

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada dans une zone de haute sismicité et liquéfiable

José MUNOZ-CASTELBLANCO
Vinci Construction Grands Projets
Département Etudes Structures Géotechnique

JOURNÉE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DU 11 JUIN 2024

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

Sommaire de l'intervention

- PRESENTATION DU PROJET
- CONTEXTE GEOTECHNIQUE
- RISQUE DE LIQUEFACTION
- SYSTÈME DE FONDATION
- ANALYSE DE TASSEMENTS
- MESURES DE CONTRÔLE – VALIDATION DU DESIGN
- CONCLUSIONS

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

LE PROJET

- Réservoir de Gaz Naturel Liquéfié (GNL) à Kitimat – Côte Pacifique du Canada
- Diamètre 100m – Hauteur 55m
- Capacité = 225 000 m³
- Budget estimatif = 300 M€
- Groupement : Vinci Construction Grands Projets & Entrepouse
- Maîtrise d'Ouvrage : SHELL
- Maître d'Œuvre : JGC Fluor BC LNG JV



Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

RECONNAISSANCES GEOTECHNIQUES

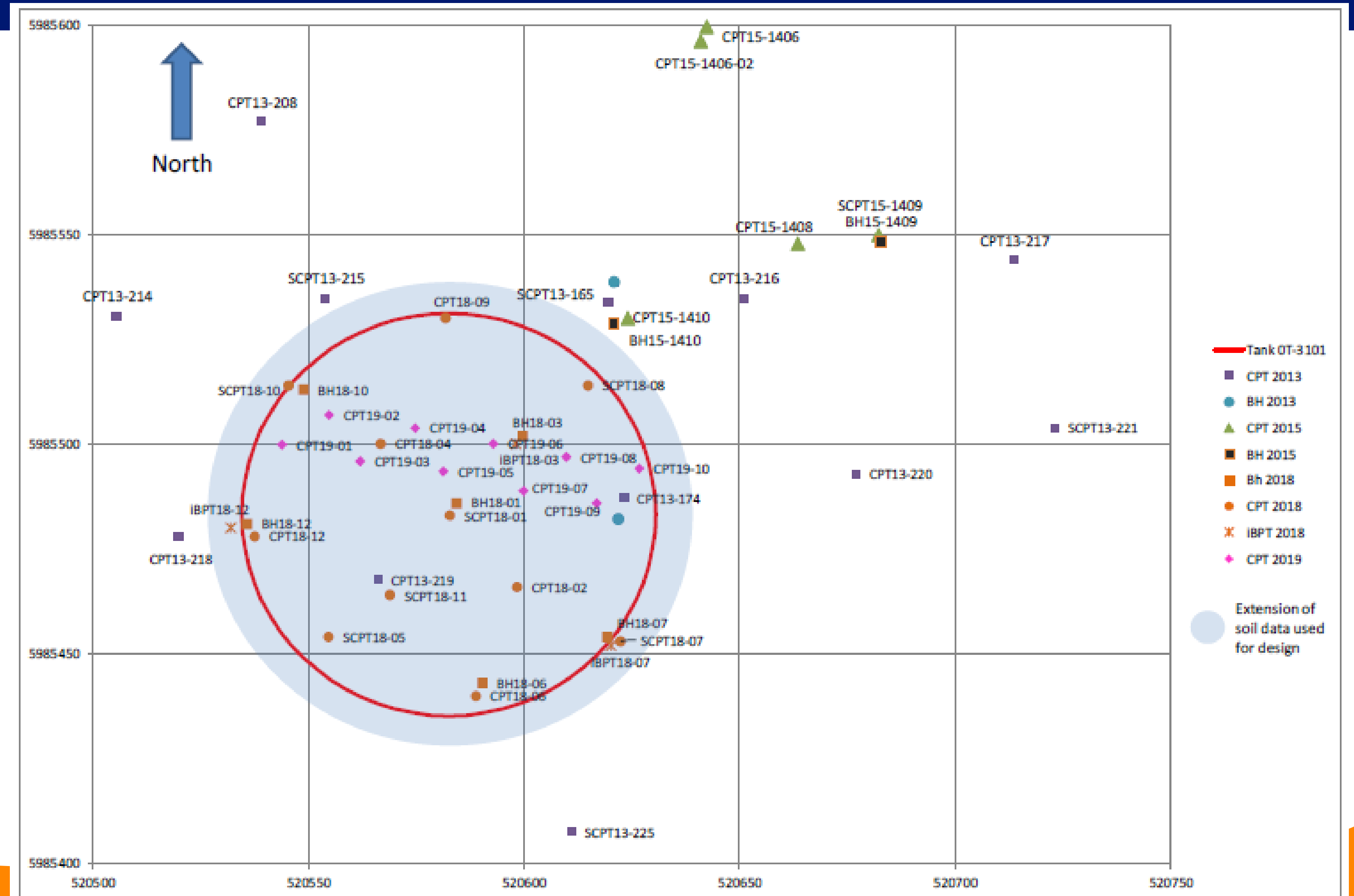
Avant l'attribution :

➡ 18 CPT – prof. max. 112m
(dont 6 sismiques)

➡ 9 sondages carottés –
prof. entre 50 et 160m

Au démarrage en 2019 :

➡ 10 CPT – prof. max. 25m

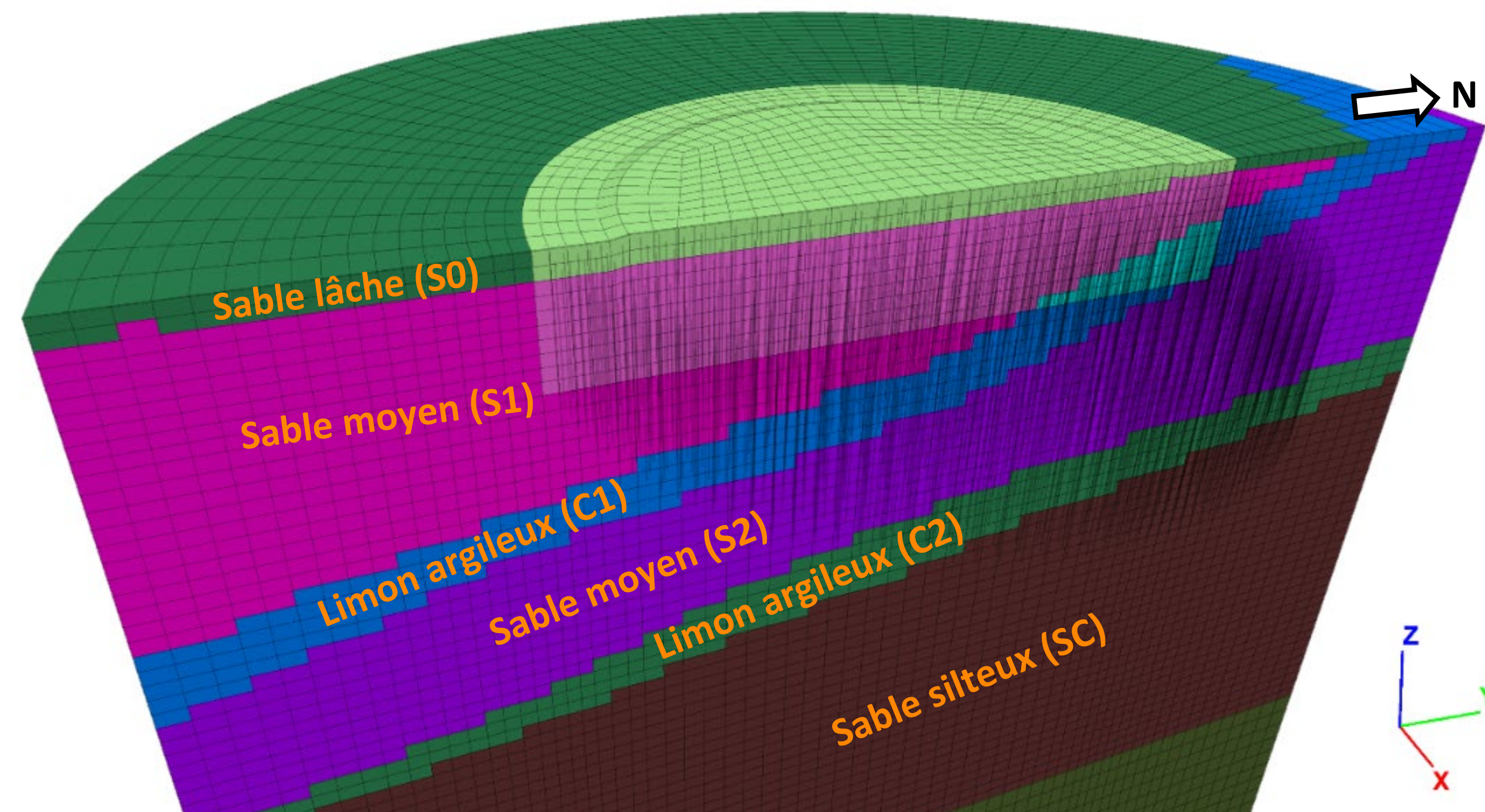


Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

LE CONTEXTE GEOTECHNIQUE

- Dépôts Quaternaires de plus de 160m d'épaisseur
- Série de sables silteux de compacité moyenne (lâches en surface) et lits de limons argileux peu plastiques
- Variabilité latérale forte de la stratigraphie – pendage vers le Sud- Ouest
- Zone de haute sismicité
- Nappe phréatique peu profonde (< 3m de prof.)



Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

PARAMETRES GEOTECHNIQUES

	Bulk weight (kN/m ³)	Unimproved	
		Internal Friction angle ϕ' (°)	Apparent cohesion c' (kPa)
S0: loose silty sand	18	30	0
S1: medium dense sand and gravel	19	34	0
LC1: lenses of loose to medium dense sandy silt	18	28	0
C1: loose to medium dense sandy silt	19	28	0
S2: medium dense silty gravelly sand	19	34	0
C2: loose to medium dense sandy silt	20	28	0
SC: dense / hard sand and silt	20	32	0
C3: hard clayey silt	20	28	0

Modules - HSM

Best Estimate	S0	S1	S2	C1	C2	SC	LC1	C3
$E_{50,ref}$ (MPa)	13.5	37.8	23.0	20.3	13.5	21.6	13.5	7.4
P_{ref} (kPa)	100	100	100	100	100	100	100	100
m	0.5	0.5	0.6	0.8	0.6	0.9	0.6	1.0
$E_{oed,ref}$ (MPa)	13.5	37.8	23.0	20.3	13.5	21.6	13.5	7.4
$E_{ur,ref}$ (MPa)	40.5	113.4	68.9	91.1	60.8	64.8	40.5	22.3

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

LE POTENTIEL DE LIQUEFACTION - Critères de Seed et Al. (2003)

➡ %Fines < 35% & IP < 12

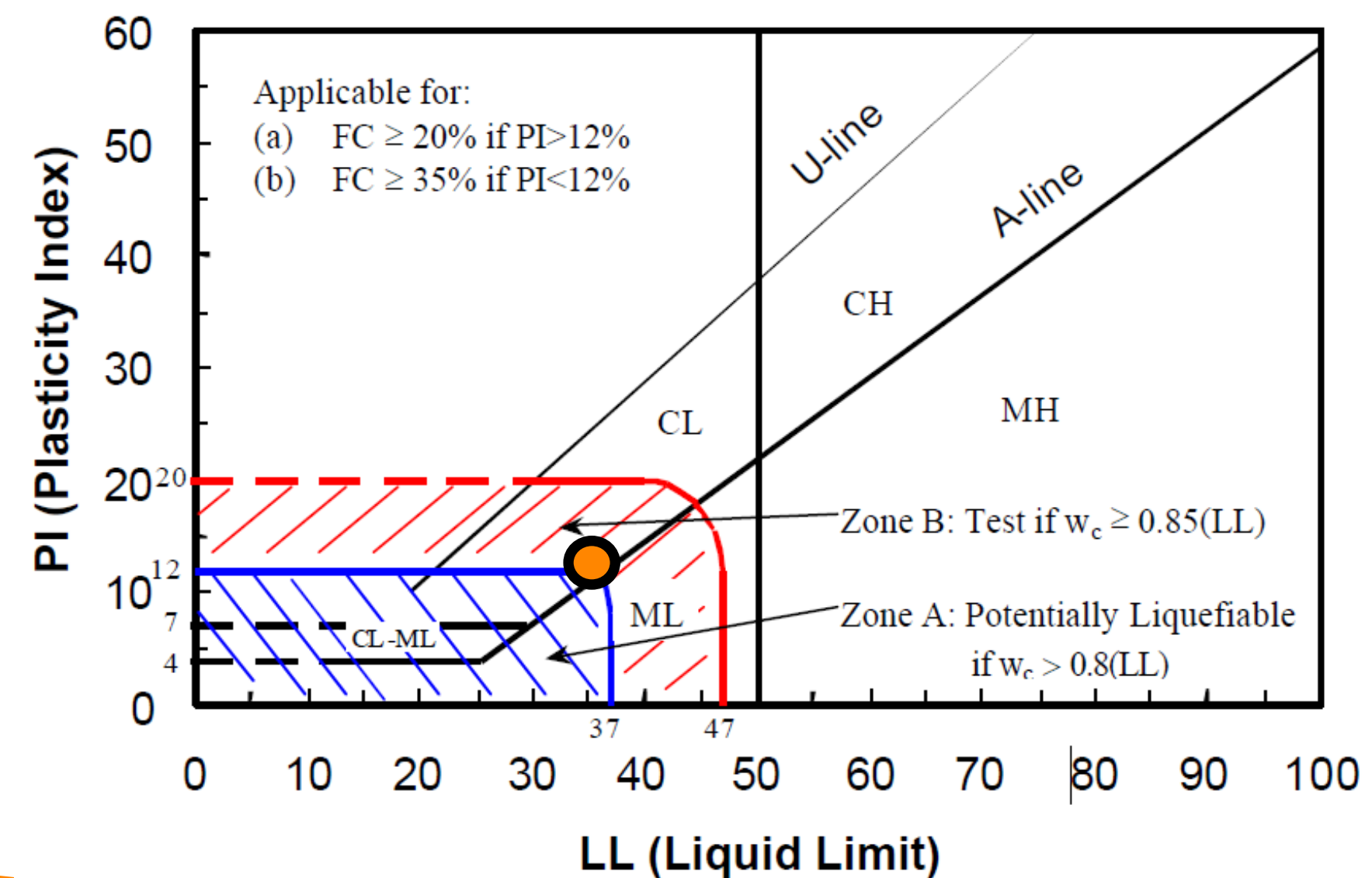
Sols sableux (S0, S1, S2) :

%Fines < 35% et pas plastiques

Les sols du site sont
potentiellement liquéfiables

➡ %Fines > 35

Sols silteux/argileux (C1, C2): %Fines > 35%, IP < 13, LL < 37



Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

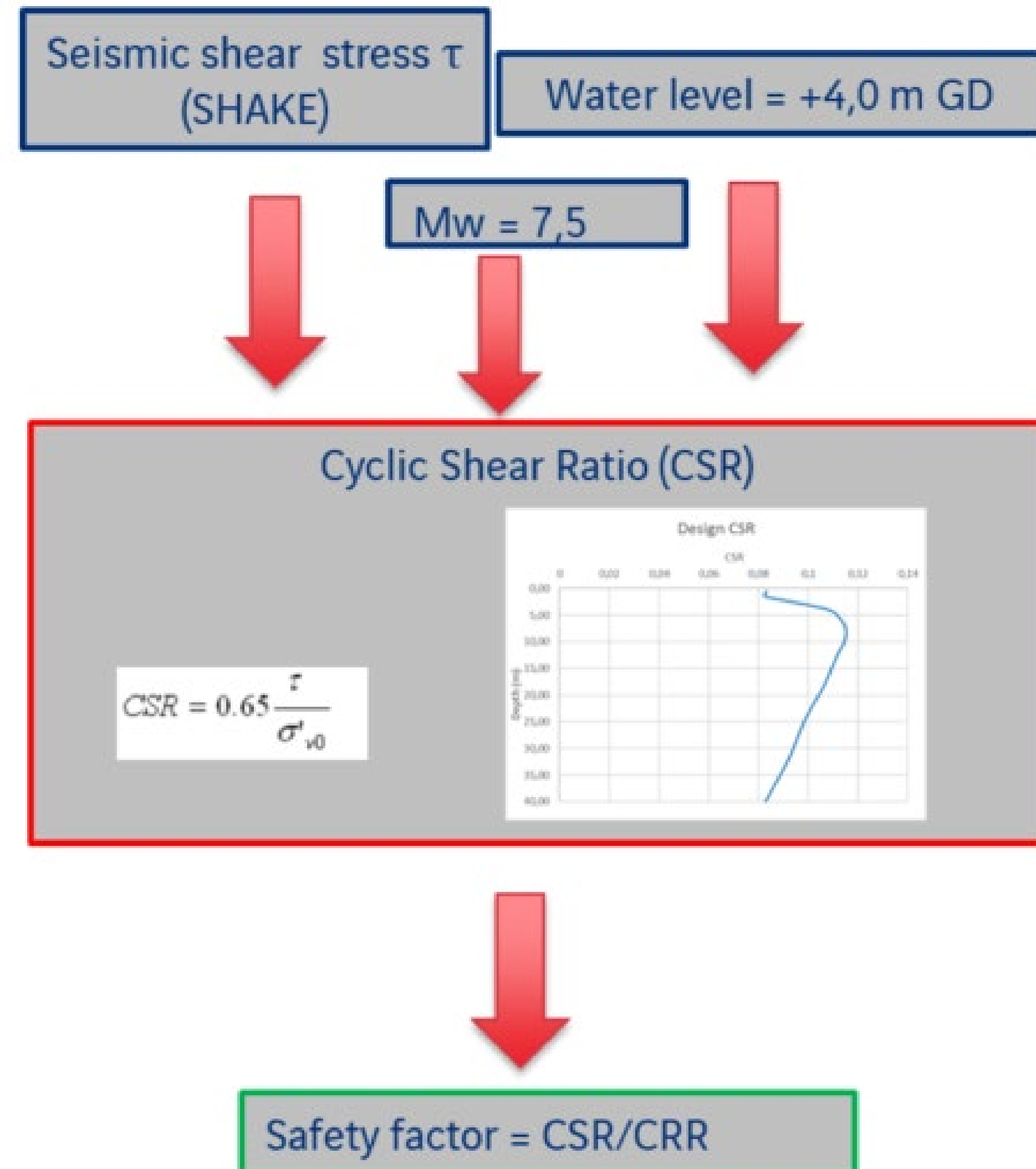
ANALYSE DE LIQUEFACTION

La action sismique (CSR) est estimée avec un modèle 1D Shake, en utilisant le profil des Vs et le signal sismique:

➤ PGA = 0,071 (OBE – Service - Tr = 475 ans)

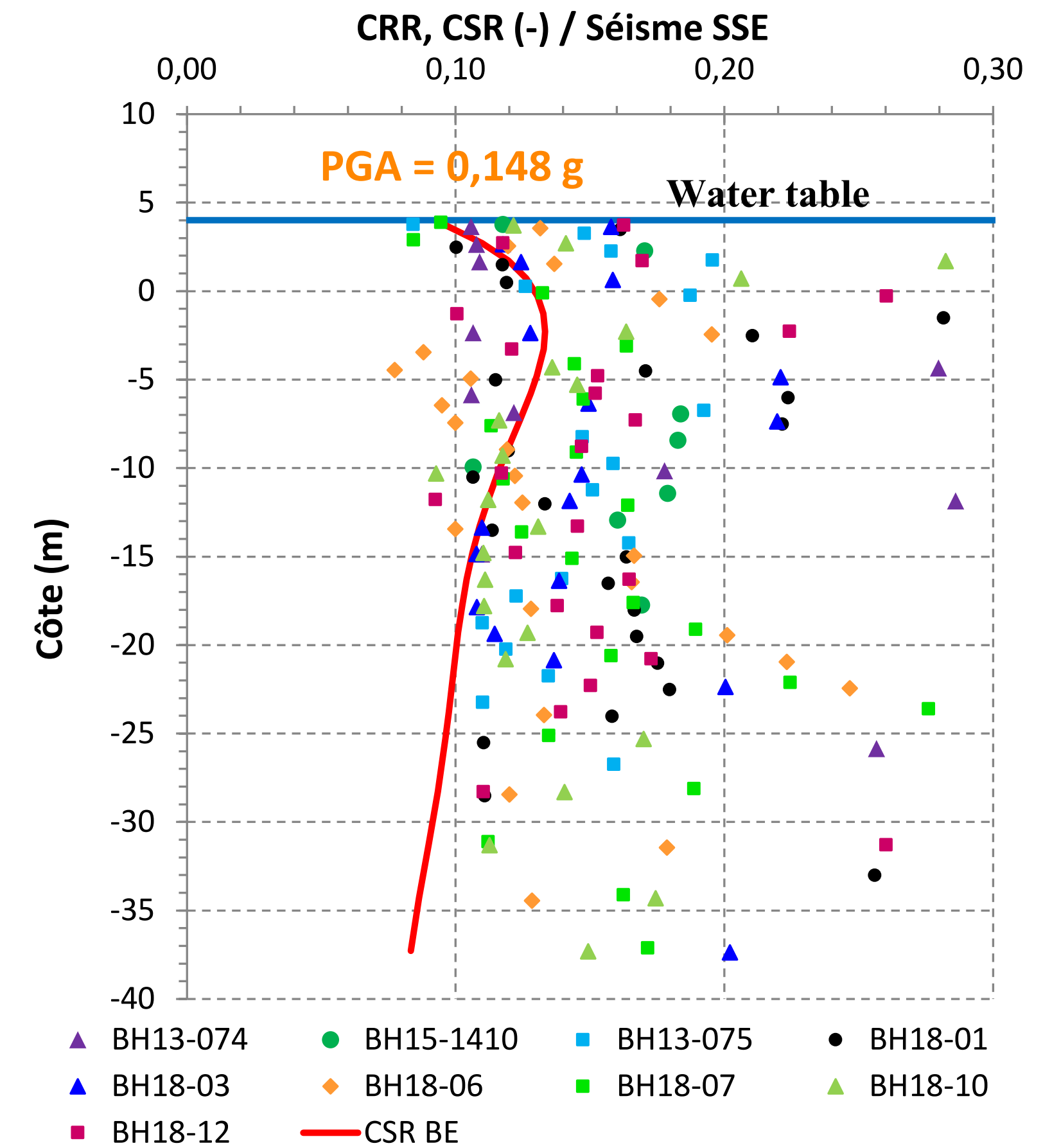
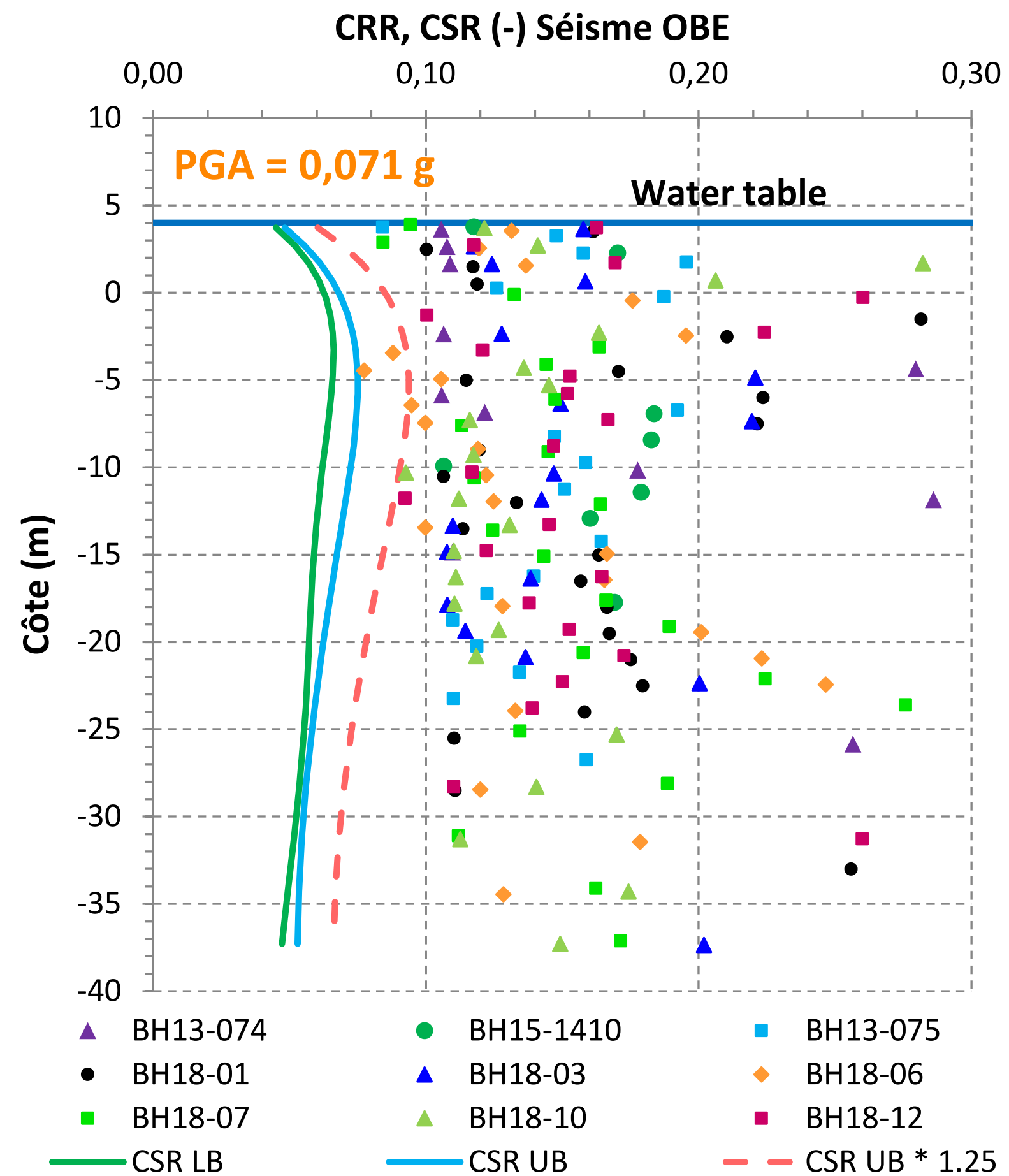
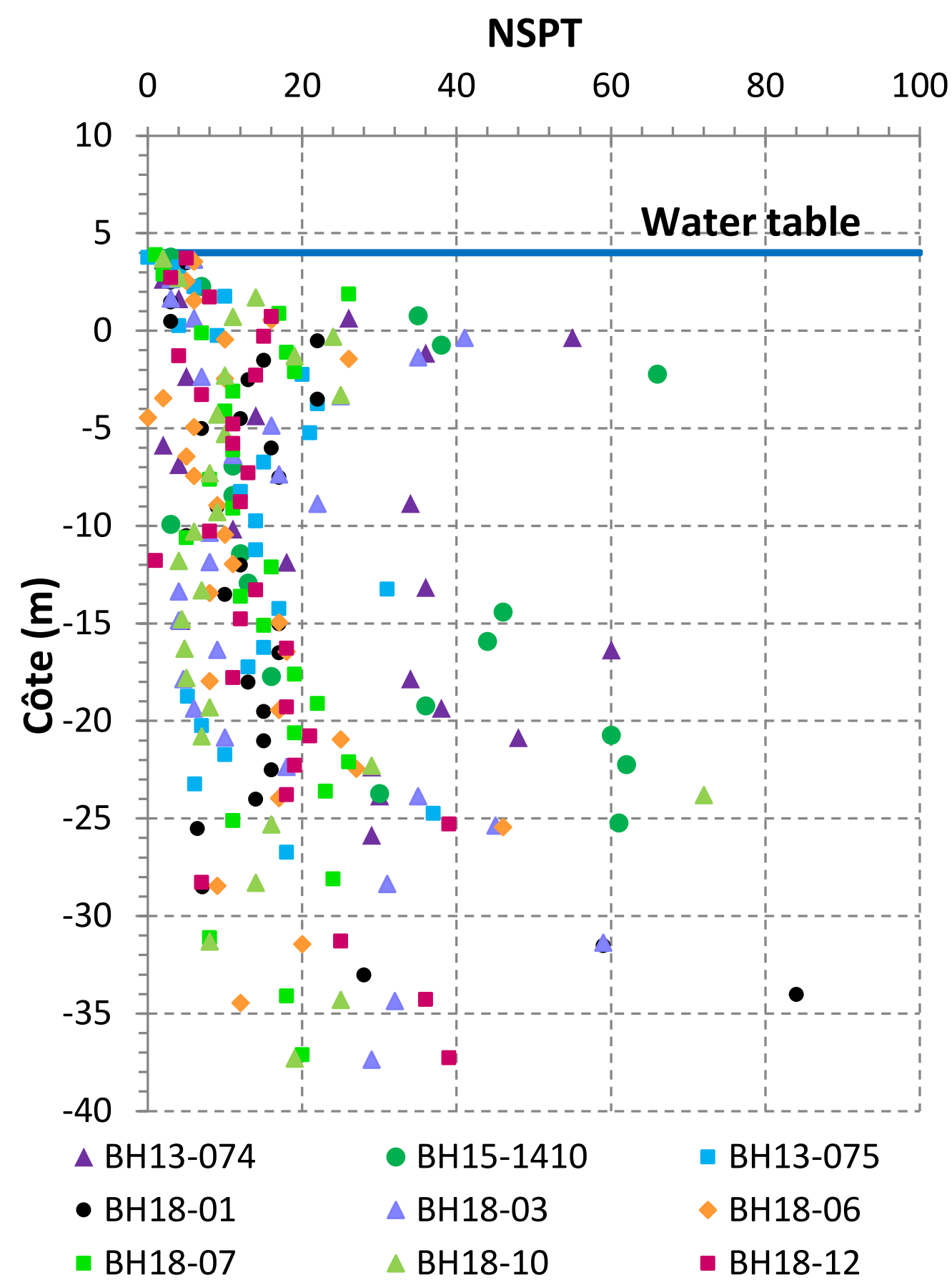
➤ PGA = 0,148 (SSE – Maximum - Tr = 2475 ans)

La résistance à la liquéfaction (CRR) est estimée avec la méthode de Boulanger & Idriss (2014) à partir de SPT et CPT



Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada



Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

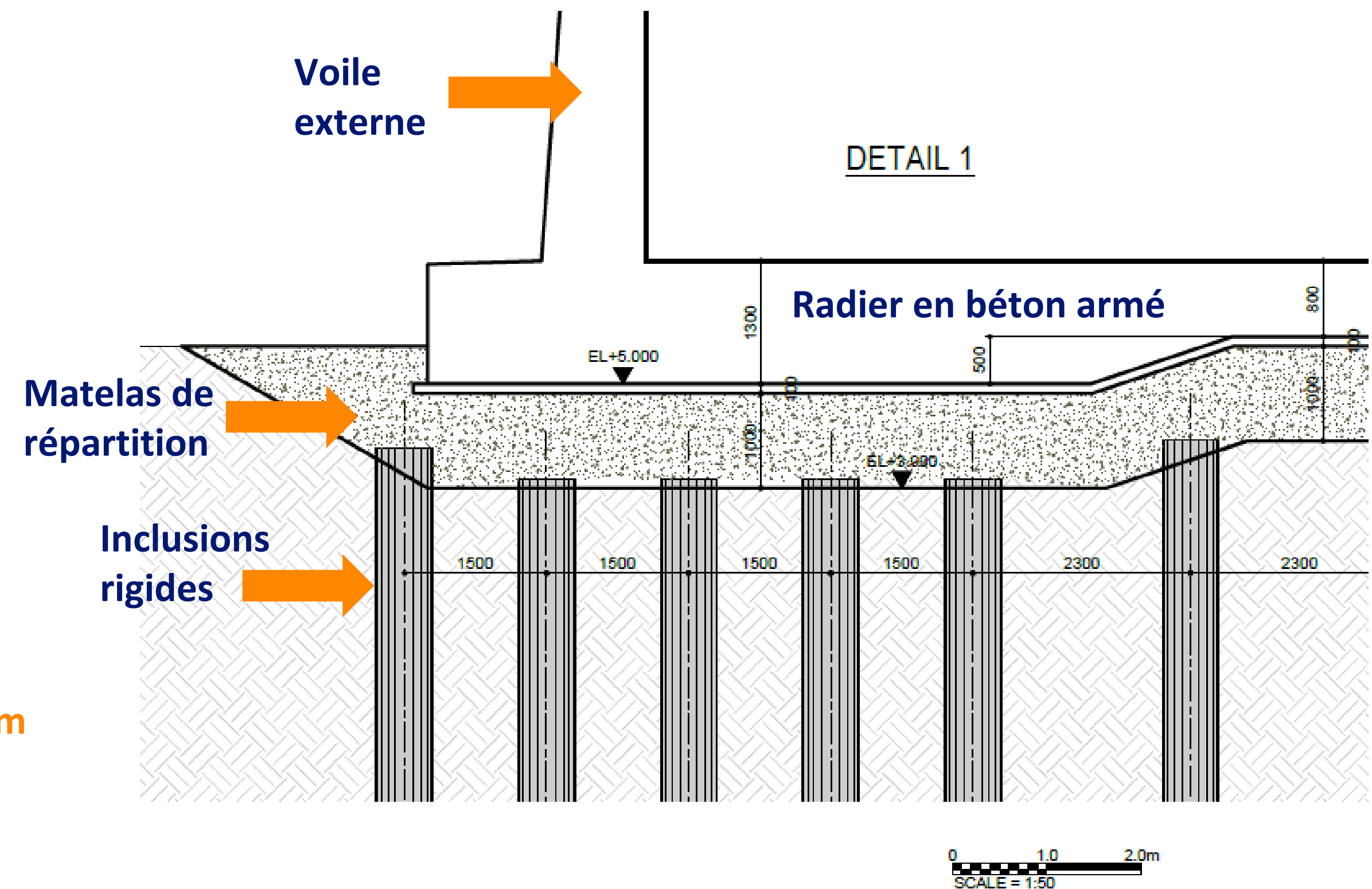
LE SYSTEME DE FONDATION

PROPOSE PAR LE CLIENT (FEED) :

- 1800 colonnes ballastées jusqu'à 40m profondeur
- 500 tubes en acier battus de 1m de diamètre et 40 à 45m de longueur

PROPOSE PAR LE GROUPEMENT :

- 1937 tubes en acier battus à pointe fermé – diamètre 610mm, longueur 18,5m.
- Plaques en acier en tête des inclusions de 810mm diamètre.
- Matelas de répartition de 1,1m d'épaisseur



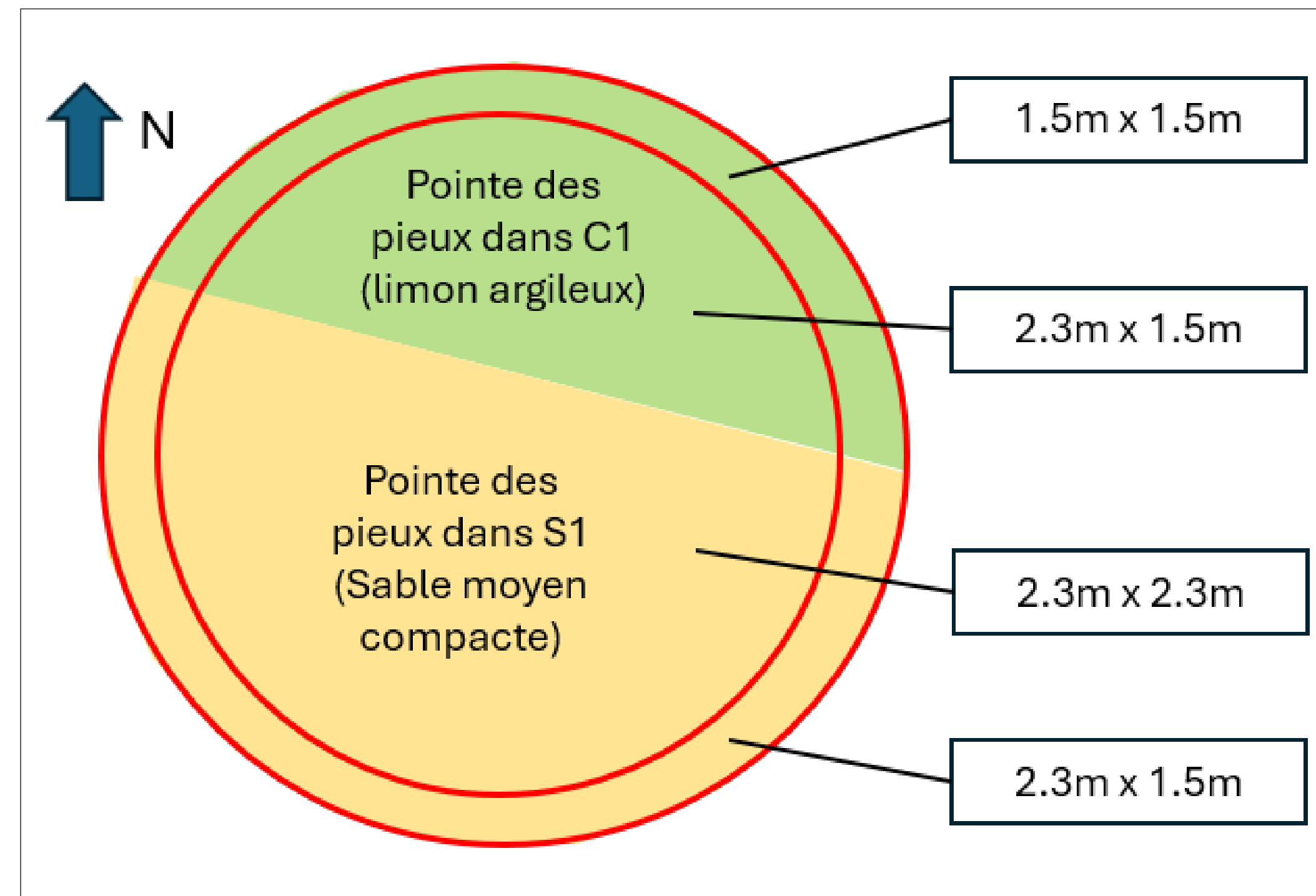
Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

LE SYSTEME DE FONDATION

Le maillage des inclusions diffère entre le Sud et le Nord:

- Plus serré au Nord car la pointe est dans la couche C1 (limon argileux)
- Plus ouvert au Sud car la pointe repose sur l'unité S1 (Sable moyen compact)



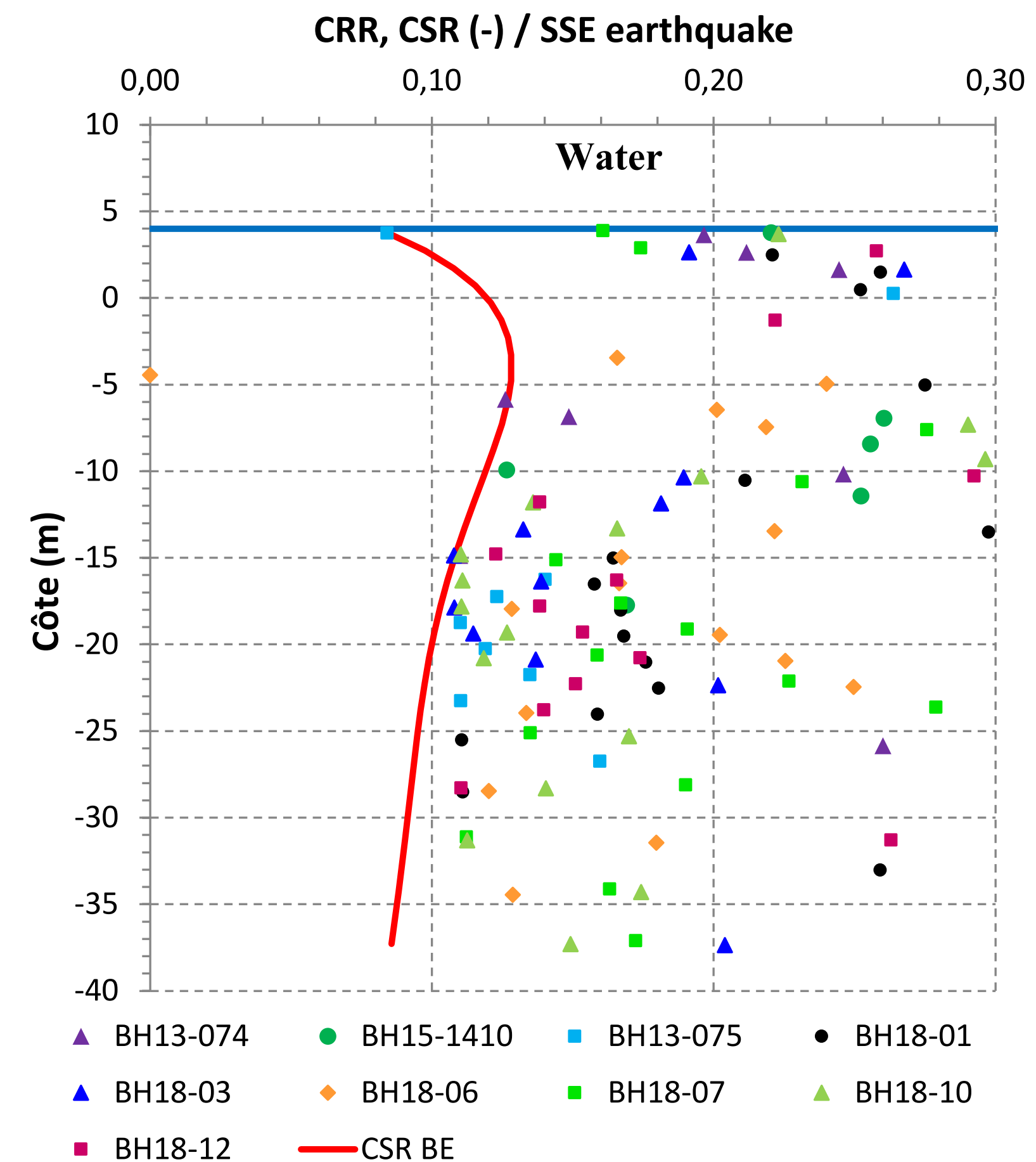
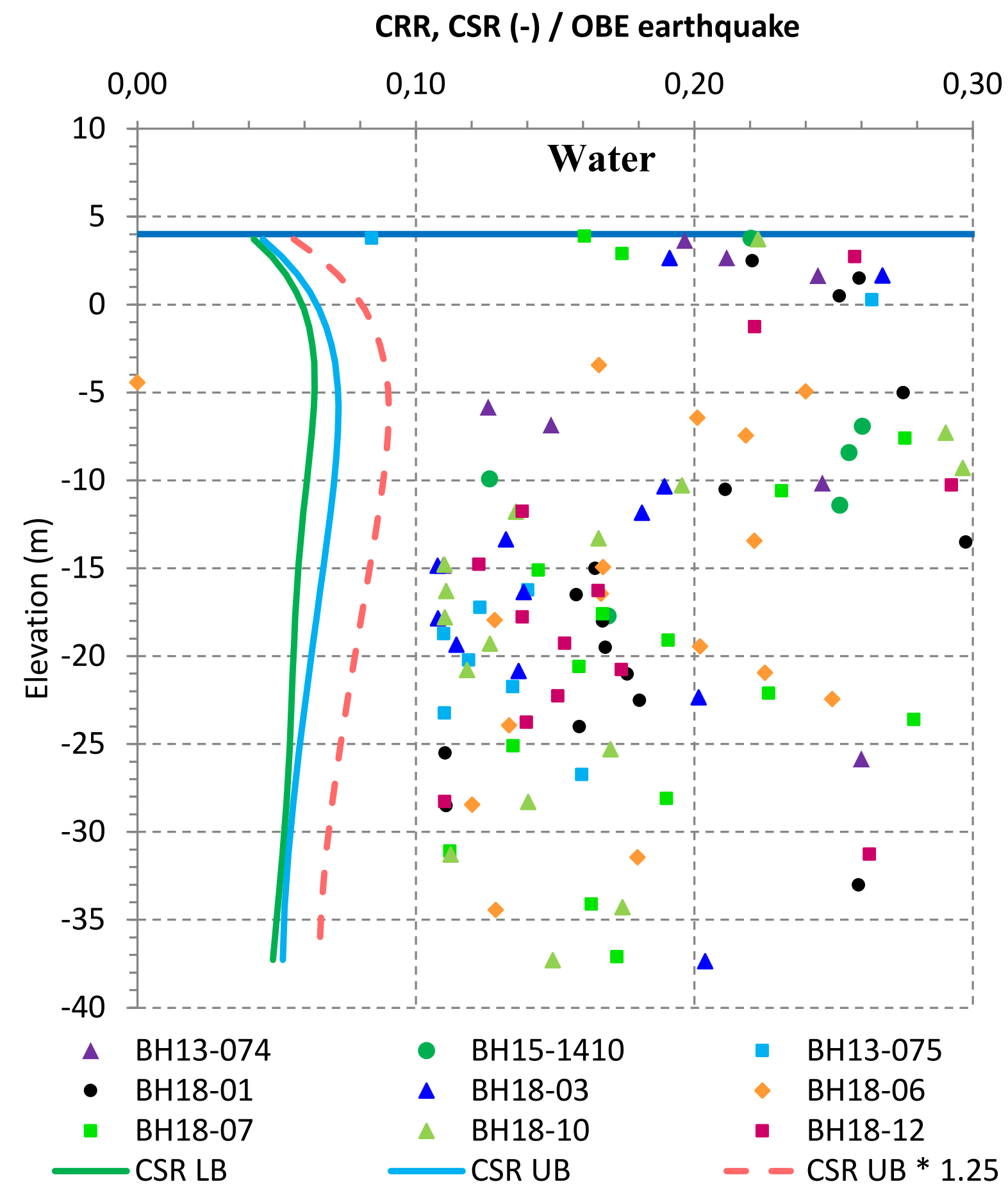
Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada



Grands chantiers à l'international

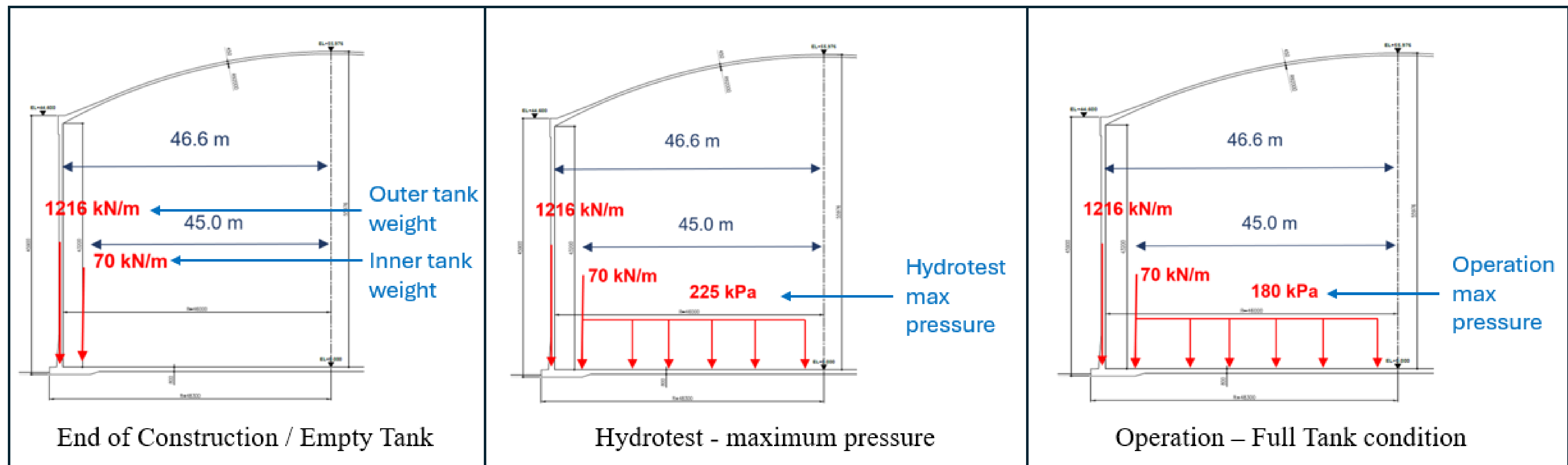
Fondations d'un réservoir GNL au Canada



Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

ANALYSE DE TASSEMENT - LES CAS DE CHARGE



Fin de construction
Réservoir vide

Hydrotest (Test à l'eau)
Réservoir rempli d'eau

Opération
Réservoir rempli de GNL

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

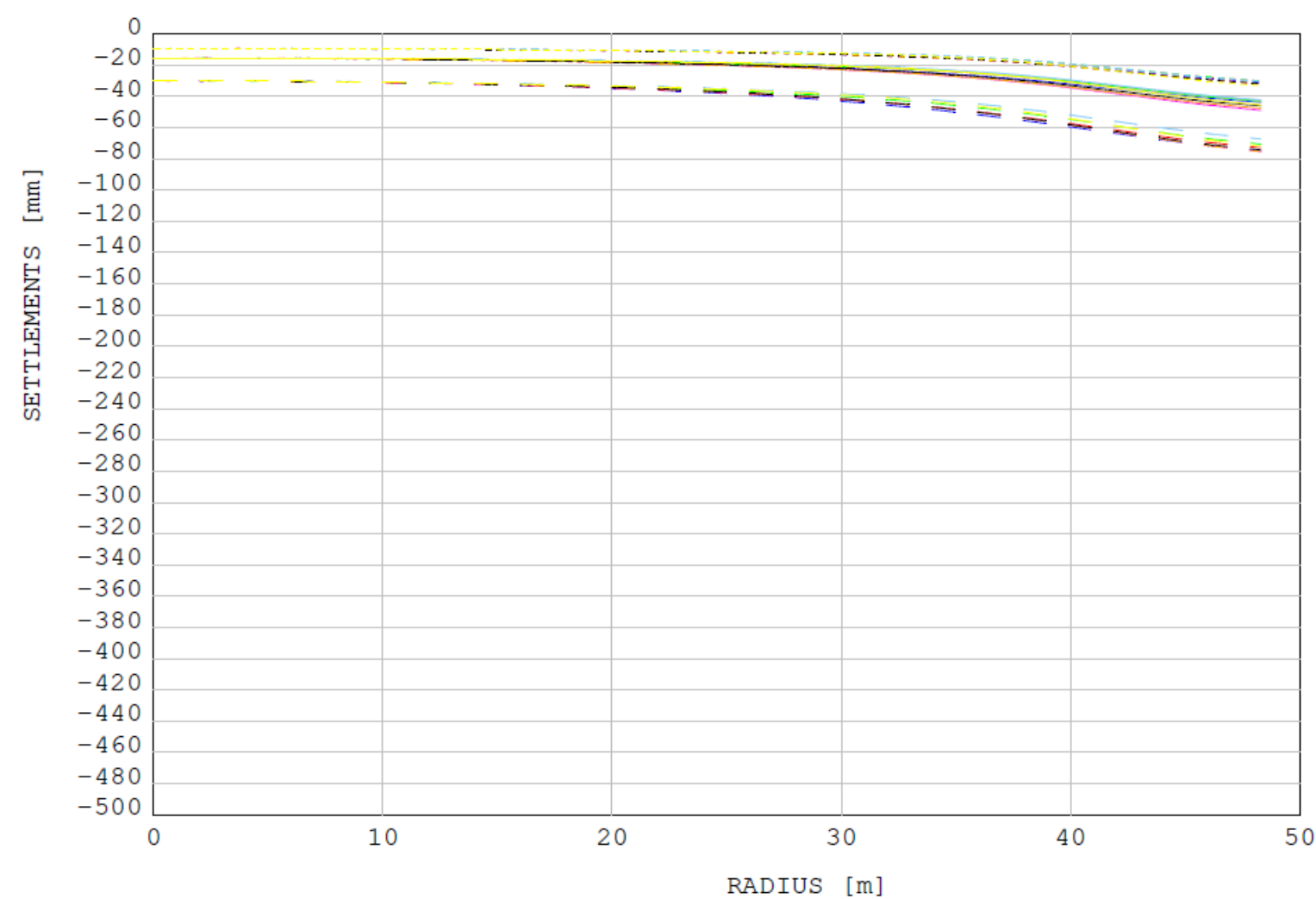
LES CRITERES DE TASSEMENT – ACI 376-11

- Pente du radier sur tout rayon $< 1/300$
- Rotation globale entre deux points diamétralement opposés $< 1/500$
- Pente du radier sur la périphérie du bac $< 1/500$
- Tassement au bord du radier – En opération $< 50\text{mm}$

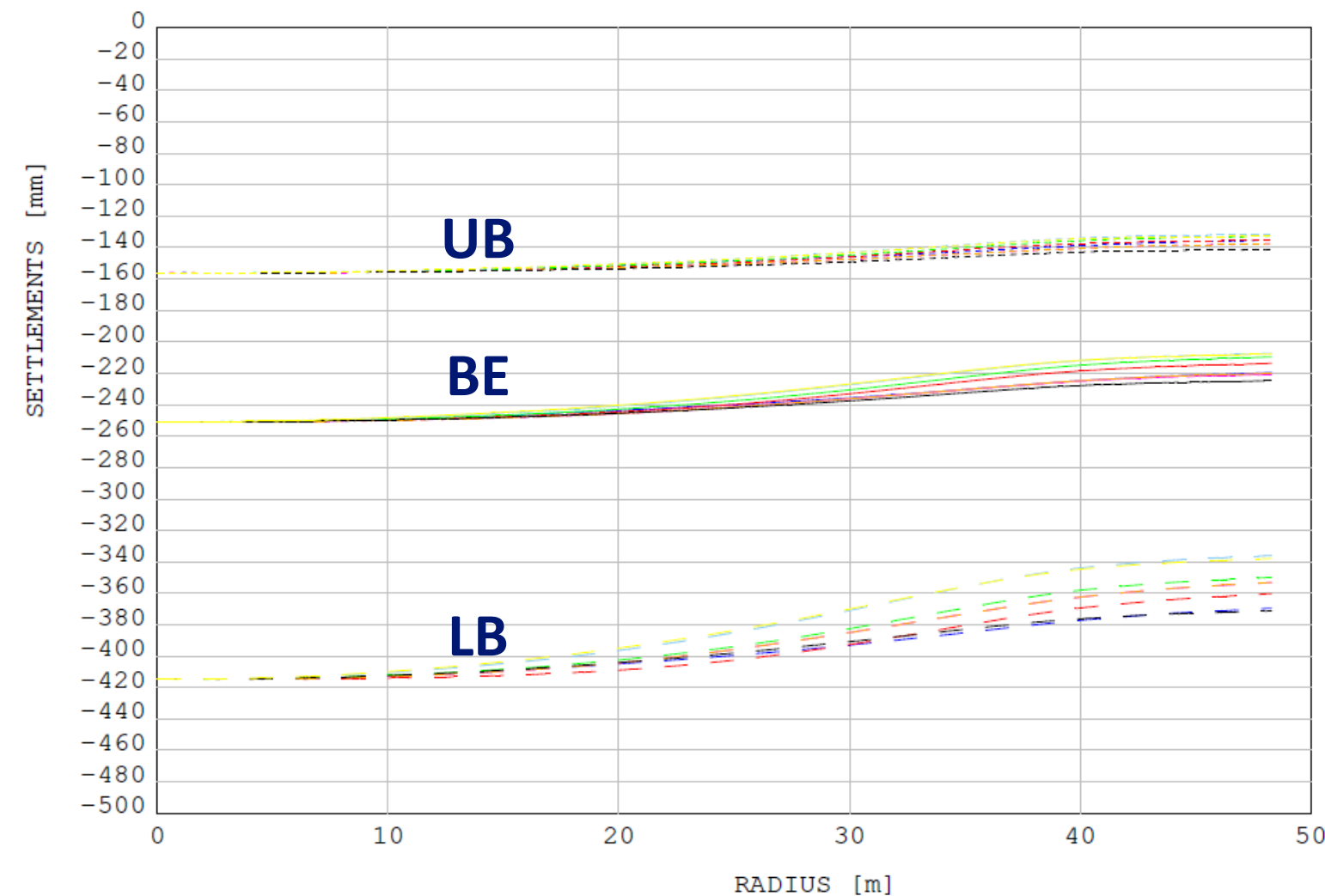
Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

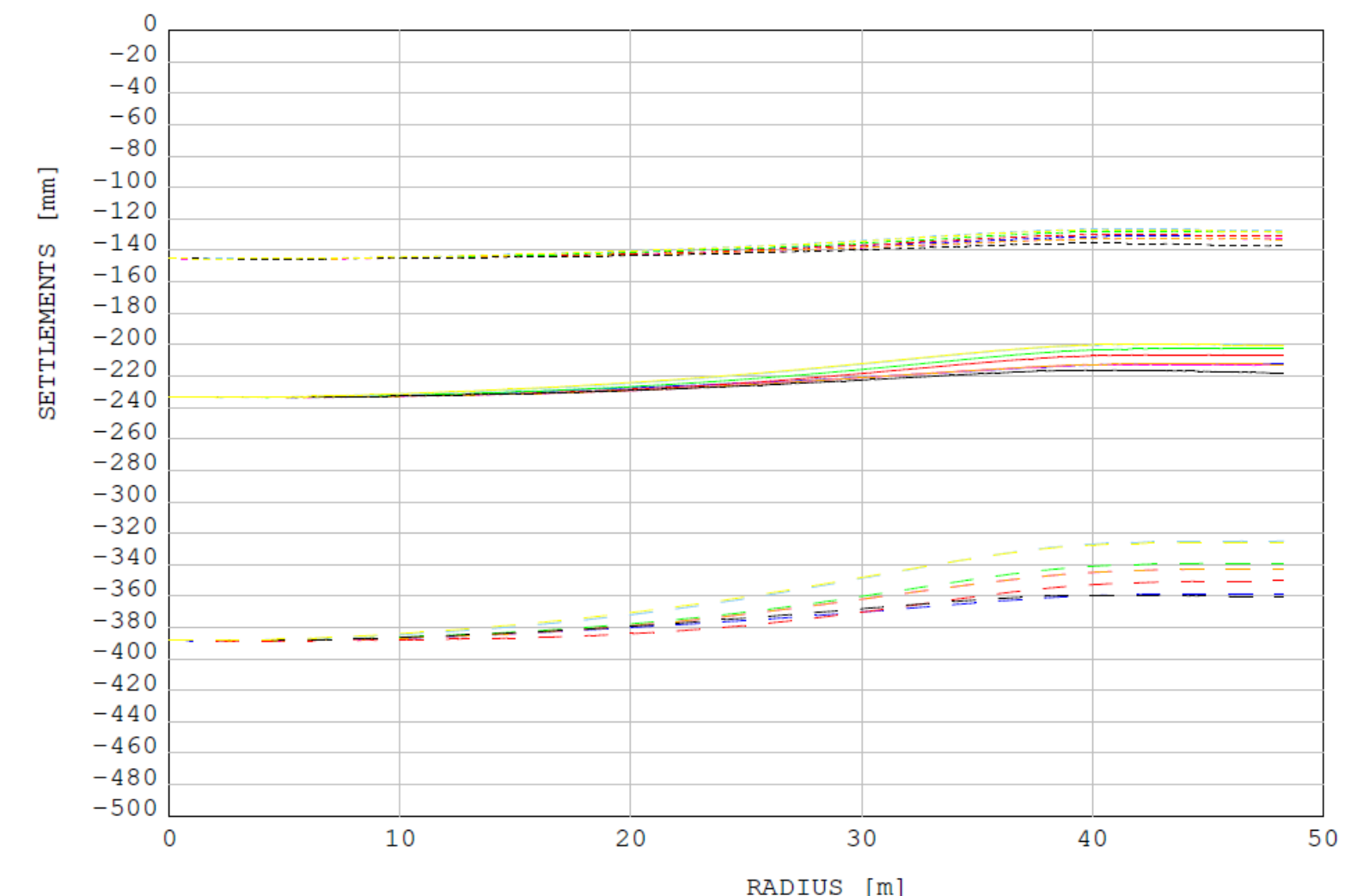
LES TASSEMENT ESTIMES – Plaxis 2D Axisymétrique



Fin de construction
Réservoir vide



Hydrotest (Test à l'eau)
Réservoir rempli d'eau



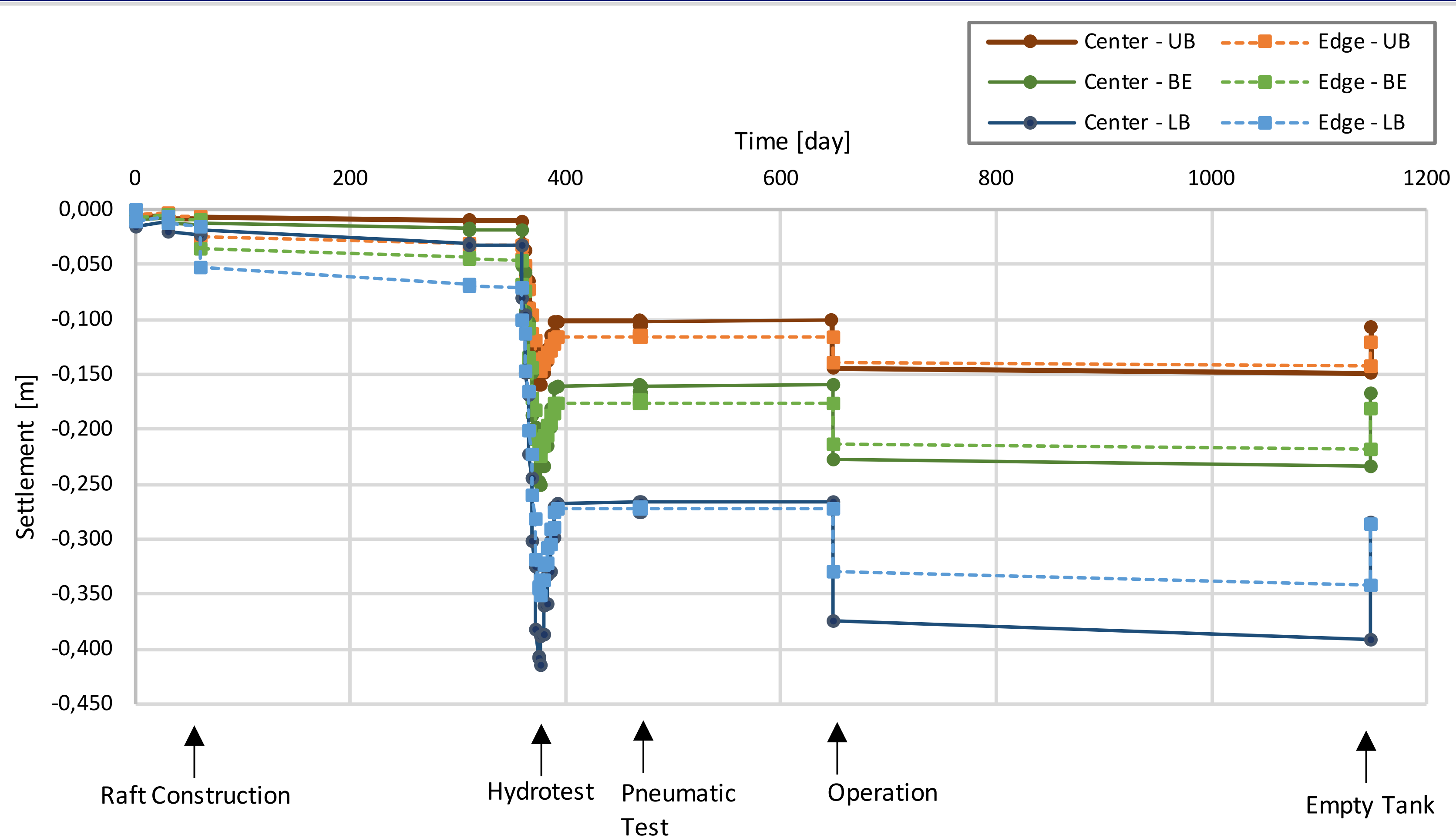
Opération
Réservoir rempli de GNL

Modules du sol:

- **UB : Upper Bound**
- **BE : Best estimate**
- **LB : Lower Bound**

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

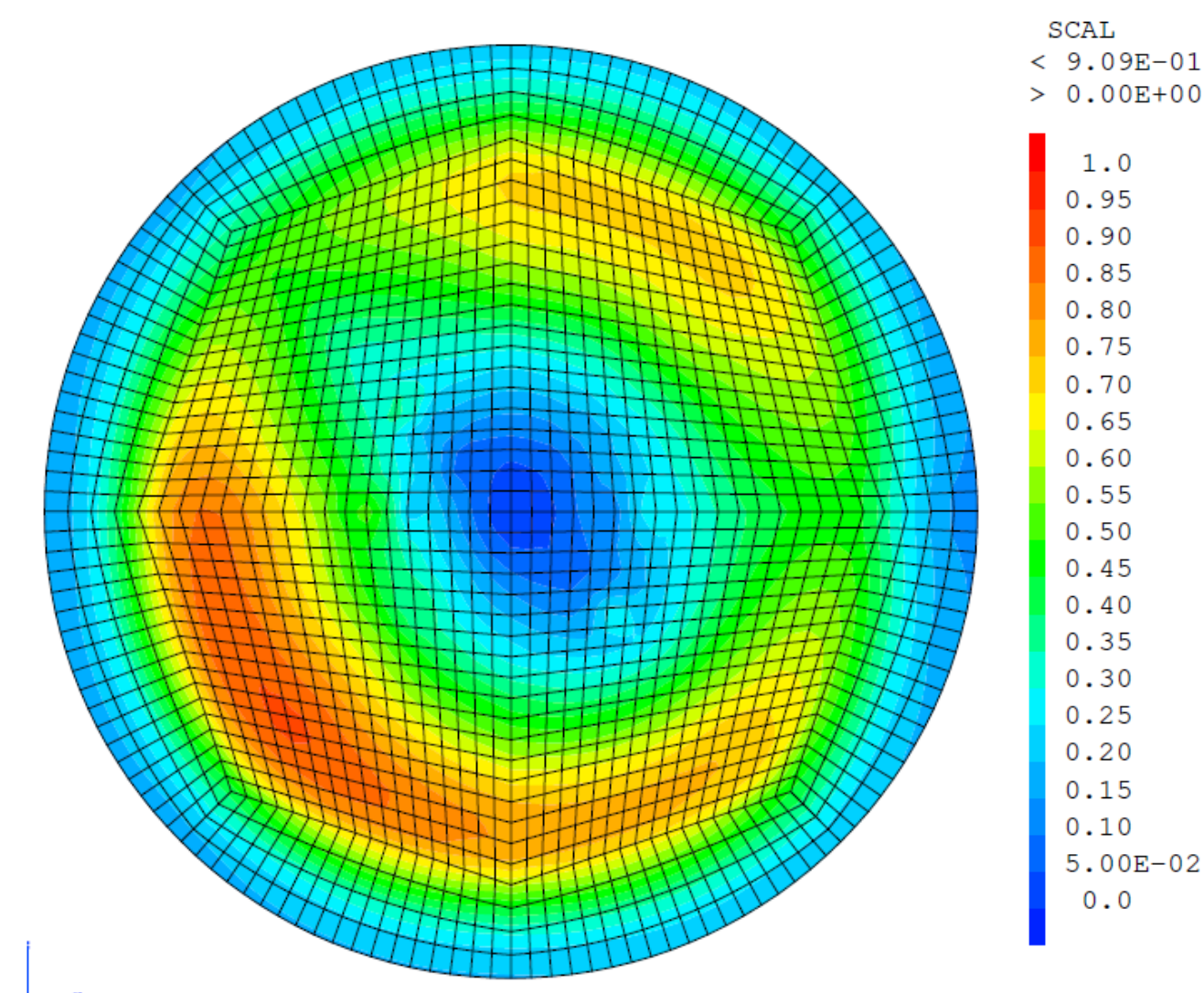


Grands chantiers à l'international

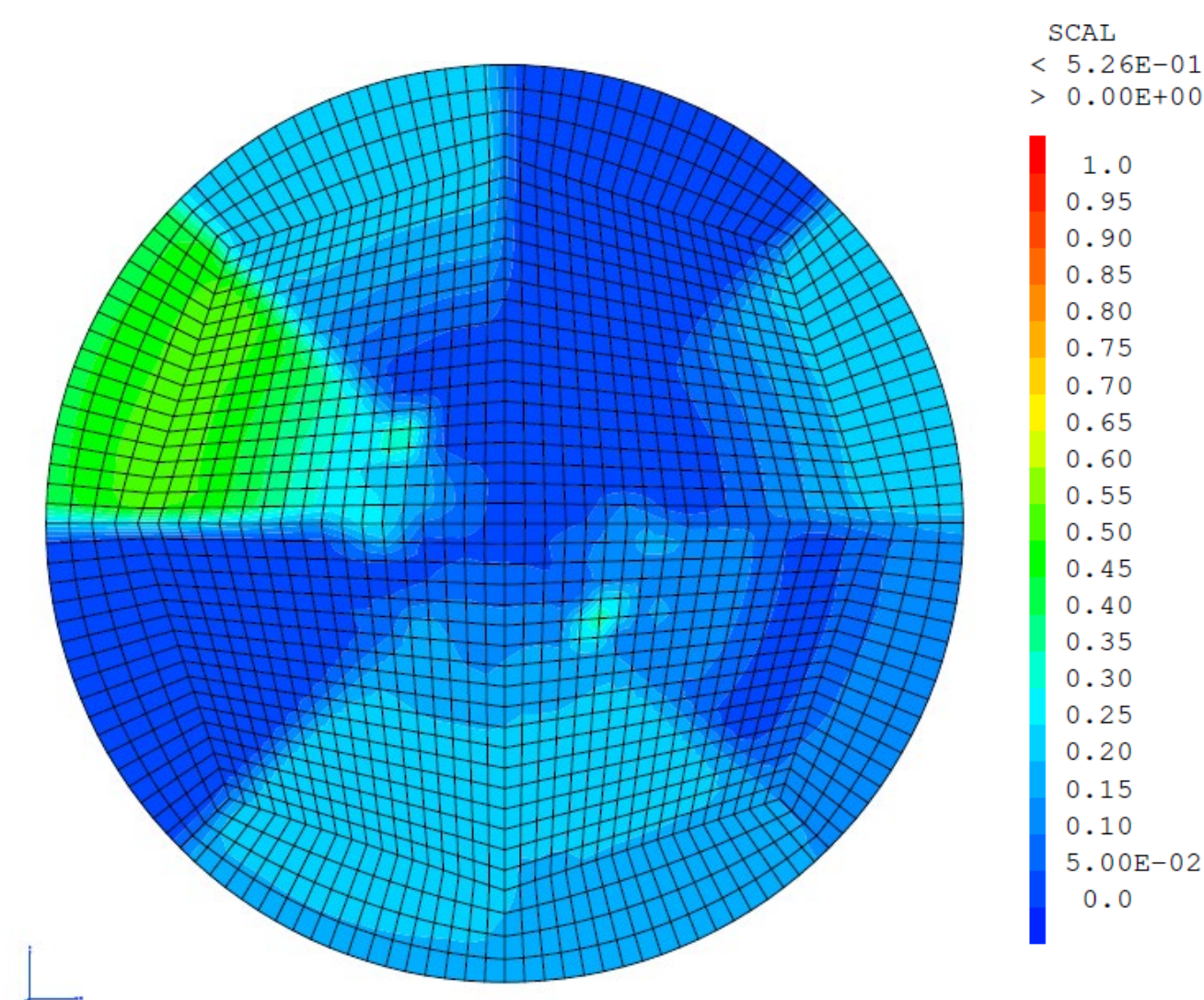
Fondations d'un réservoir GNL au Canada

TASSEMENT DIFFERENTIEL MAX ESTIME – Borne inférieure des raideurs du sol

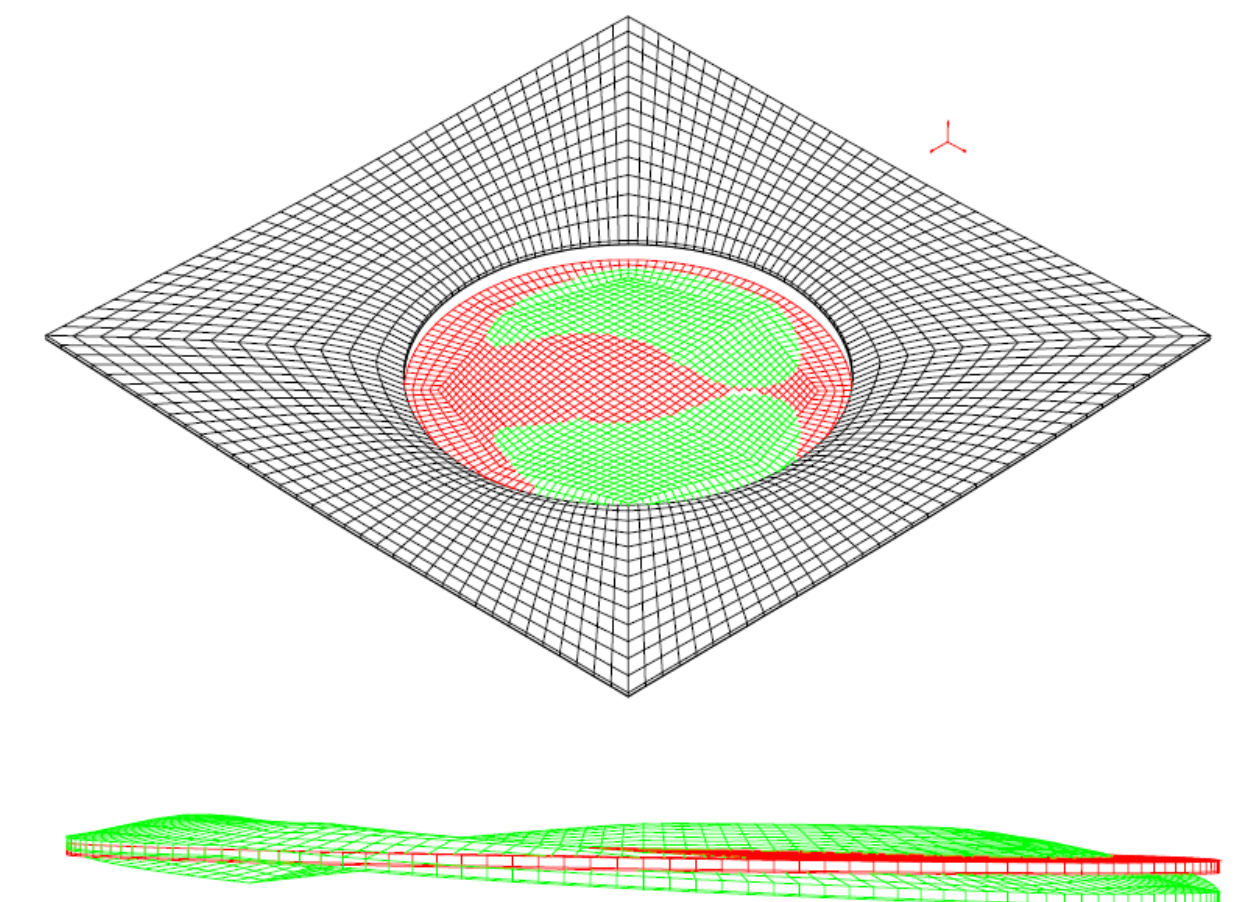
Pente radier < 1/300



Pente en périphérie < 1/500



Rotation globale < 1/500



Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

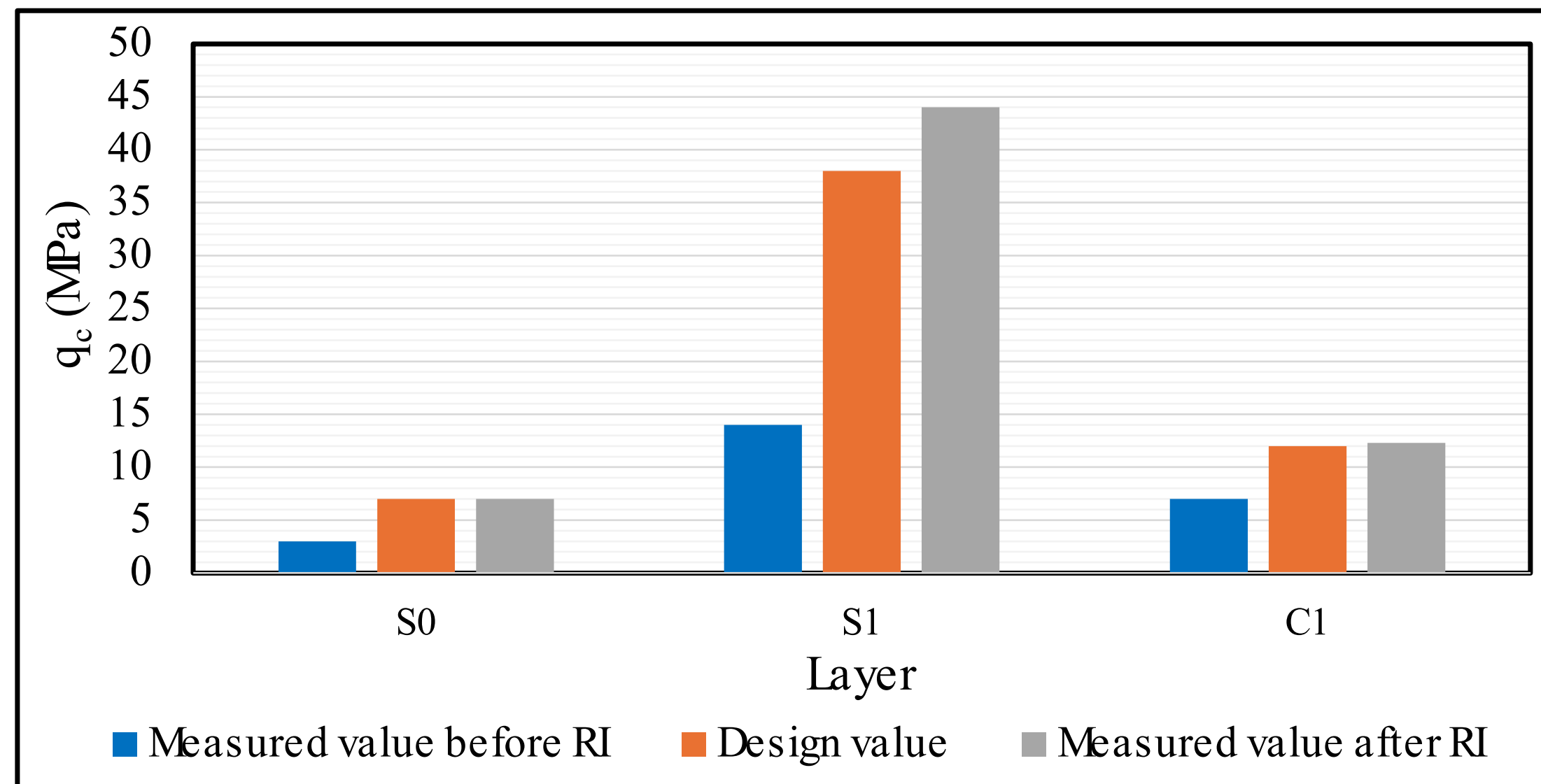
MESURES DE CONTRÔLE / VALIDATION DE LA CONCEPTION (DESIGN)

- CPTs avant (14) et après (14) installation des pieux
- Essais de chargement des pieux (1 Statique et 40 PDA)
- Suivi des tassements
- OBJECTIF : Confirmer la densification du sol entre inclusions
- OBJECTIF : Vérifier la capacité portante des inclusions
- OBJECTIF : Vérifier que les tassements réels ne dépassent pas les critères

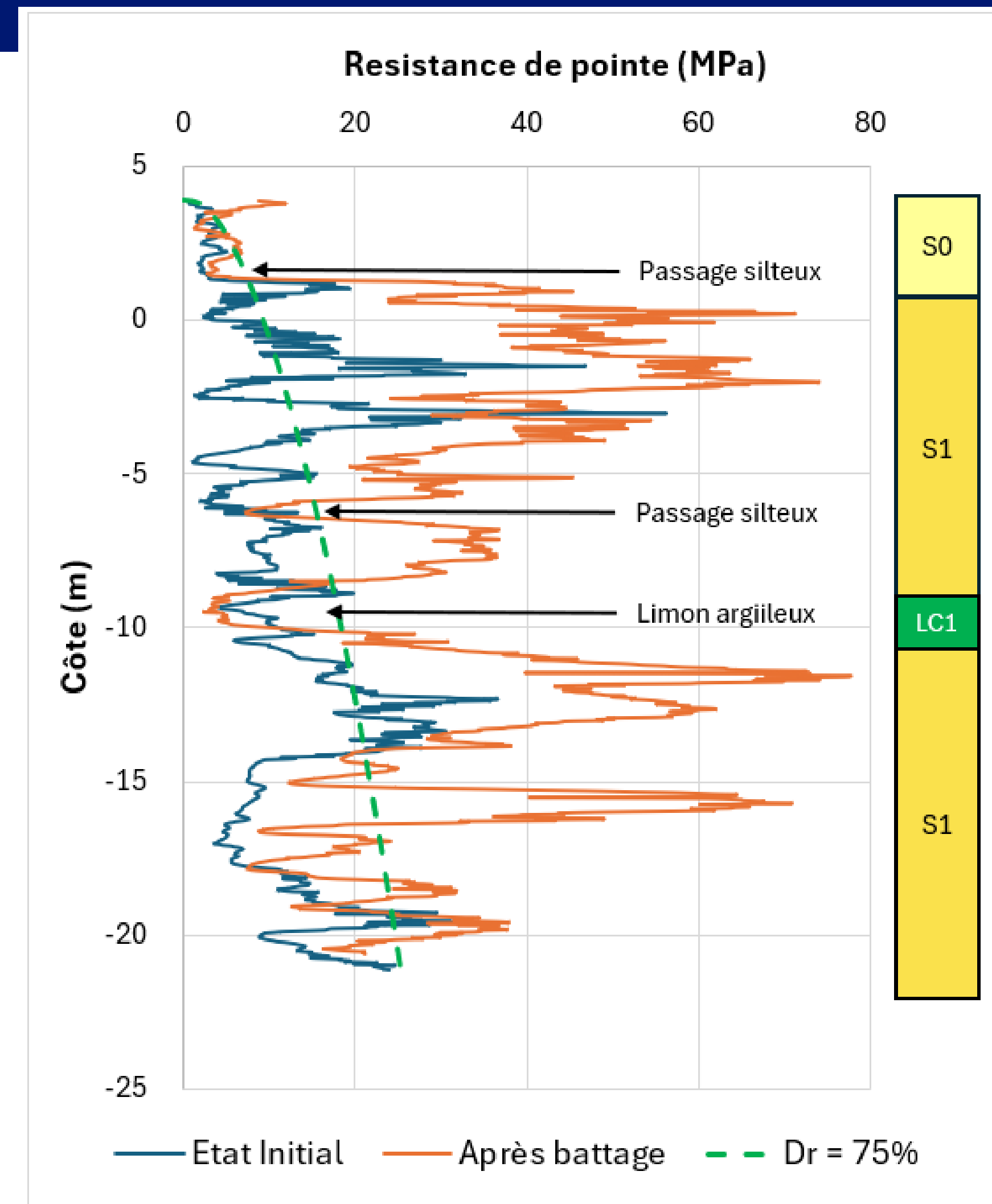
Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

CPTs avant / après



Bilan par couche de sol

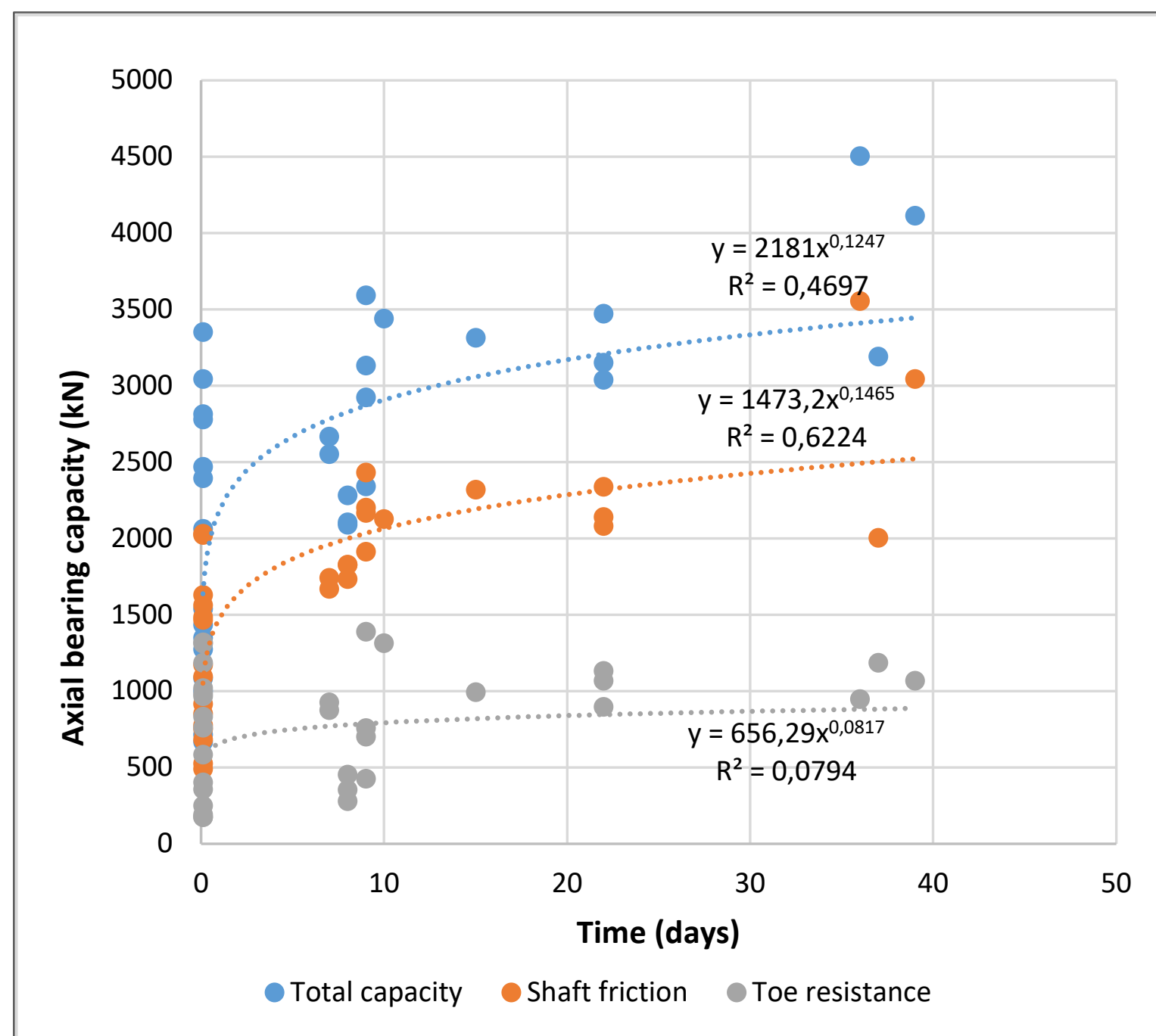


CPT 20-05

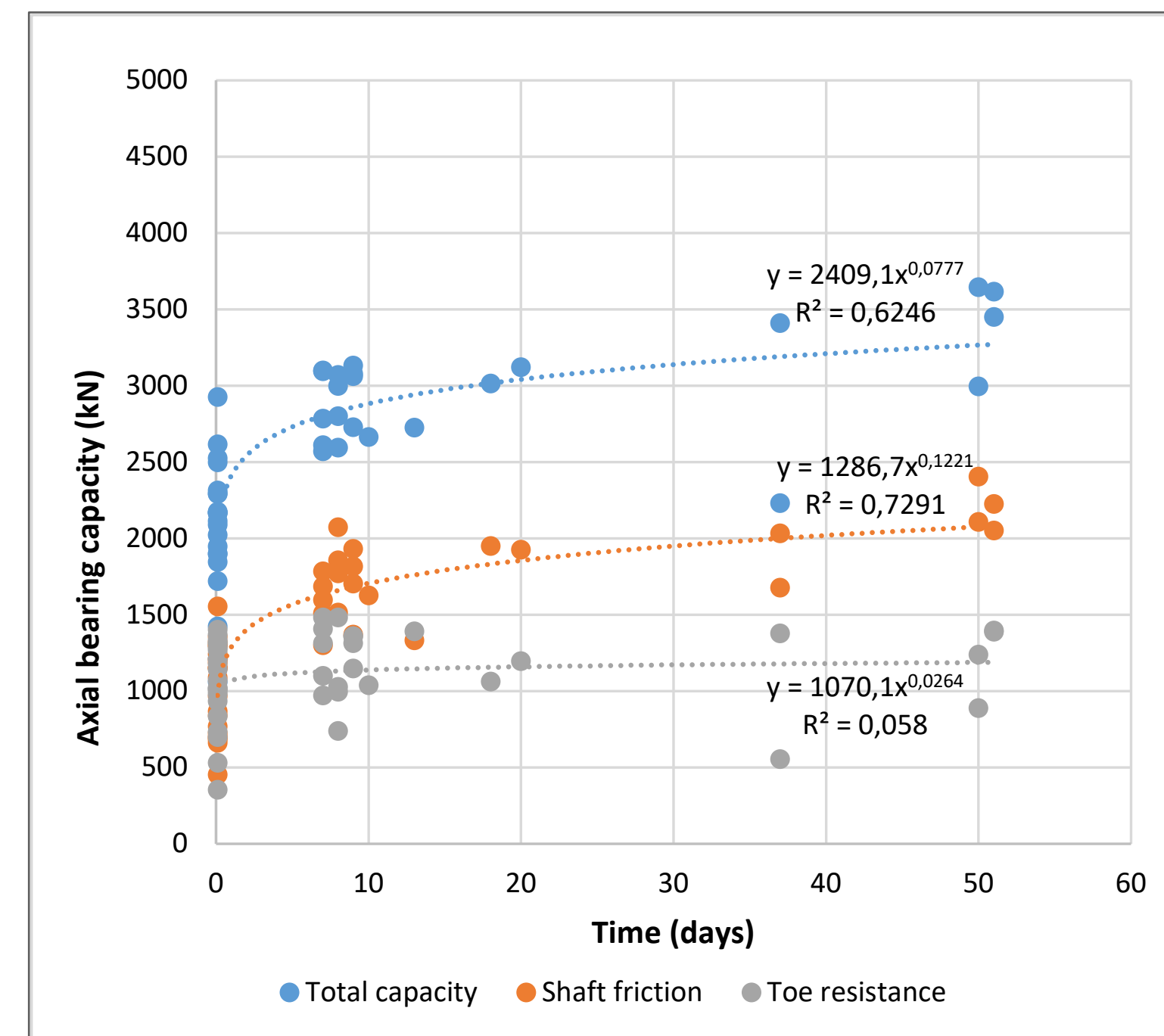
Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

CAPACITE PORTANTE ULTIME – Essais PDA – Effet du temps (restrike)



Zone Nord

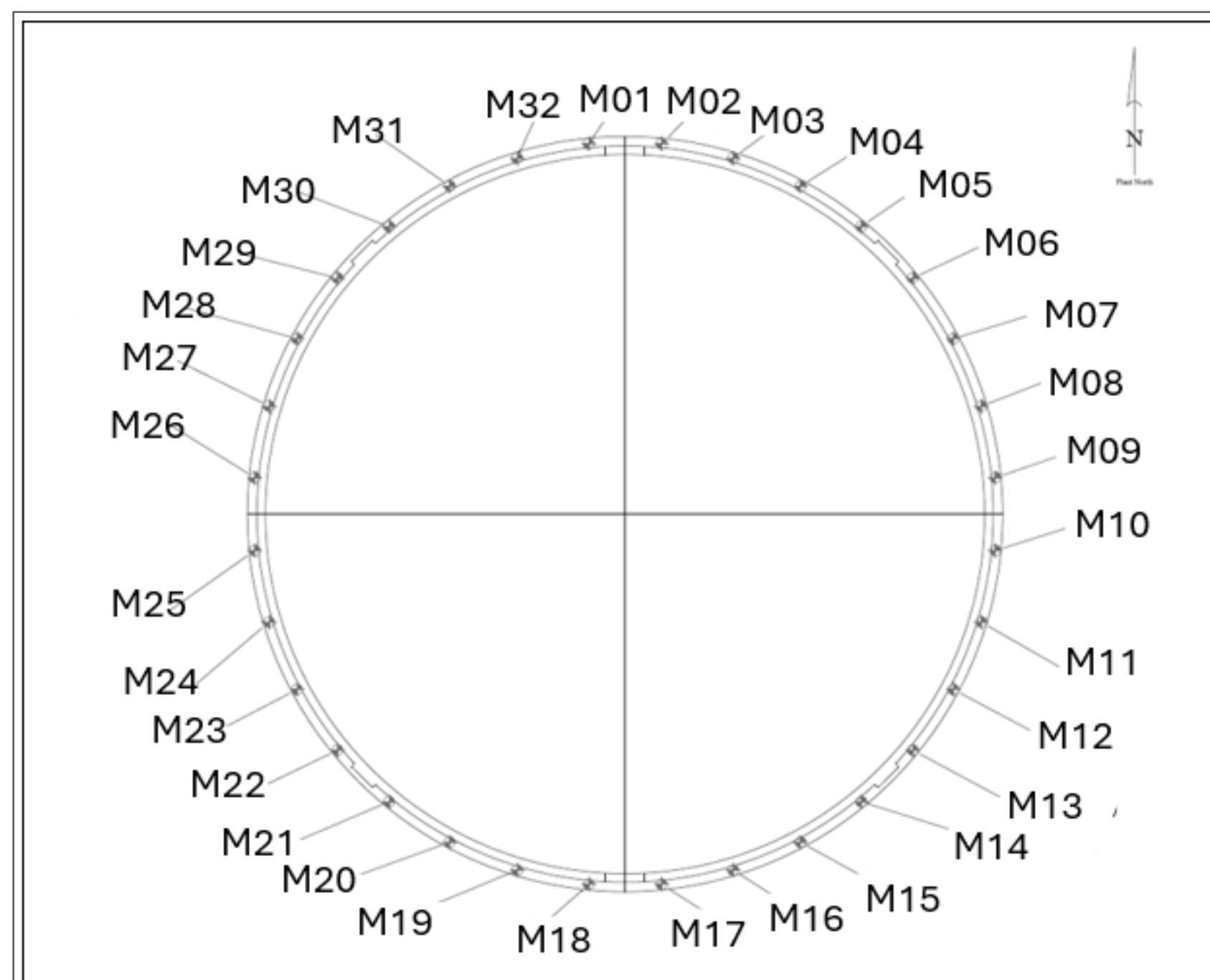


Zone Sud

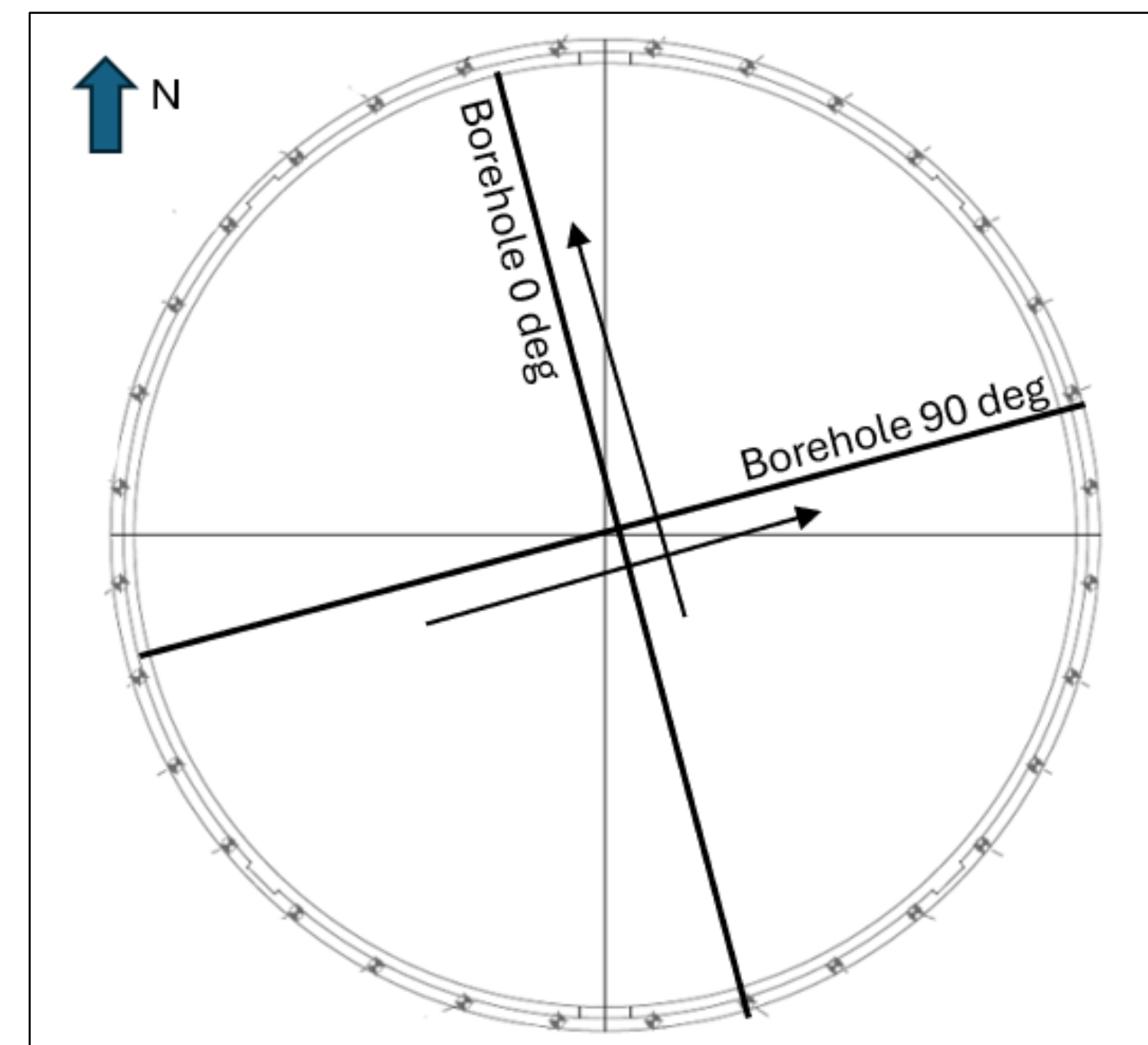
Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

SUIVI DES TASSEMENTS – Deux méthodes



32 Mires topographiques sur la périphérie

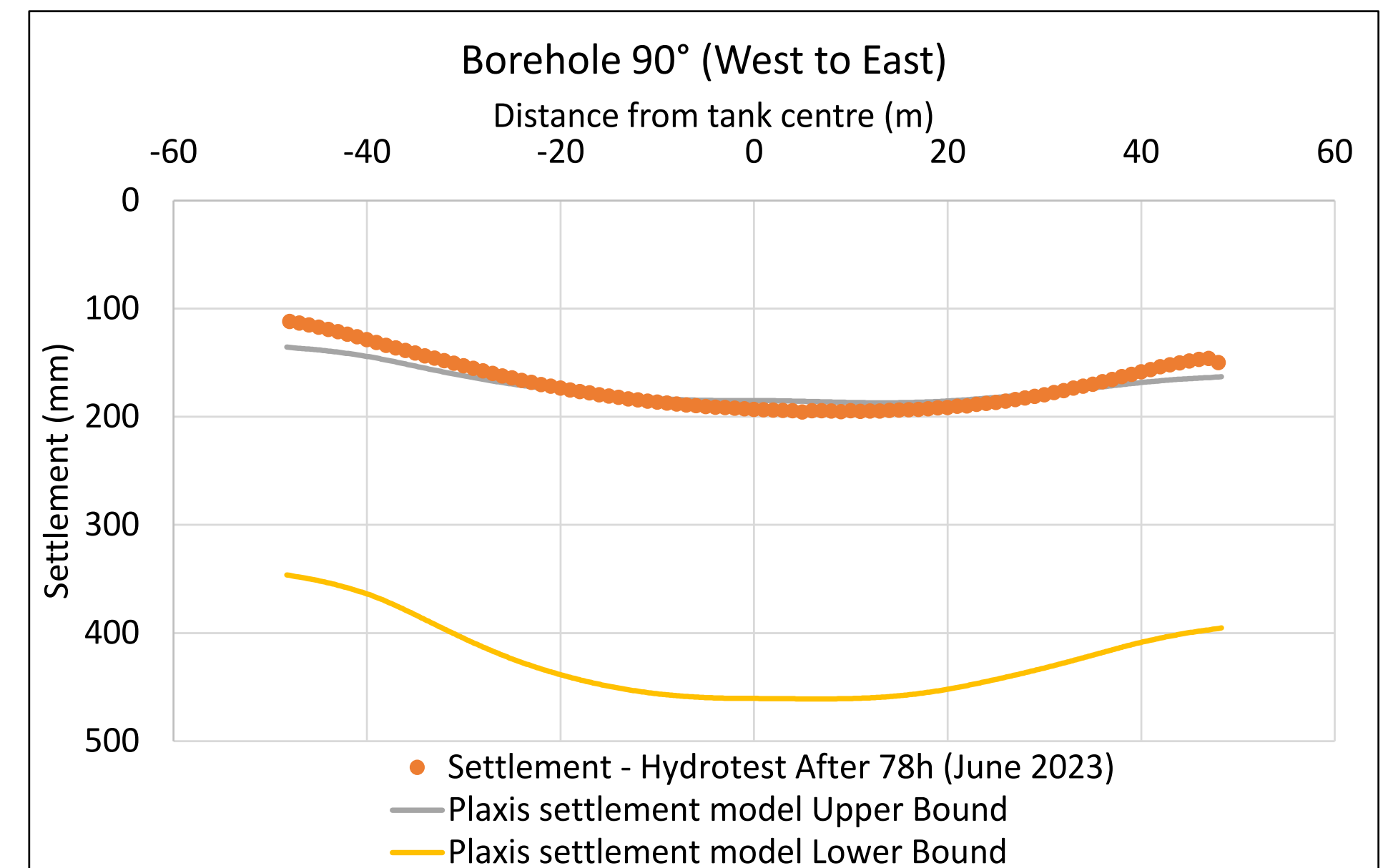
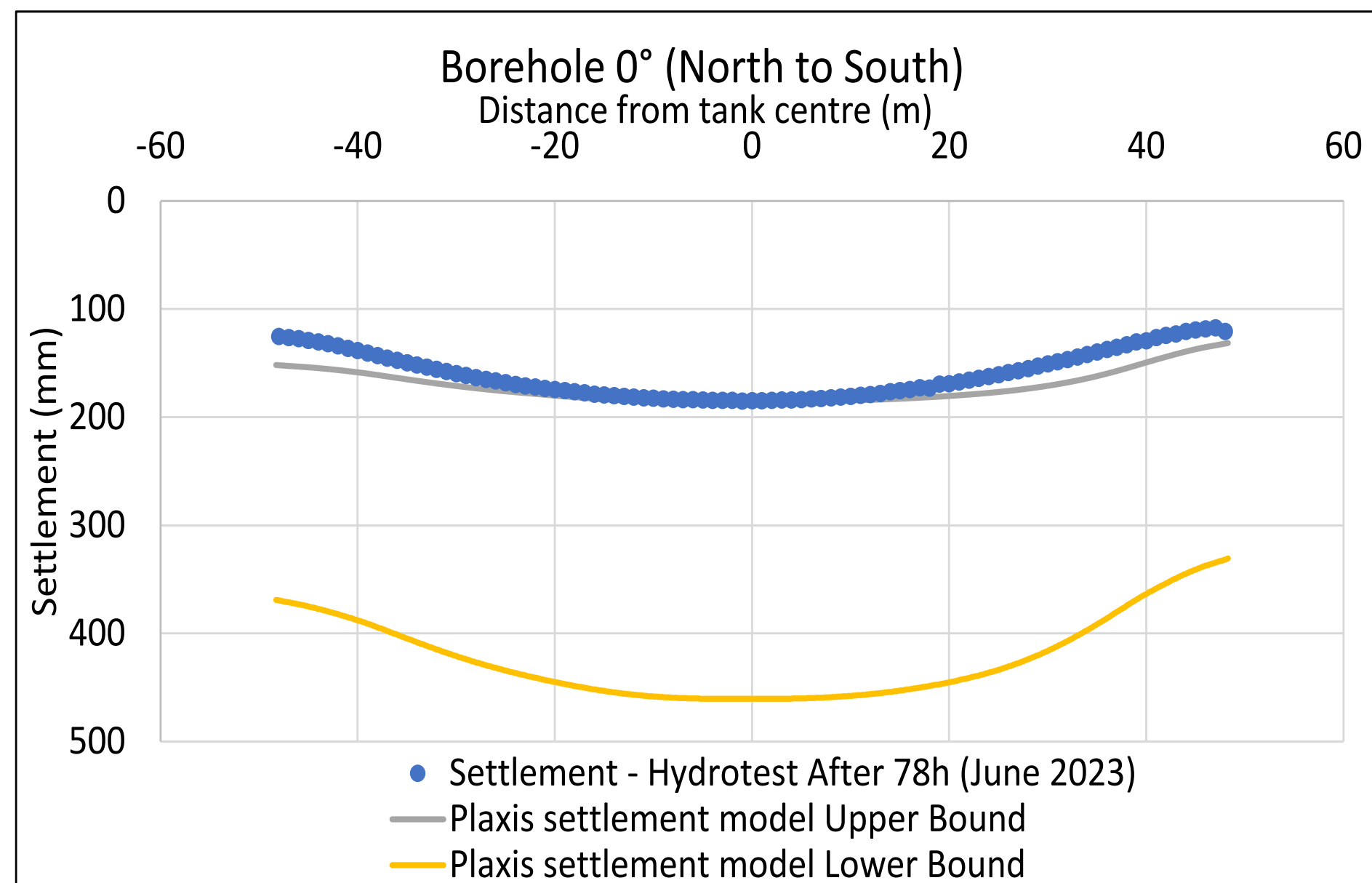


2 Profilomètres horizontaux

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

COURBES DE TASSEMENT – Hydrotest 100%

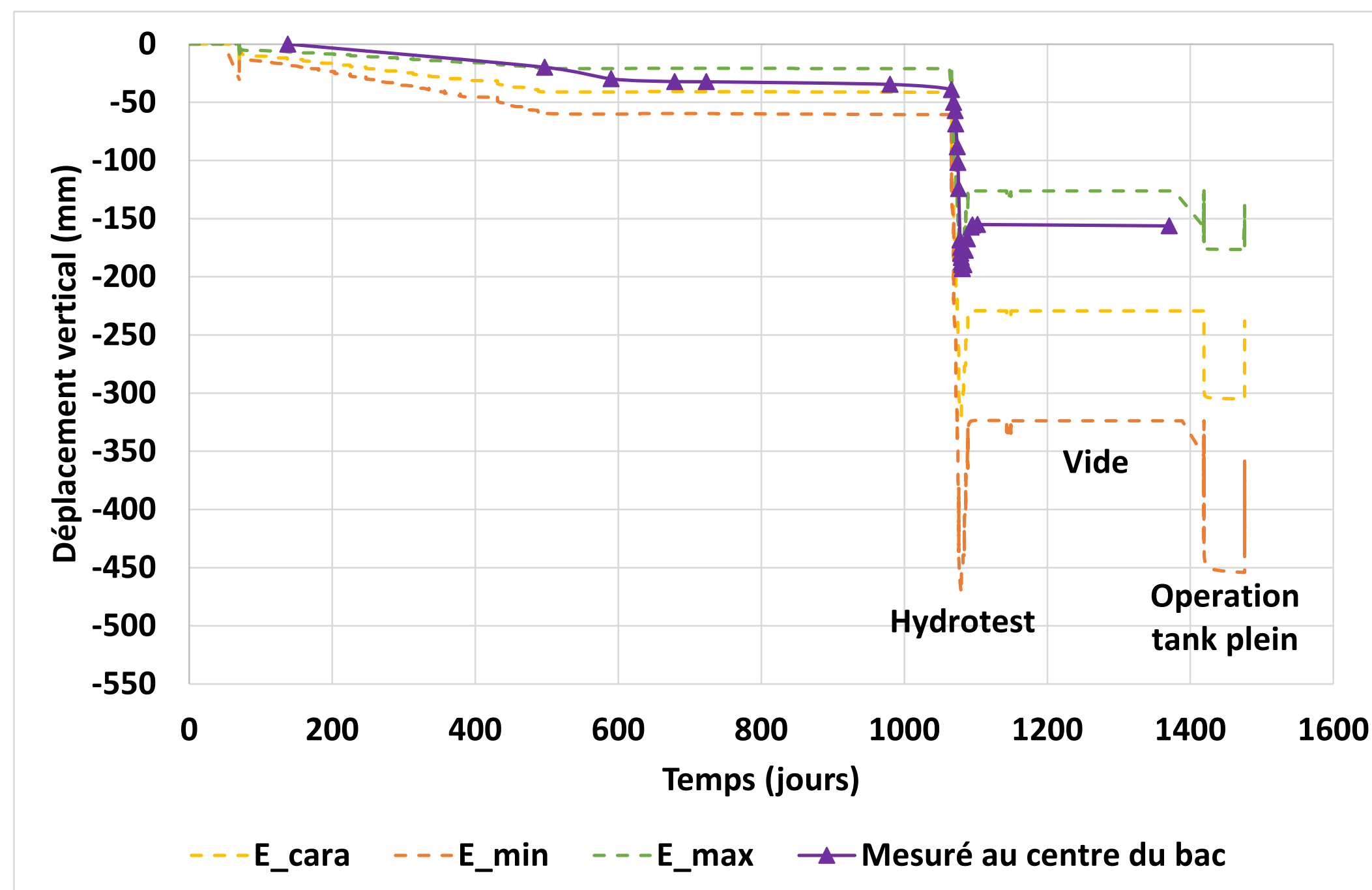


Le tassement mesuré est proche de l'estimation avec la borne haute des modules de déformation

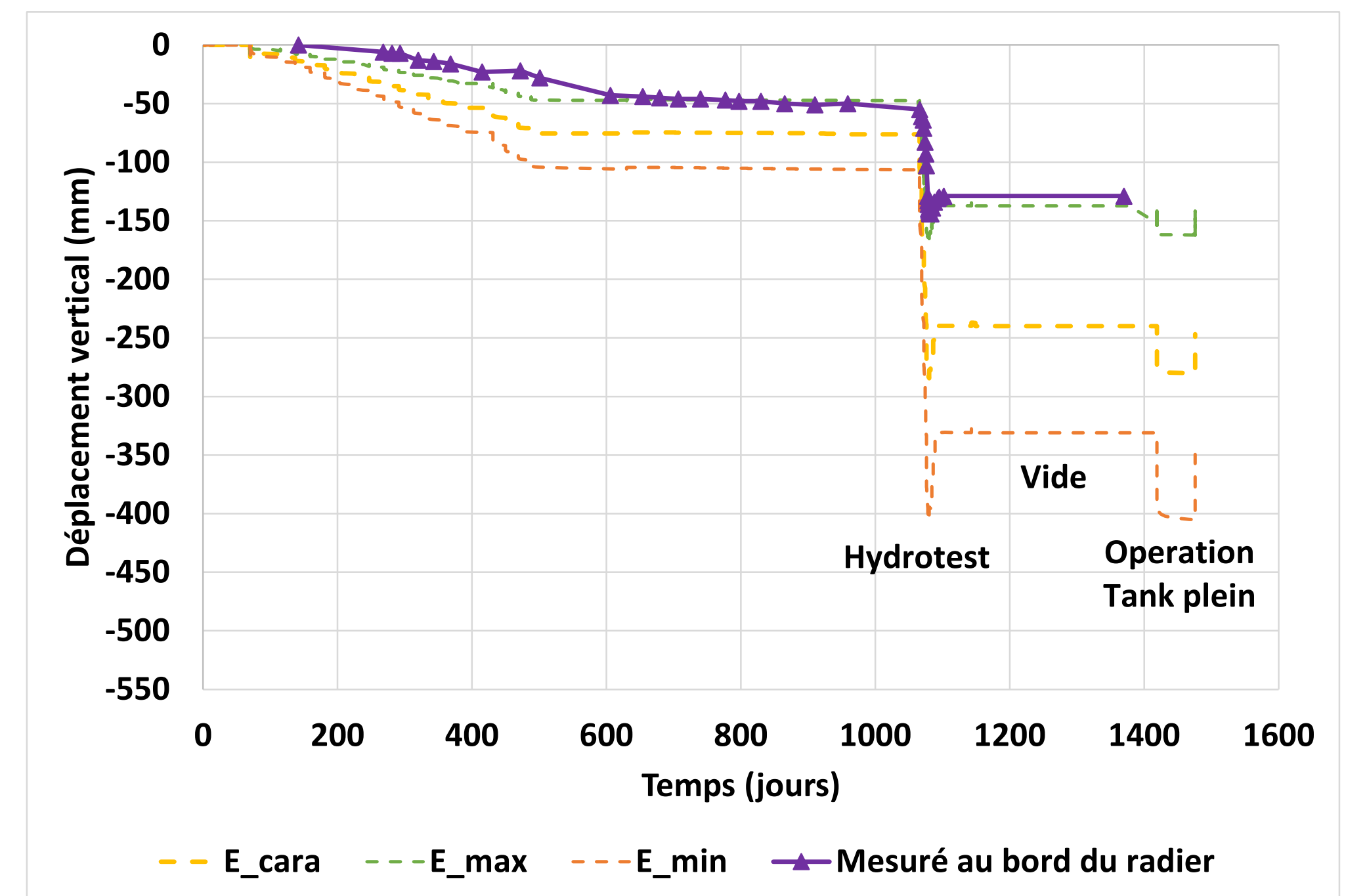
Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

MESURES DE TASSEMENT – Evolution avec le temps



Mesures au centre du réservoir



Mesures au bord du radier

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

CONCLUSIONS

- Les mesures de contrôle ont servi à valider le dimensionnement du système de fondation adopté.
- Le battage des pieux permet de densifier le sol et ainsi mitiger le risque de liquéfaction et contrôler les tassements du tank.
- Le critère principal pour le dimensionnement de ce type de fondation est le contrôle des tassements afin de rentrer dans les critères du Client/Code et ainsi assurer l'intégrité du réservoir.
- En comparaison avec le système proposé par le Client (colonnes ballastées + pieux connectés L=45m), la solution adoptée (inclusions rigides L=19m) représente un gain au terme des quantités, et permet de réduire le temps de construction des fondations, car les pieux ne sont pas connectés au radier.
- Les vérifications réalisées ainsi que les mesures effectuées ont aidé à rassurer le Client, car c'est la première fois que ce système est utilisé pour ce type d'ouvrage (réservoir GNL de grand capacité).

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

REX

Difficultés dans l'approbation du design car :

- La solution proposée était plus « light » que celle du Client
- Manque de connaissance du Client sur le système et le dimensionnement d'inclusions rigides ; conséquences:
 - Le problème de tassement est devenu un problème de capacité portante des pieux
 - Facteurs de Sécurité forts (pour pieux) → Augmentation du nombre d'essais préalables et de contrôle
 - Planning et coût maîtrisé car pieux battus et donc essais PDA
- L'ASIRI n'est pas connu au Canada, d'où des grandes discussions avec le Client et retard dans l'approbation des notes.

Grands chantiers à l'international

Fondations d'un réservoir GNL au Canada

EQUIPE PROJET

- Jonas Verschuere, Ancien VCGP, Etudes Conception
- José Munoz-Castelblanco, Etudes Exécution, VCGP
- Zoubaida Gilbert, Directrice Pôle Géotechnique, VCGP
- Alain Pecker – Expert Dynamique des Sols
- L'équipe d'Ingénierie d'Entrepouse
- Eric Priore, Directeur Technique VCGP, Equipe du Chantier
- Darren Beaumont, WORLEY, Professional Engineer