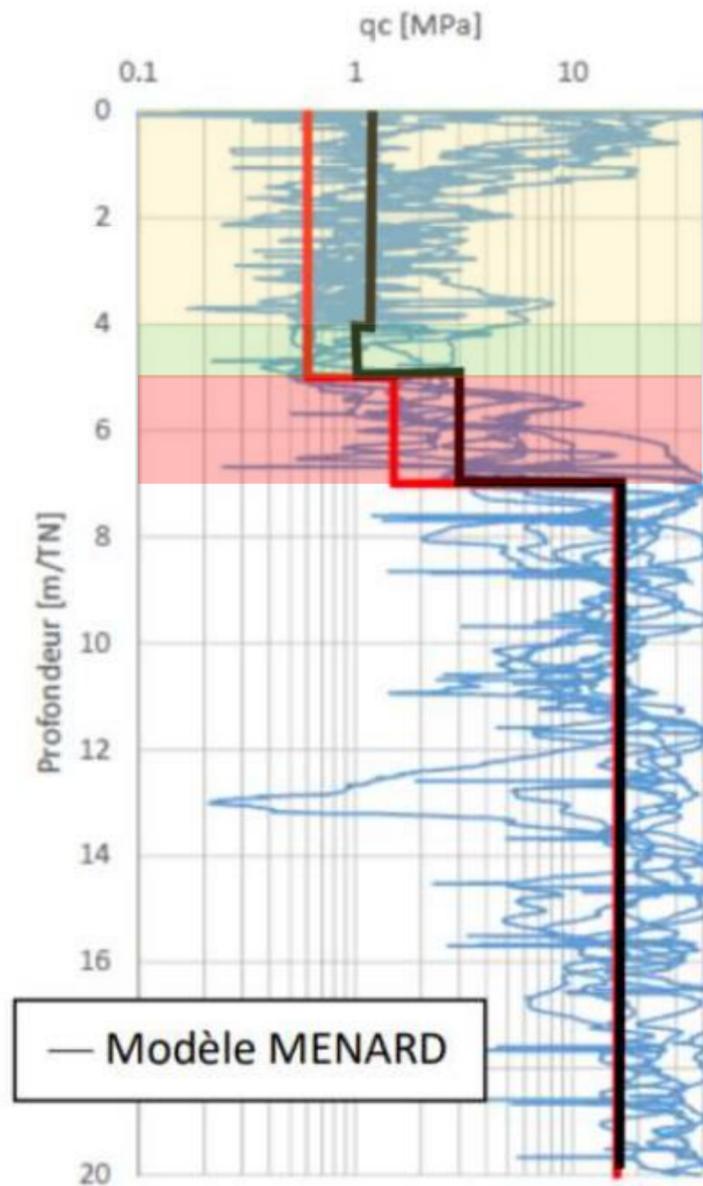
L'augmentation associée G_{eq} / G_1 est alors de 1.16 pour une substitution $\alpha = 7.5 \%$.

Pour porter le coefficient de sécurité F_s à 1.25, il faut encore gagner 15.7% par l'action du refoulement de la tarière au forage et mise en place du mortier.

Première étape : maille 2.1 x 2.1 m avec un diamètre de 0.65 m



Mise en œuvre et résultat : sondages avant renforcement



	Épaisseur	P_{I^*}	E_M	q_c
	m	MPa	MPa	MPa
Couche de forme	0.5	1.7	1.5	-
Remblais	3.4	0.3	3.0	0.6
Argiles molles	1.0	0.3	3.0	0.6
Sables limoneux	2	0.8	8.0	1.5
Sables et graviers		1.4	15.0	> 10

Seconde étape : campagne de sondages au pénétromètre statique

Mise en œuvre et résultat : sondages avant renforcement

Troisième étape : définir un objectif de résistance de pointe q_c pour les essais au pénétromètre statique

Hypothèse de relations linéaires pour les corrélations entre paramètres

$$\frac{G_M \text{ initial}}{q_c \text{ initial}} = B$$

$$\frac{G_M \text{ final}}{q_c \text{ final}} = B$$

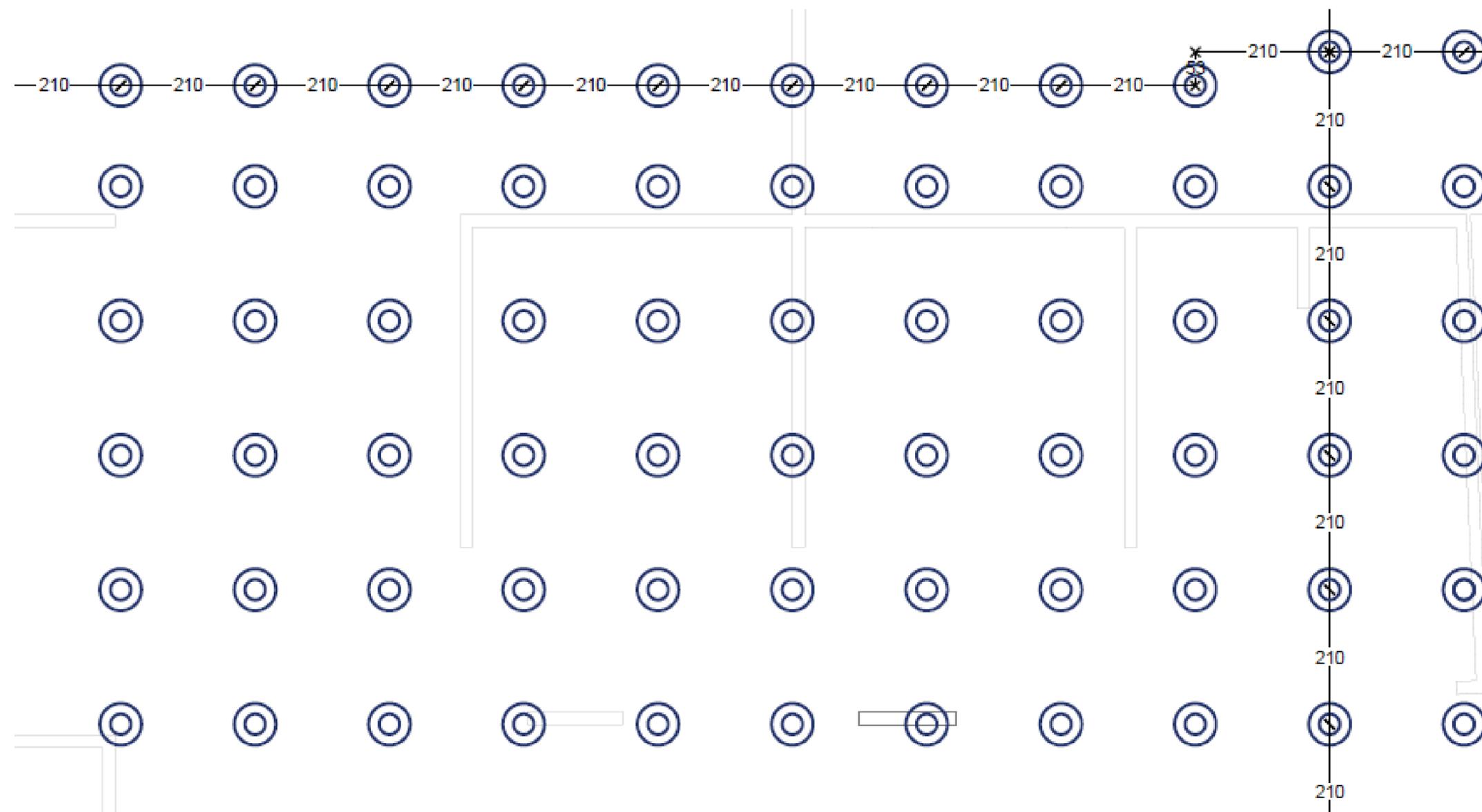
On veut :

$$\frac{G_M \text{ final}}{G_M \text{ initial}} = 1.157$$

Ce qui implique : $\frac{q_c \text{ final}}{q_c \text{ initial}} = 1.157$

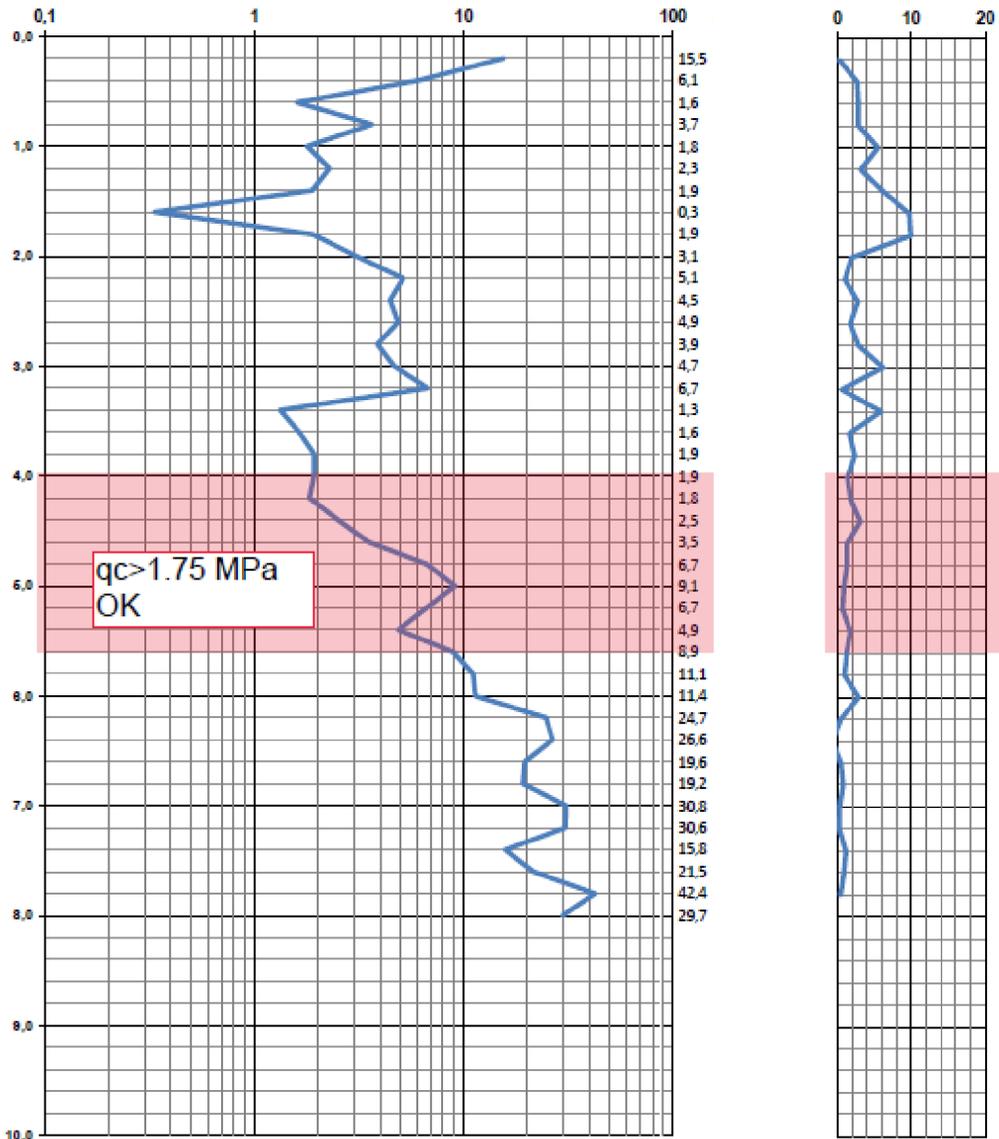
	Épaisseur	q_c initial	q_c final
	m	MPa	MPa
Sables limoneux	2	1.5	1.75

Mise en œuvre et résultat : Maillage réalisé

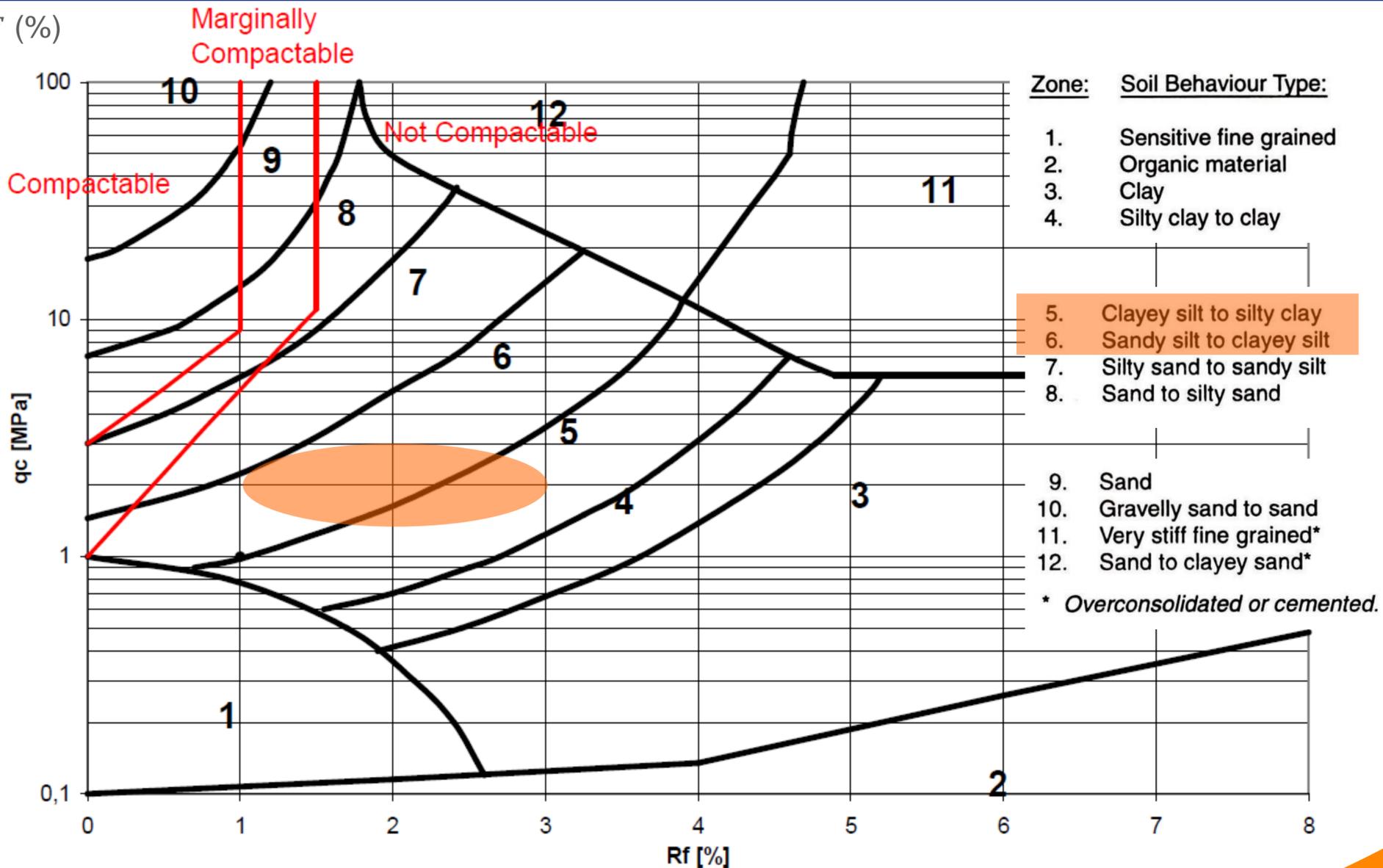


Mise en œuvre et résultat : sondages après renforcement

Résistance de pointe q_c (MPa) Rapport de frottement Rf (%)



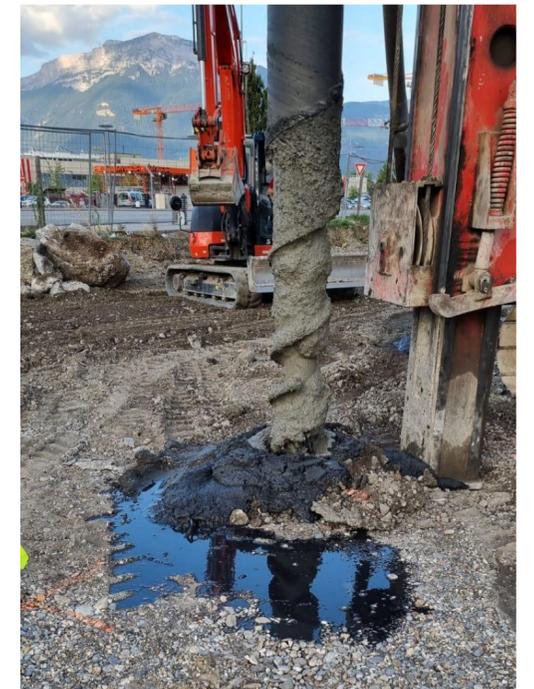
$1 < Rf < 3 \%$



Superposition des diagrammes de Robertson (1986) et Massarsch (1991)

Conclusions

- Réalisation d'un renforcement mixte (CMC et ISR) avec un seul maillage mais avec deux diamètres : pour diminuer l'aléa liquéfaction et réduire les tassements des ouvrages sur radier.
- L'analyse détaillée des sondages a permis de fixer un objectif pertinent de substitution.
- Les contrôles avec essais géotechniques ont permis de valider l'effet de compactage horizontal des ISR.
- Alternative au jet grouting en raison de sols pollués (éviter remontée de spoils impactés).
- Démarche frugale en mortier à performance égale : passage de $0.34 \text{ m}^3/\text{m}^2$ à $0.15 \text{ m}^3/\text{m}^2$.



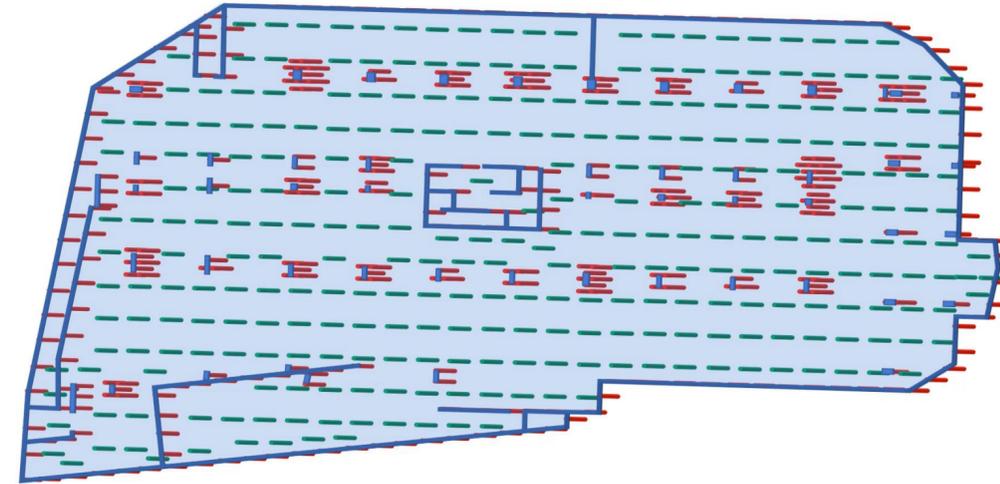
**Less is
MORE MENARD.**





cfms

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE



Merci pour votre attention



menARD

TRAITEMENT ET AMÉLIORATION DES SOLS
LIQUEFACTION / IR / ISR