



# Terminal méthanier de Dunkerque Traitement anti-liquéfaction

Jérôme Racinais & Pierre Burtin

---

# 1. Présentation générale du projet

2/20



## Terminal méthanier de Dunkerque

Mise en service : janvier 2017  
Durée des travaux : 5 ans  
Investissement : 1 milliard €

Surface : 56 ha dont 20 ha gagnés sur la mer

Capacité de stockage : 13 milliards de m<sup>3</sup> par an.

Il permet de couvrir 20% des besoins en gaz de la France et de la Belgique.

## 2. Stabilité des talus des plateformes

3/20



### Contexte sismique

- Magnitude = 5,4
- $a_{\max} = 0,3 \text{ g}$

Les sols de fondations constitués par les sables Flandriens présentent dans ce contexte un **risque de liquéfaction**.

A ce problème, s'ajoute le « **lateral spreading** » qui correspond au phénomène de glissement latéral dans le sens de la pente lié à la liquéfaction d'un horizon de sol.

# 3. Travaux d'amélioration et de renforcement des sols 4/20



Travaux terrestres et maritimes pour stabiliser les talus des plateformes.

Amélioration et renforcement des sols par **vibrocompactage (VC)** et **colonnes ballastées (CB)** en fonction de la nature des sols rencontrés

Surface des zones traitées = 110 000 m<sup>2</sup>

Hauteur maxi. de traitement = 30 m

5 ateliers mobilisés (3 en terrestre et 2 en maritime)

Durée des travaux = 9 mois (dont 2 mois de préparation) en 2012

# 4. Etude du risque de liquéfaction

L'objectif des travaux est de garantir un facteur de sécurité vis-à-vis du risque de liquéfaction supérieur ou égal à 1,25.

$$FS = \frac{CRR(M)}{CSR} \geq 1,25$$

Conformément au CCTP, l'évaluation du risque de liquéfaction a été effectuée en utilisant:

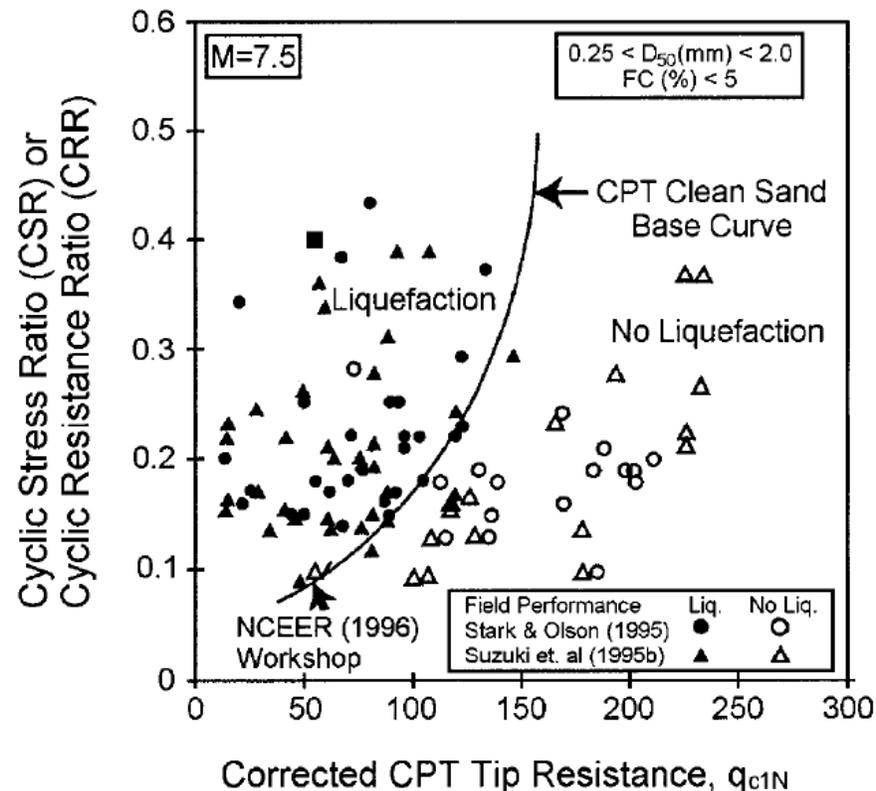
- les résultats des sondages au pénétromètre statique (CPT, CPTu)
- la méthode empirique validée durant les « workshops » du NCEER de 1996 et 1998 menés par Youd et Idriss.

CSR : Taux de contrainte cyclique engendré par le séisme

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

$a_{max}$  : accélération horizontale maximale à la surface du sol  
 $\sigma_{v0}, \sigma'_{v0}$  : contraintes verticales totale et effective  
 $r_d$  : coefficient réducteur en fonction de la profondeur

CRR(M) : Taux de résistance au cisaillement cyclique du sol pour une magnitude M



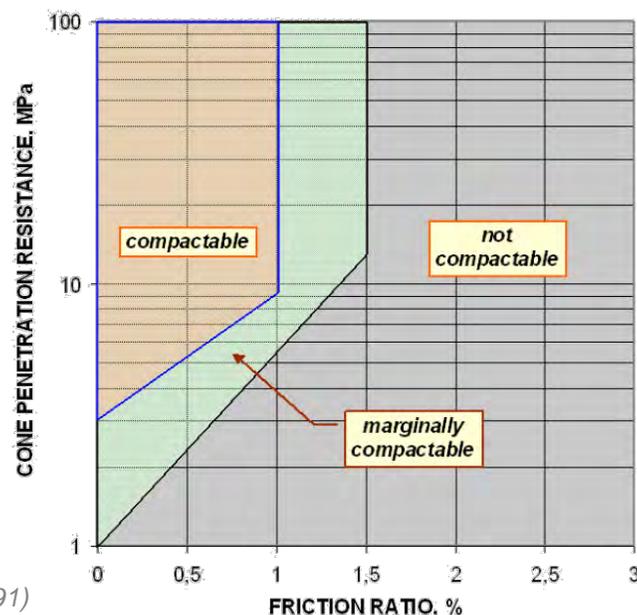
Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Youd et al (2001)

# 4. Etude du risque de liquéfaction

$$FS = \frac{CRR(M)}{CSR} \geq 1,25$$

## Vibrocompactage sans apport de matériaux (VC)

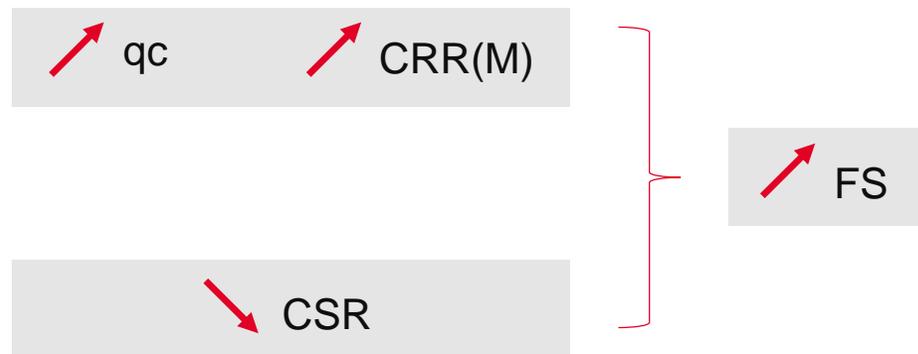
- Densifier le sol



Massarsch (1991)

## Vibrocompactage avec apport de matériaux (CB)

- Densifier le sol
- Réduire la contrainte de cisaillement

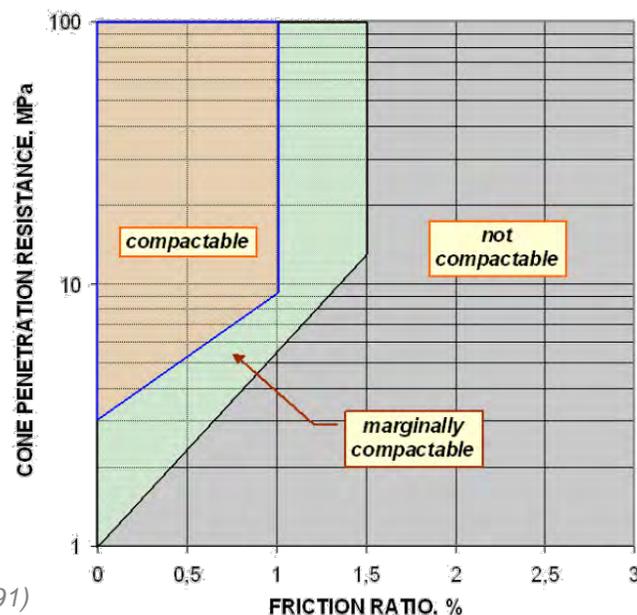


# 4. Etude du risque de liquéfaction

$$FS = \frac{CRR(M)}{K_G CSR} \geq 1,25$$

## Vibrocompactage sans apport de matériaux (VC)

- Densifier le sol

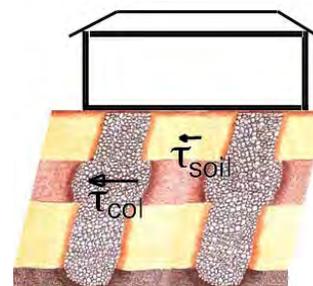


Massarsch (1991)

## Vibrocompactage avec apport de matériaux (CB)

- Densifier le sol
- Réduire la contrainte de cisaillement

Conformément au CCTP, l'approche de Baez & Martin (1993) a été retenue pour l'estimation du coefficient réducteur  $K_G$ :



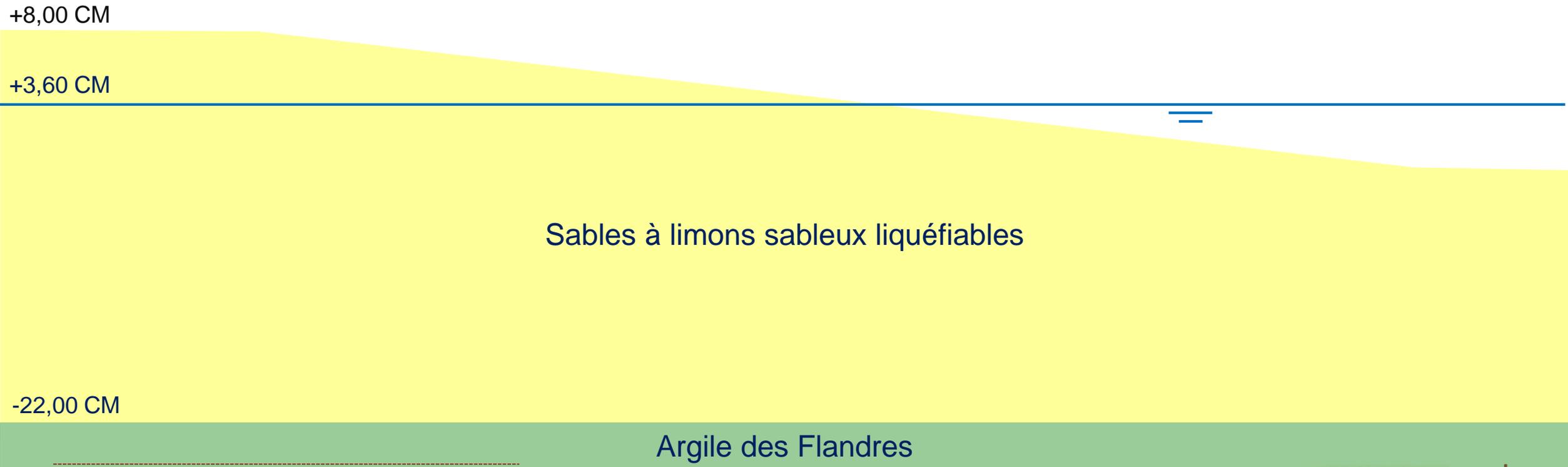
$$\frac{1}{K_g} = \frac{G_{eq}}{G_{sol}} = \frac{aG_{CB} + (1-a)G_{sol}}{G_{sol}}$$

$$\frac{1}{K_g} = 1 + a \left( \frac{G_{CB}}{G_{sol}} - 1 \right)$$

$a$  : taux d'incorporation

$G$  : modules de cisaillement dynamiques

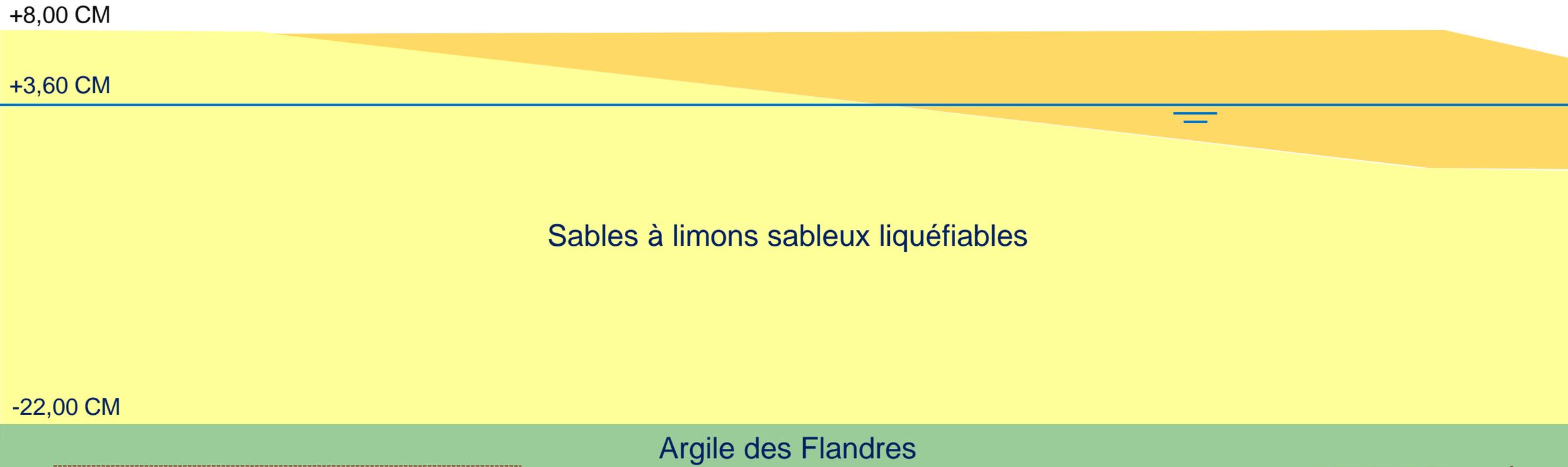
# 5. Séquence des travaux



# 5. Séquence des travaux

9/20

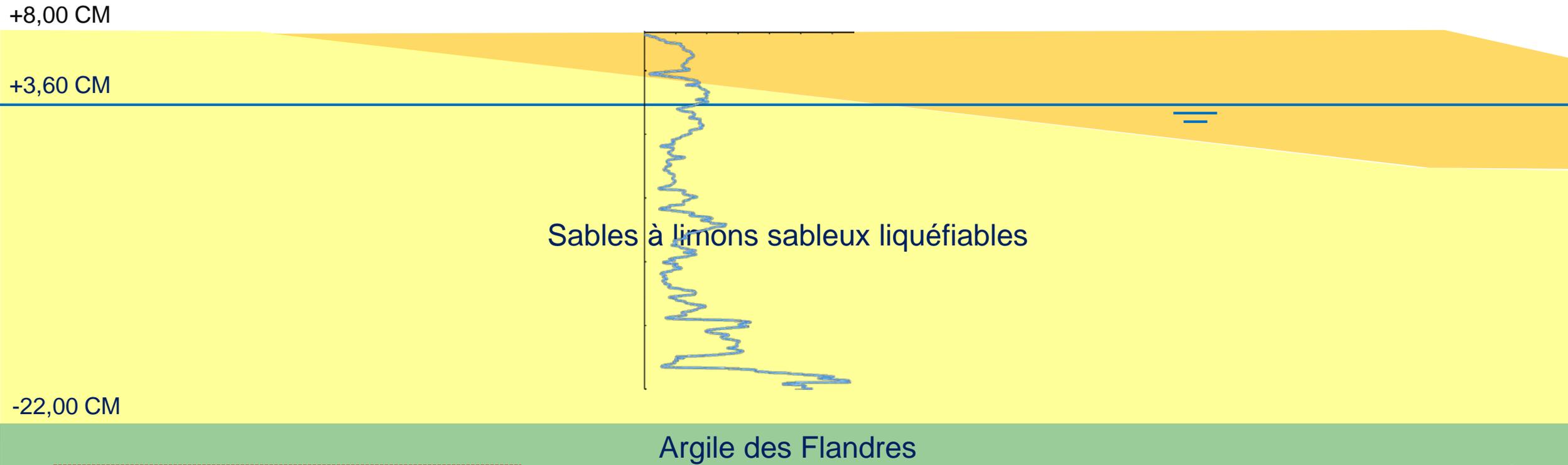
## 1. Remblaiement



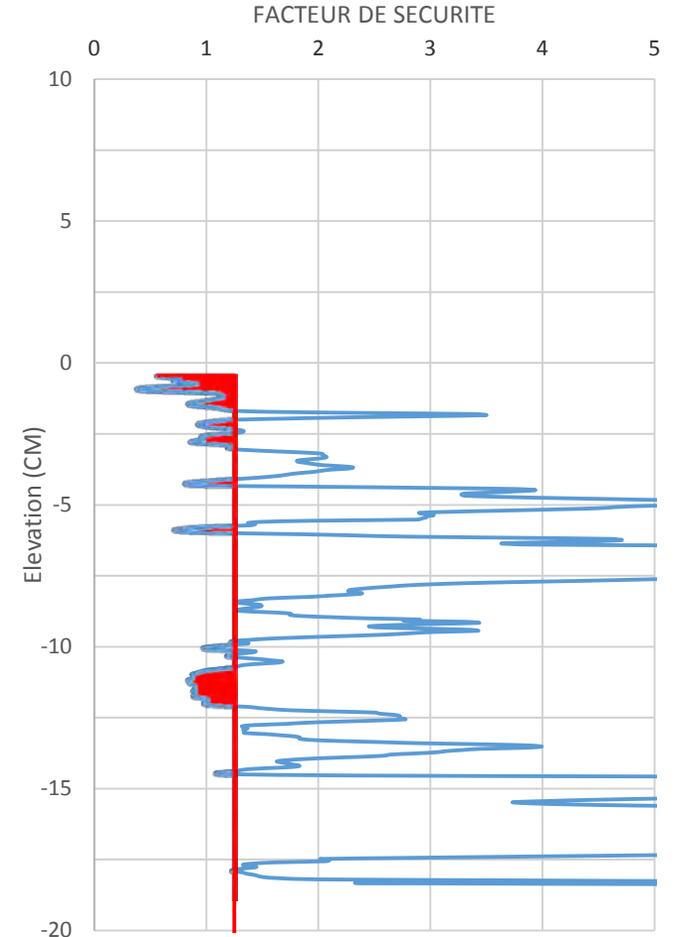
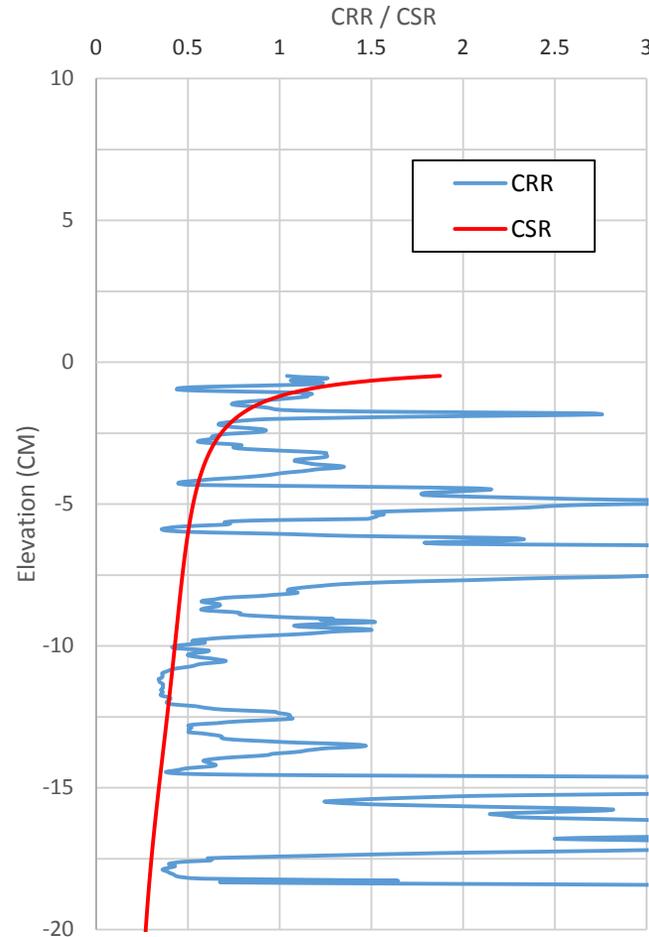
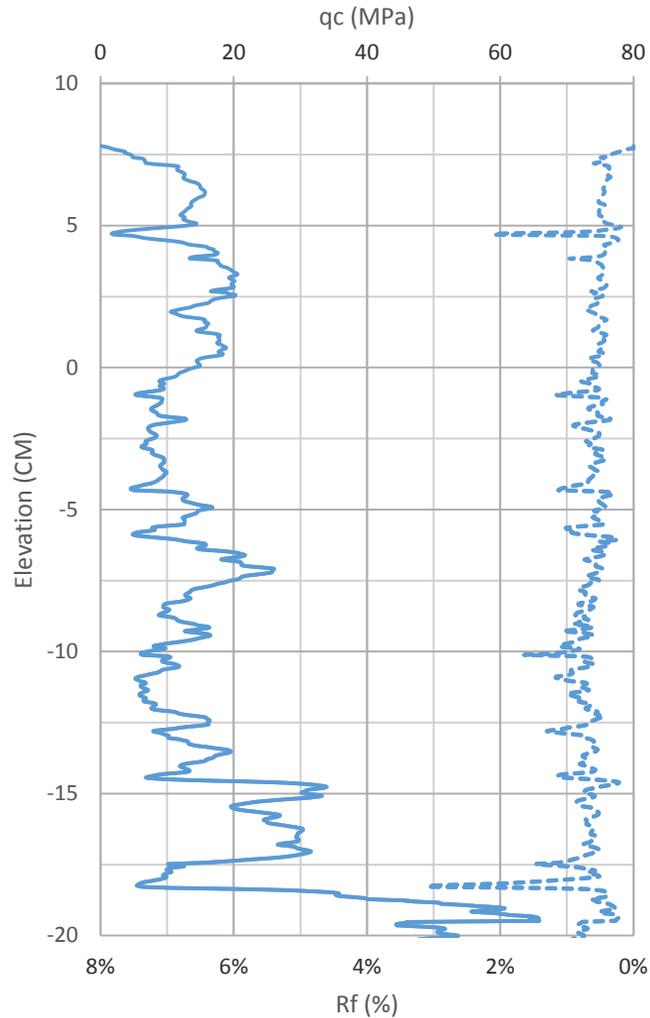
# 5. Séquence des travaux

10/20

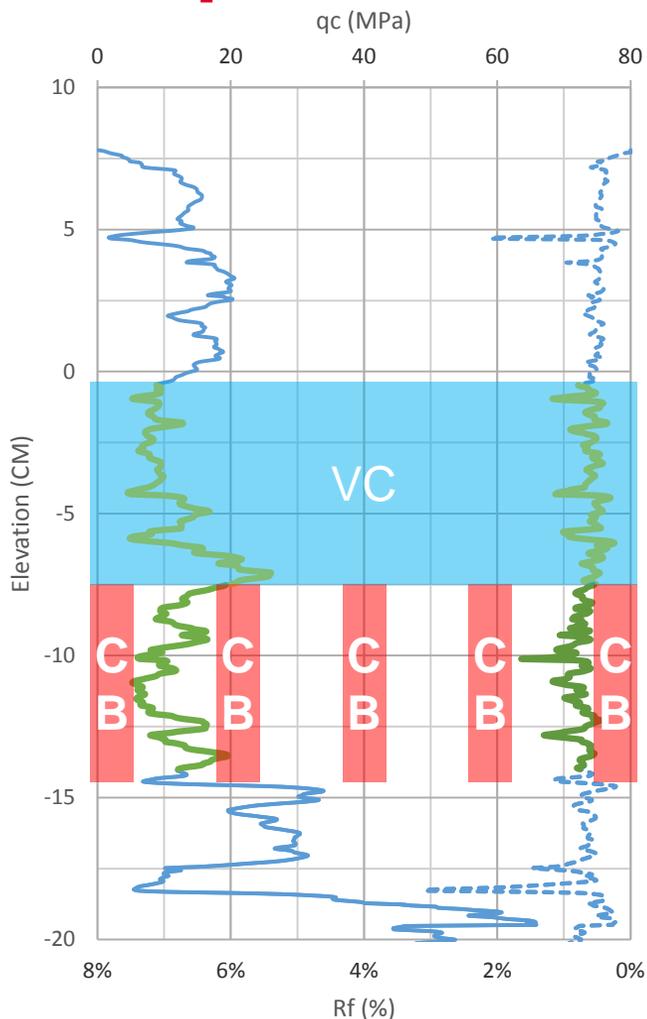
1. Remblaiement
2. Pre-CPTs



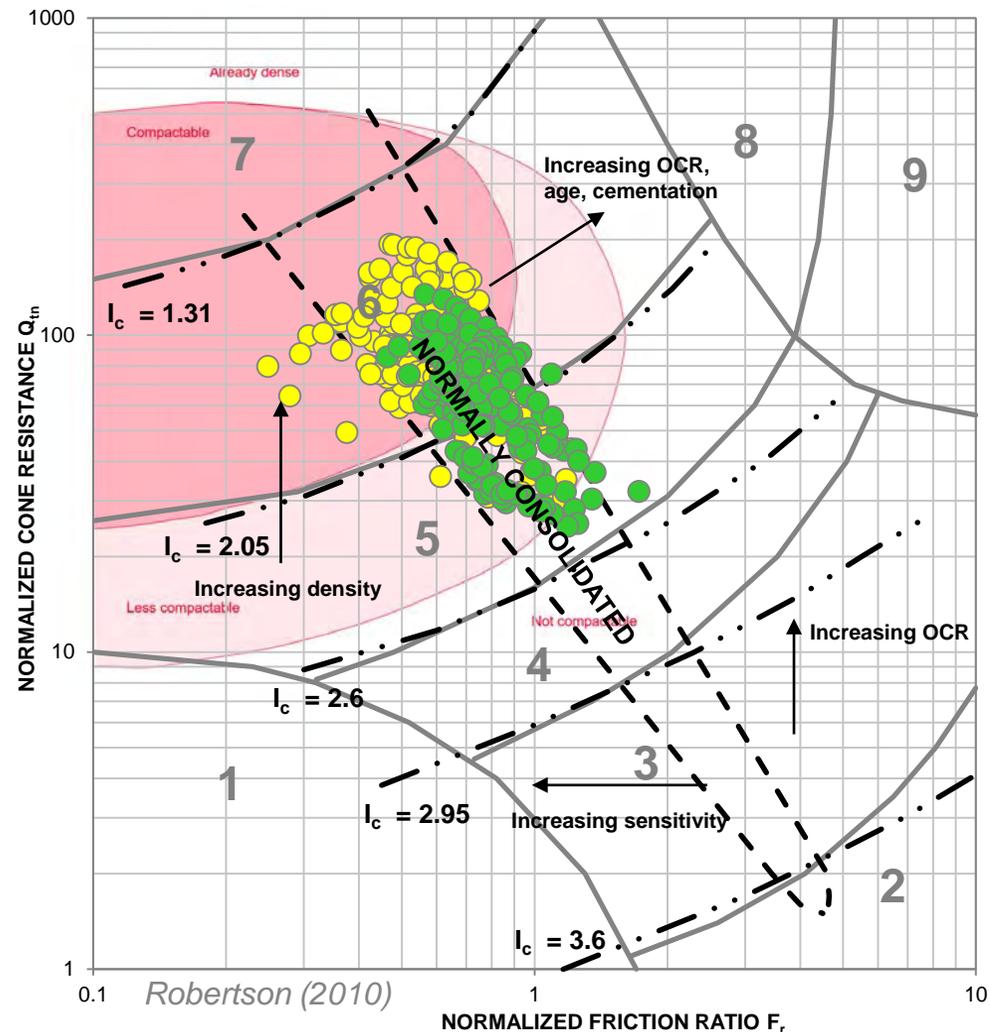
# 5. Séquence des travaux



# 5. Séquence des travaux



1	Sols fins sensibles
2	Sols organiques et tourbes
3	Argiles : argile à argile silteuse
4	Silts: silt argileux à argile silteuse
5	Sables : sable silteux à sable silteux
6	Sables : sable propres à sable silteux
7	Sable à sable graveleux
8	Sols fins intermédiaires très raides
9	Sables cimentés ou dilatants



# 5. Séquence des travaux

Terrestre



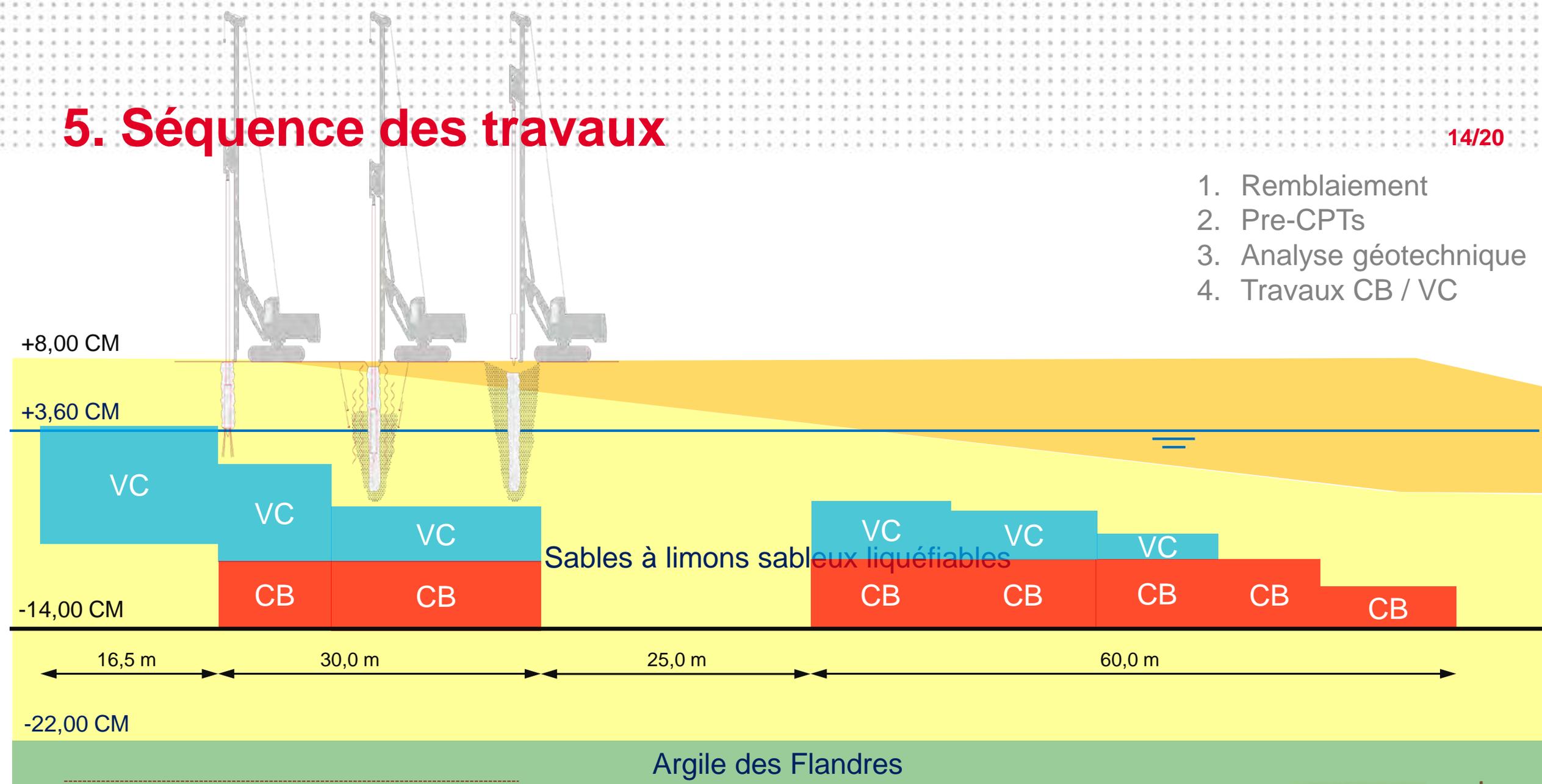
Maritime



# 5. Séquence des travaux

14/20

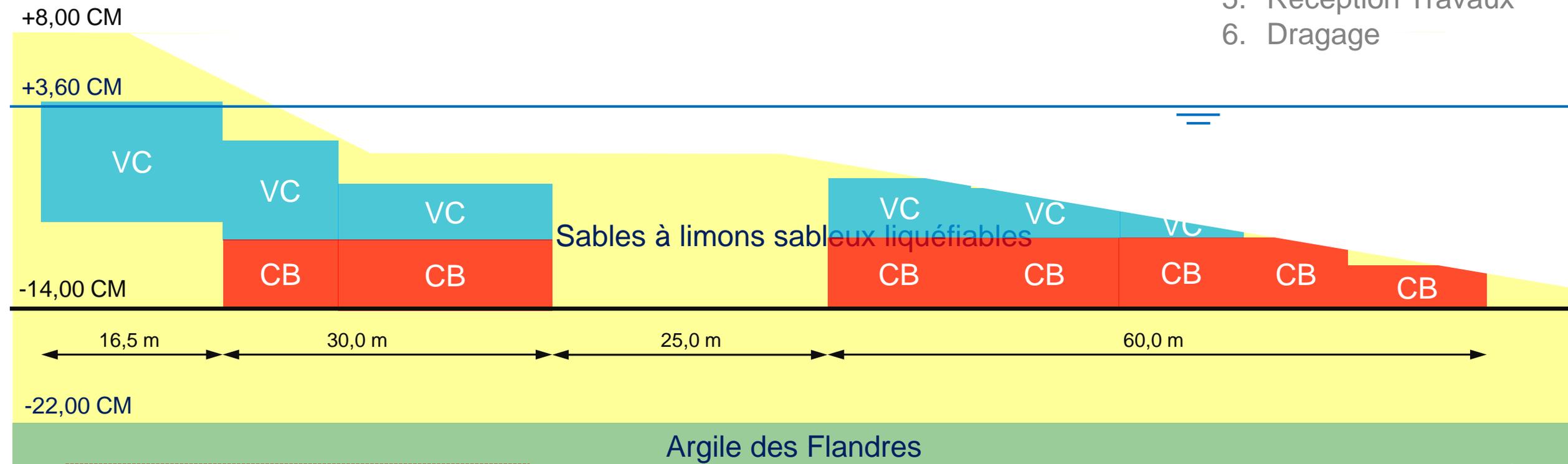
1. Remblaiement
2. Pre-CPTs
3. Analyse géotechnique
4. Travaux CB / VC



# 5. Séquence des travaux

15/20

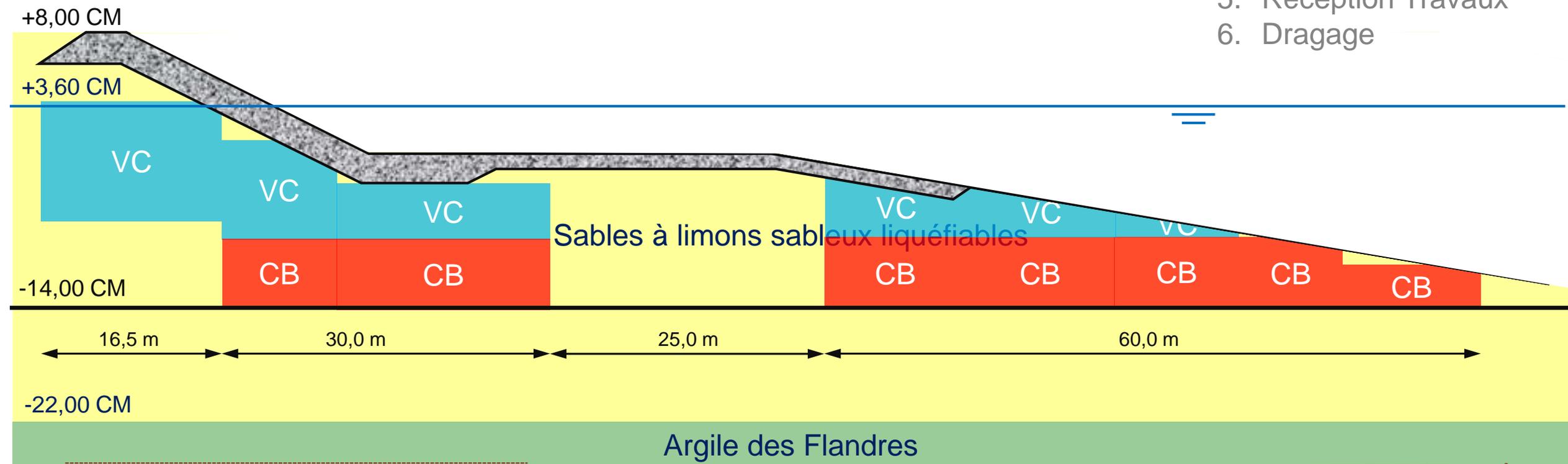
1. Remblaiement
2. Pre-CPTs
3. Analyse géotechnique
4. Travaux CB / VC
5. Réception Travaux
6. Dragage



# 5. Séquence des travaux

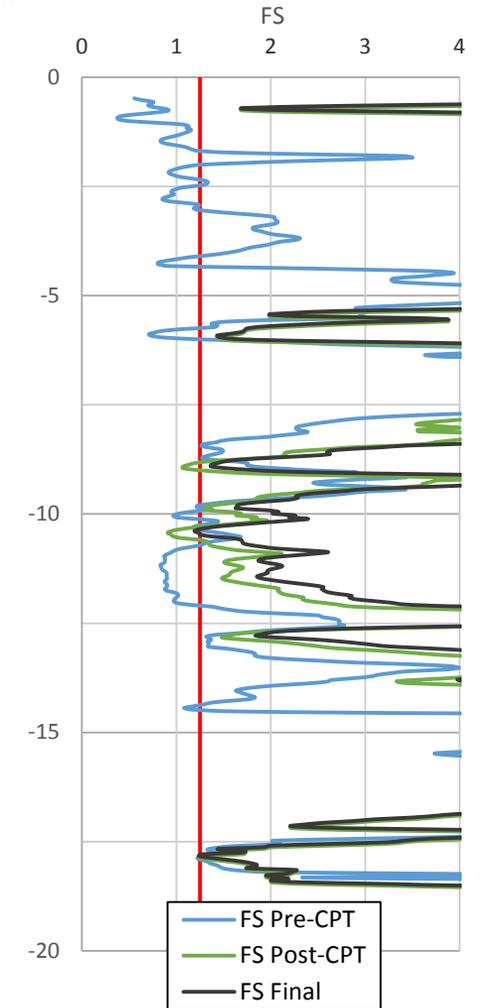
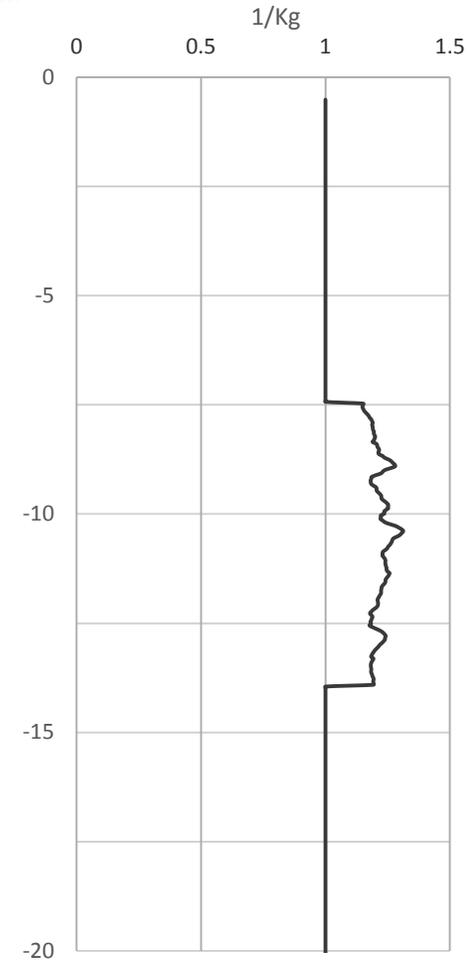
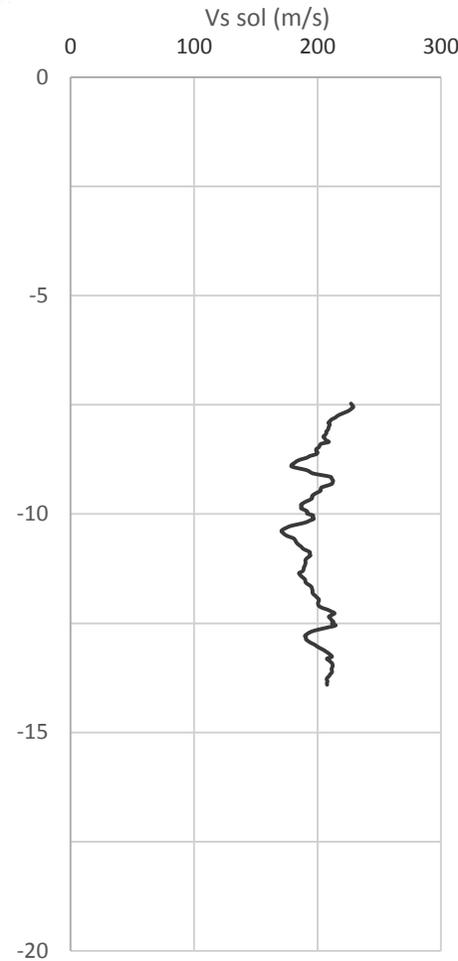
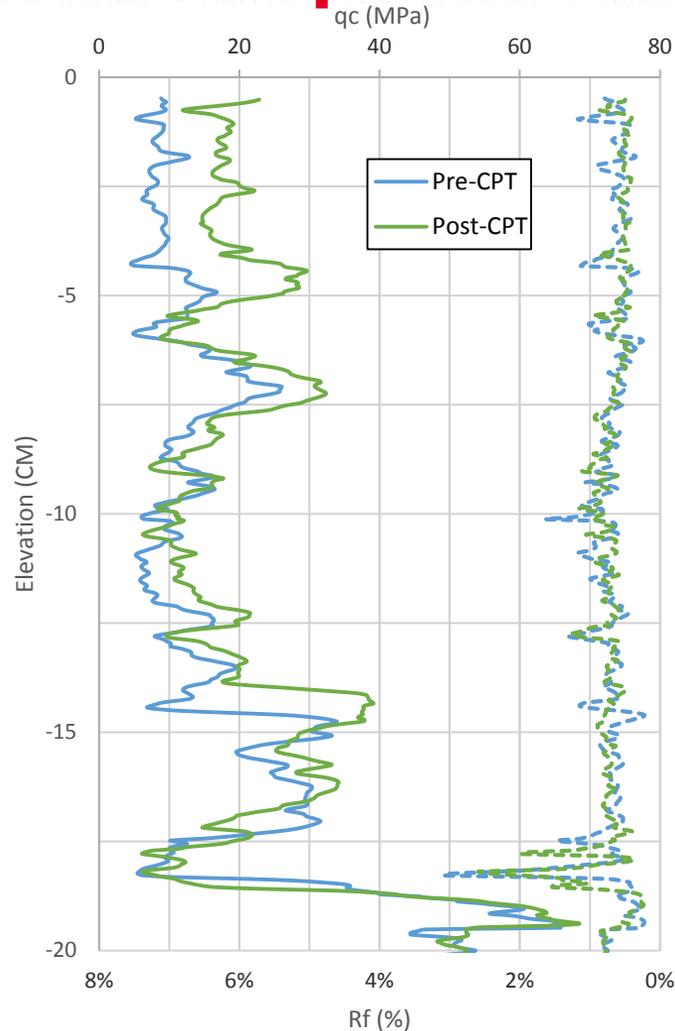
16/20

1. Remblaiement
2. Pre-CPTs
3. Analyse géotechnique
4. Travaux CB / VC
5. Réception Travaux
6. Dragage



# 6. Réception des travaux

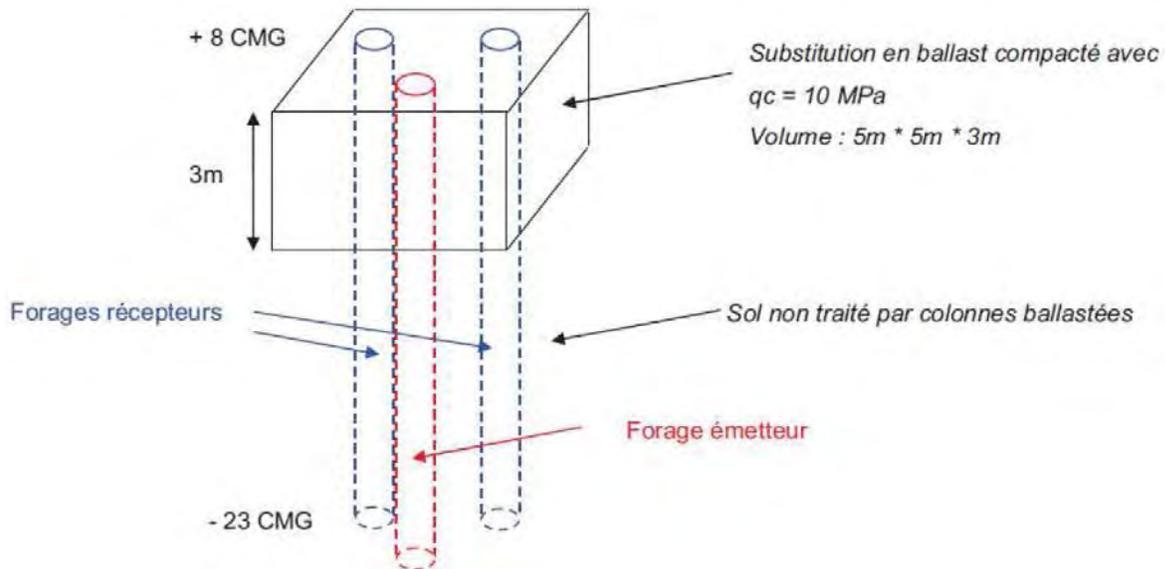
VC  
CB



# 7. Planche d'essais initiale

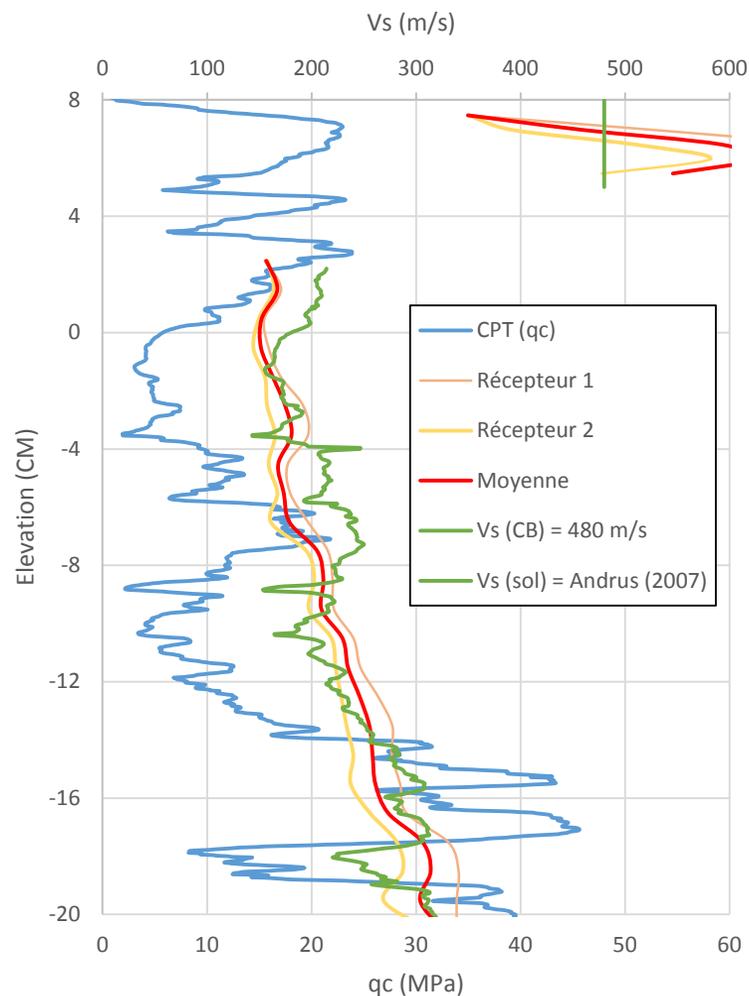
$$\frac{1}{K_g} = 1 + a \left( \frac{G_{CB}}{G_{sol}} - 1 \right)$$

$$\frac{1}{K_g} = 1 + a \left( \frac{\rho_{CB} V_{S_{CB}}^2}{\rho_{sol} V_{S_{sol}}^2} - 1 \right)$$



# 7. Planche d'essais initiale

19/20



Dans les colonnes ballastées, la valeur de Vs a été fixée lors de la planche d'essais:

$$V_{SCB} = 480 \text{ m/s}$$

Dans le sol, plusieurs corrélations du type  $V_s = f(q_c)$  ont été confrontées aux mesures de la planche d'essais. C'est la corrélation d'Andrus et al (2007) qui a conduit au meilleur accord:

$$V_s = 16,5(q_{c1N})^{0,411}(I_c)^{0,970} \left( \frac{\sigma'_{v0}}{P_a} \right)^{0,25}$$

$q_{c1N}$  : résistance de pointe normalisée

$I_c$  : Soil Behaviour Type Index

$P_a$  : pression atmosphérique

*Predicting Shear-Wave Velocity From Cone Penetration Resistance, Andrus et al (2007)*

## 8. Conclusions

20/20

1. L'**analyse fine des Pre-CPTs** a permis d'identifier précisément les horizons vibrocompactables et de définir ainsi, avant le démarrage des travaux, les couches à traiter par colonnes ballastées.
2. Les travaux combinés de vibrocompactage et colonnes ballastées ont permis **de densifier le sol** et d'augmenter ainsi sa capacité à résister au risque de liquéfaction (CRR).
3. Conformément au CCTP, **la réduction de la contrainte de cisaillement** permise par les colonnes ballastées a été estimée en suivant la méthode simplifiée de Baez et Martin (1993). Cette approche, qui considère une répartition des contraintes de cisaillement proportionnellement aux rigidités du sol et de la colonne ballastée, est de plus en plus contestée.

En particulier, les méthodes de Rayamajhi et al (2014) ou Gueguin (2015) sont désormais parfois utilisées pour estimer le coefficient réducteur  $K_G$ . Le gain sur le coefficient de sécurité final devient alors très limité (< 10 %). **Pas de consensus de la communauté scientifique** sur le sujet.

4. Il n'en reste pas moins que les colonnes ballastées ont montré leur efficacité à plusieurs reprises vis-à-vis du risque de liquéfaction. L'**effet drainant** du ballast, qui permet de limiter l'augmentation des surpressions interstitielles lors du séisme, contribue probablement dans une large mesure à l'efficacité des colonnes ballastées. Dans le cas de ce chantier, le CCTP interdisait la prise en compte de l'effet drainant...

# Merci de votre attention

