



Travaux d'amélioration de sol en milieu maritime



NOUVEL ÉCOQUARTIER DE L'ANSE DU PORTIER À MONACO



SOMMAIRE

1. PRÉSENTATION DU PROJET

2. MAÎTRISE DES TASSEMENTS

- DRAGAGE
- VIBRO-COMPACTION
- CRITÈRES DE TASSEMENTS (TRAVAUX ET SERVICE)
- SUIVI DES TASSEMENTS CAISSONS

3. STABILITÉ DES OUVRAGES

- TRAITEMENT DE SOL, ÉVOLUTION ENTRE LE PRO ET L'EXE

4. PROCESSUS / FONCTIONNEMENT DU GROUPEMENT ENT. ET MOE

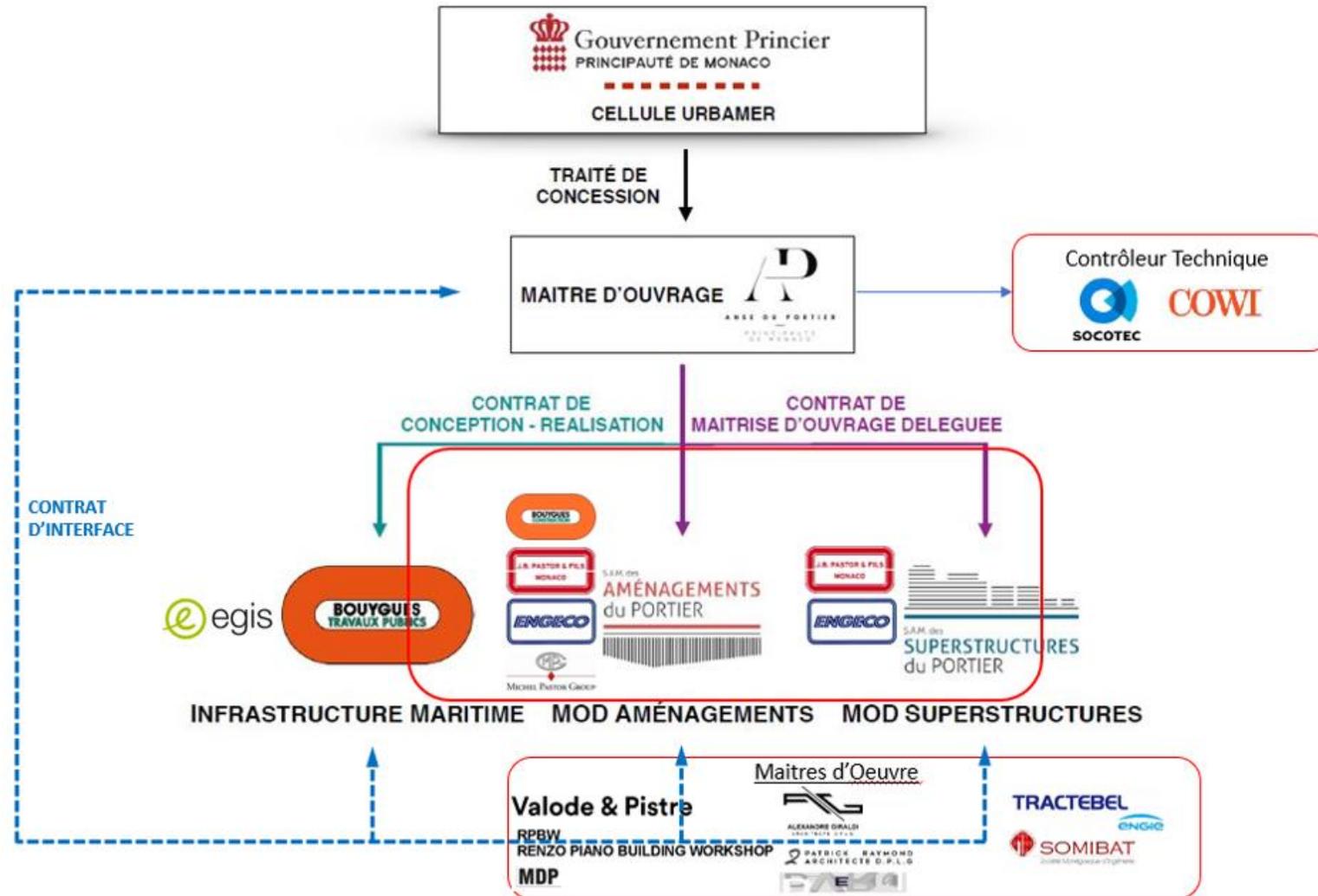


MARETERRA

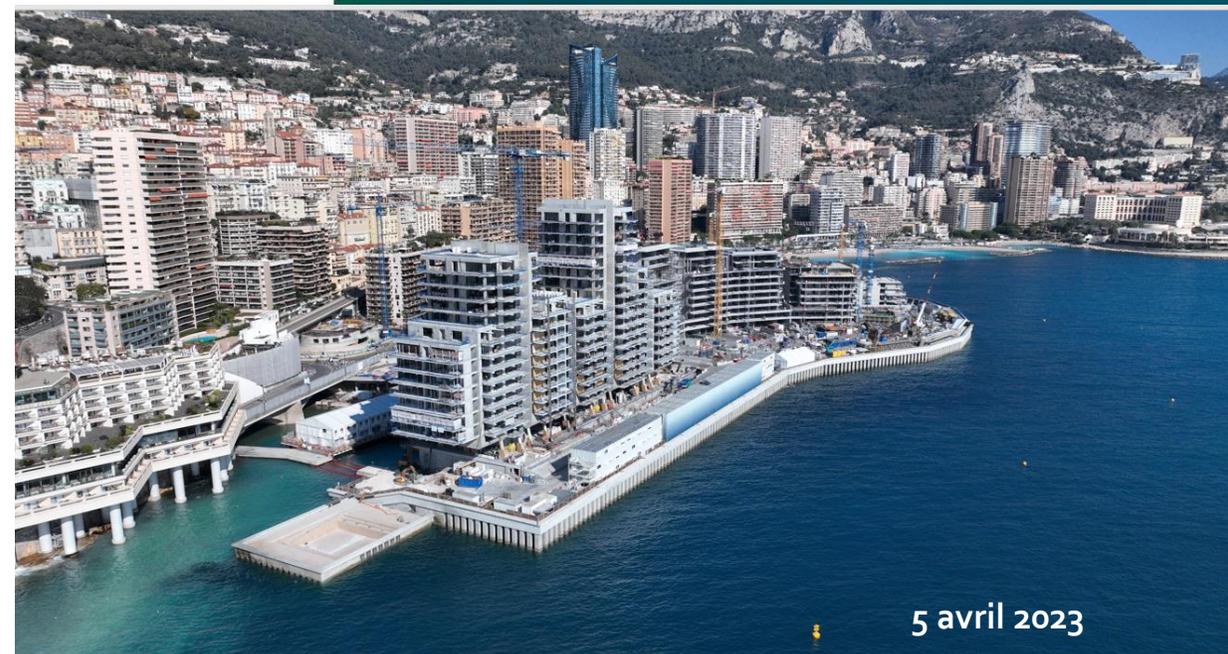
L'EXTENSION EN MER DE MONACO

01.

LES ACTEURS PRINCIPAUX DU PROJET



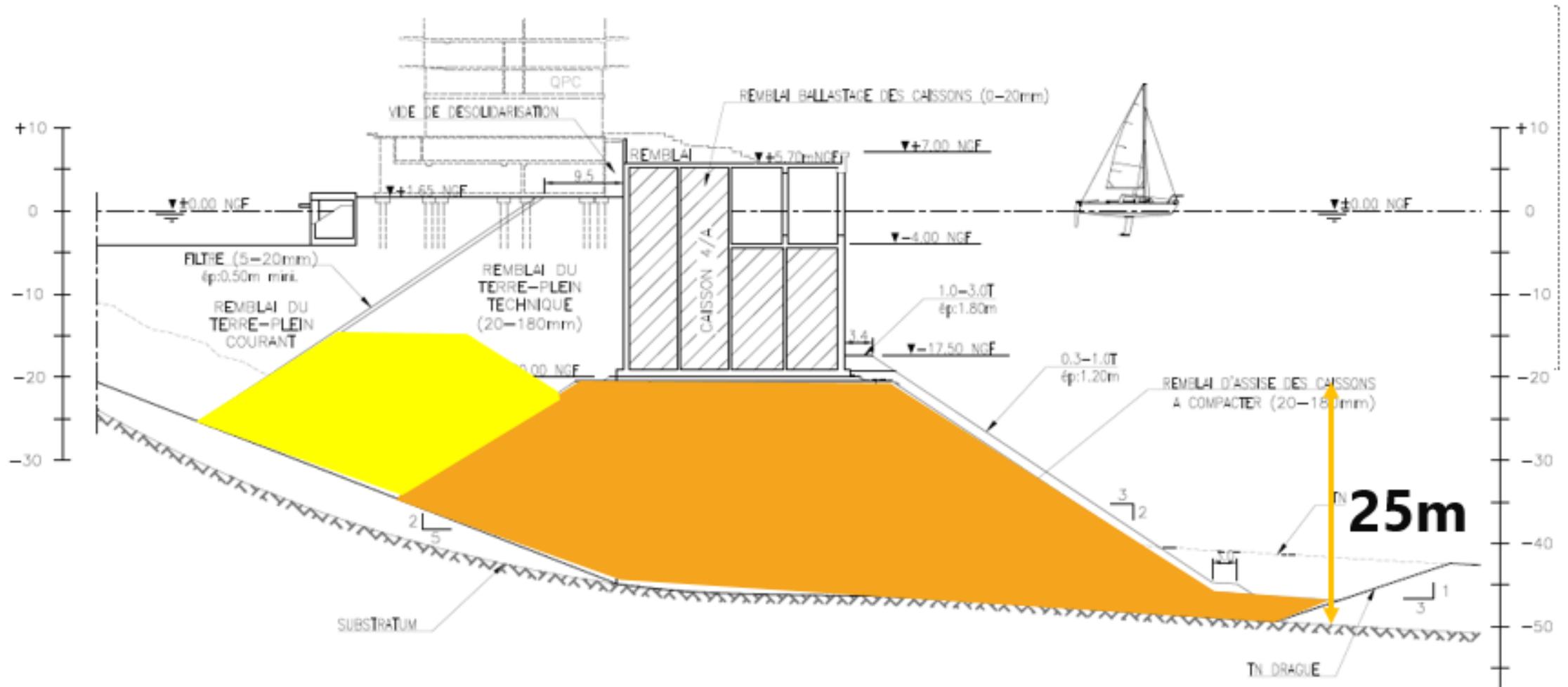
L'AVANCEMENT DES TRAVAUX



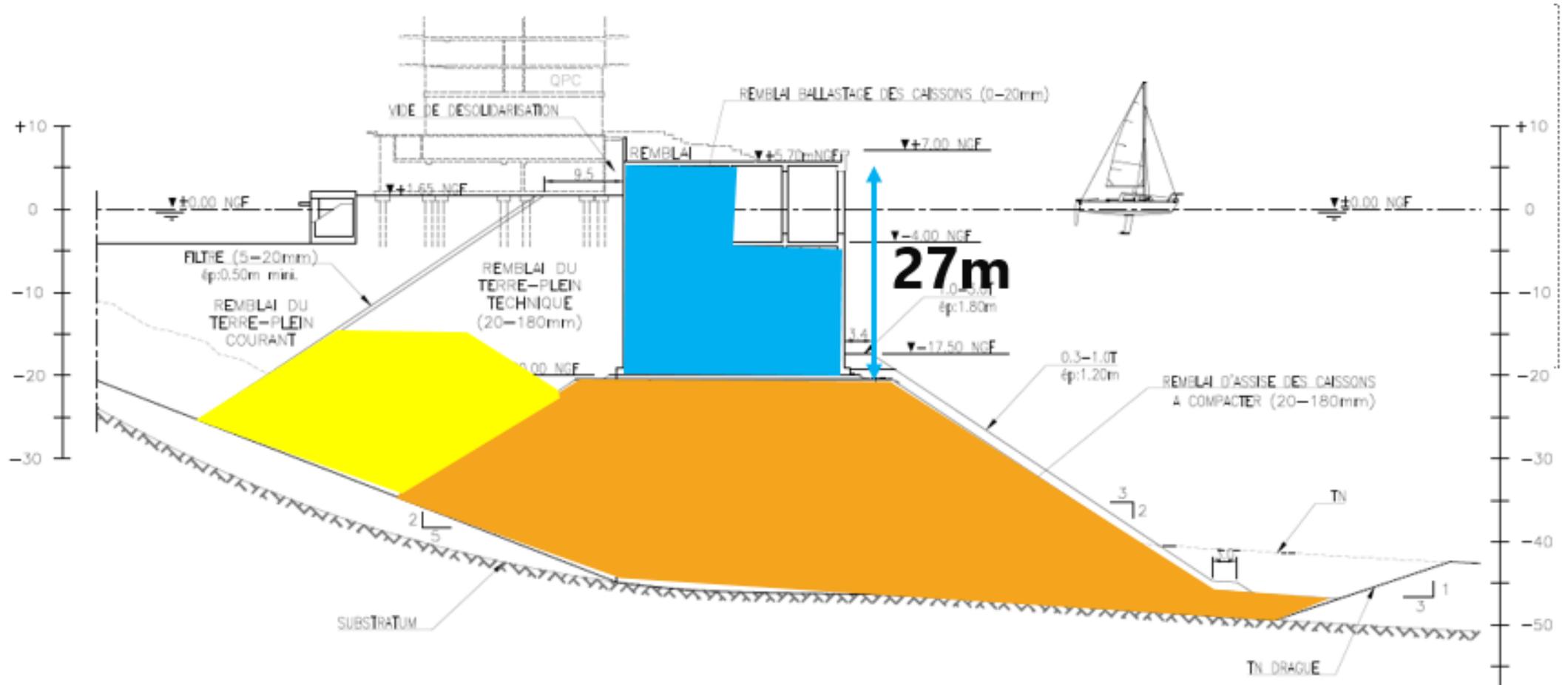
LE PROJET EN QUELQUES IMAGES



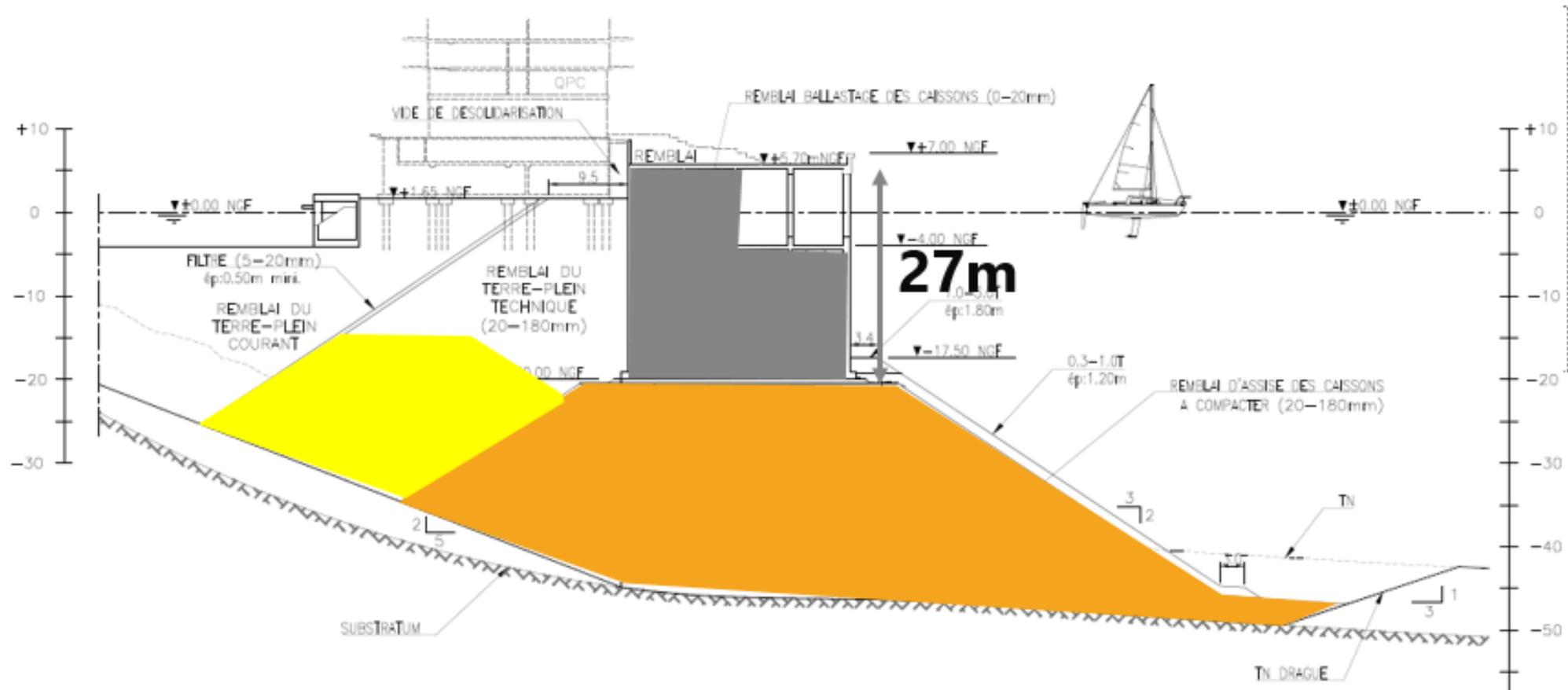
PHASAGE PROJET - REMBLAI D'ASSISE DES CAISSONS



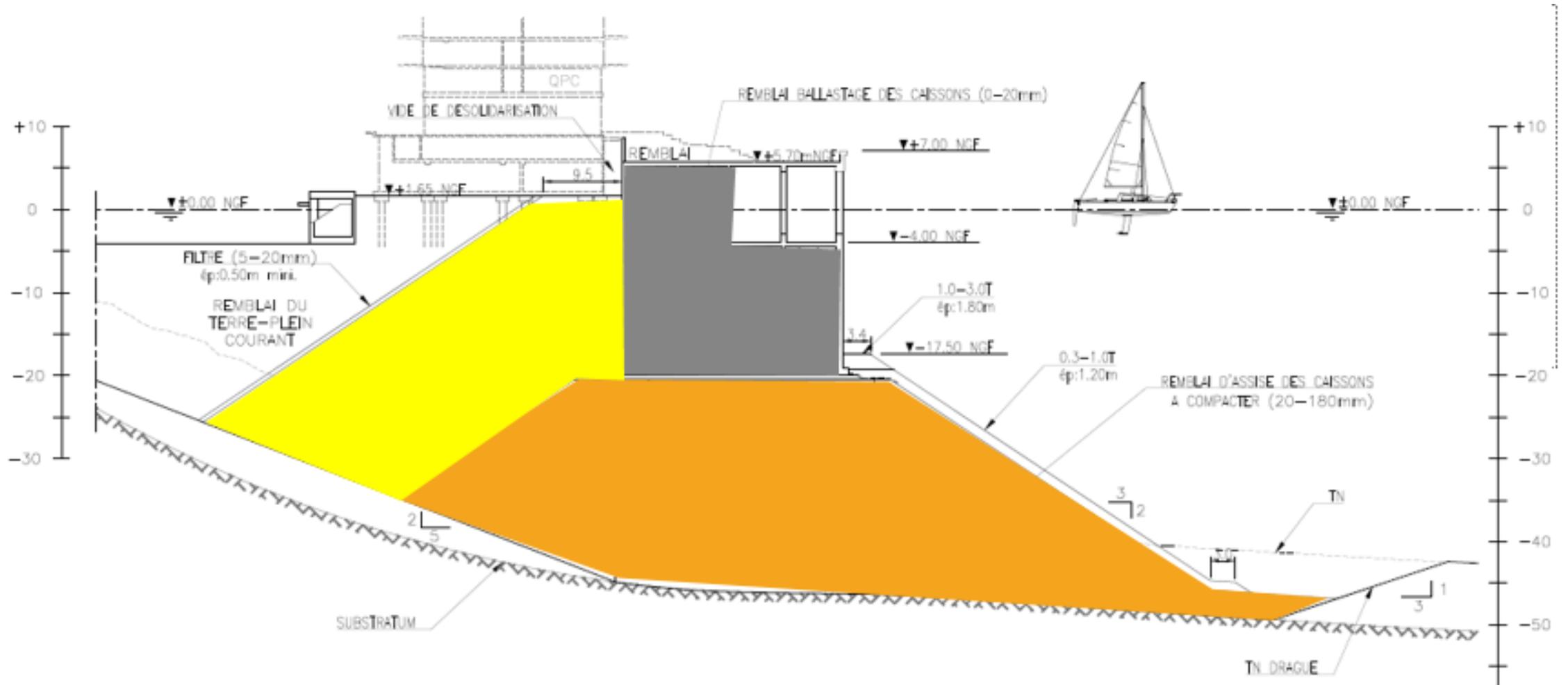
PHASAGE PROJET - POSE DU CAISSON ET BALLASTAGE LIQUIDE



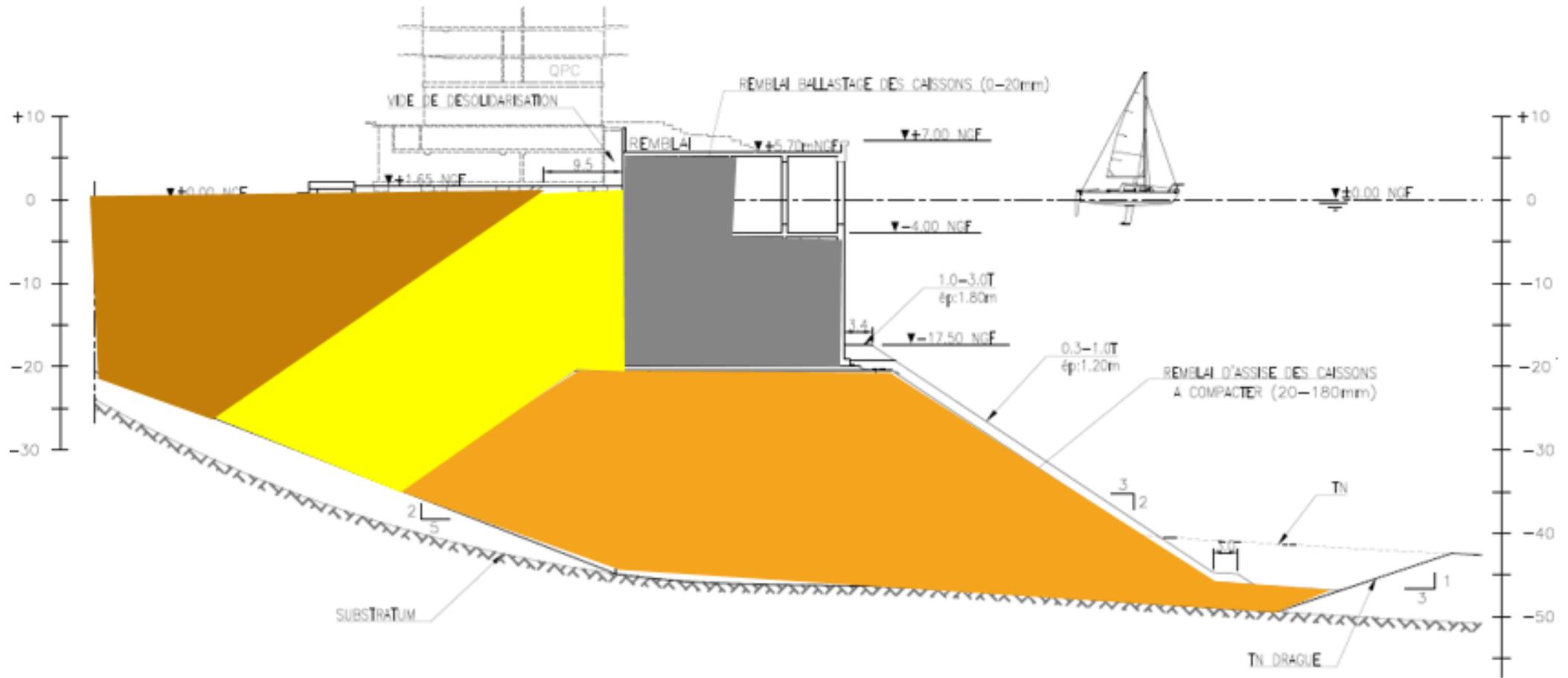
PHASAGE PROJET - BALLASTAGE SOLIDE



PHASAGE PROJET – REMBLAI TECHNIQUE PHASE 2



PHASAGE PROJET – TERRE PLEIN COURANT





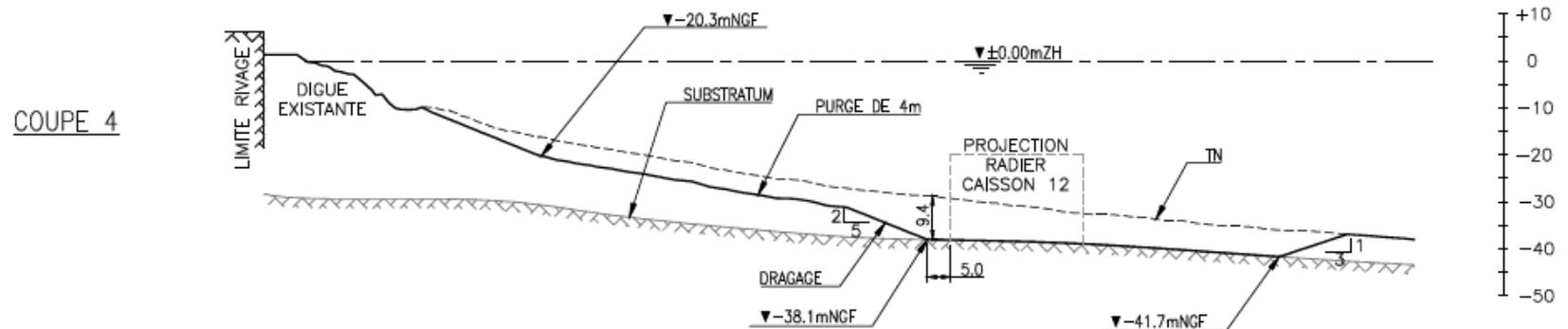
MAÎTRISE DES TASSEMENTS

02.

MAITRISE DES TASSEMENTS - DRAGAGES

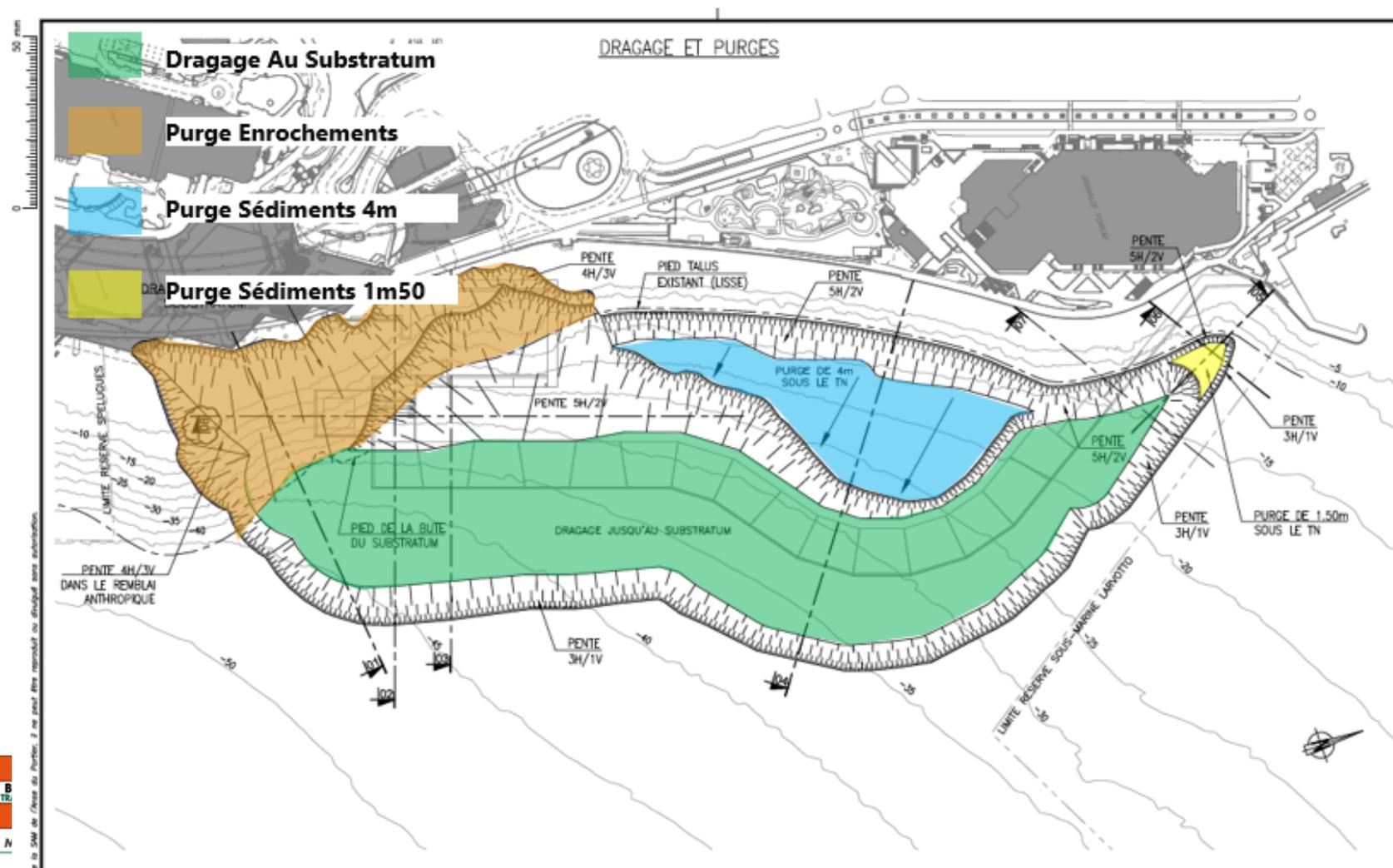
Site contraint

- Evacuation de 50cm à 1m de sédiments pollués sur le site d'Envisan
- Dragage jusqu'au Substratum sous les caissons
- Evacuation des enrochements dans les talus source d'hétérogénéité du comportement du terrain
- Purge de 4m, 1,50m ou sédiments laissés en place
 - choix volontaire : laisser les sédiments en place et limiter les quantités de dragage et traiter le remblai et les sédiments (drains)



MAITRISE DES TASSEMENTS - DRAGAGES

- La recherche du strict nécessaire



MAITRISE DES TASSEMENTS – DRAGAGES

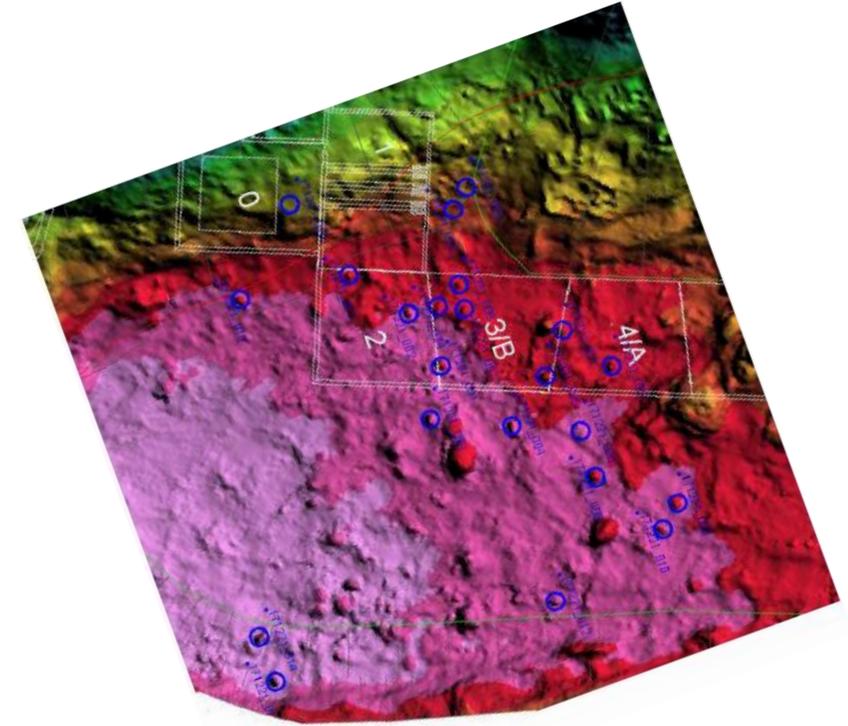
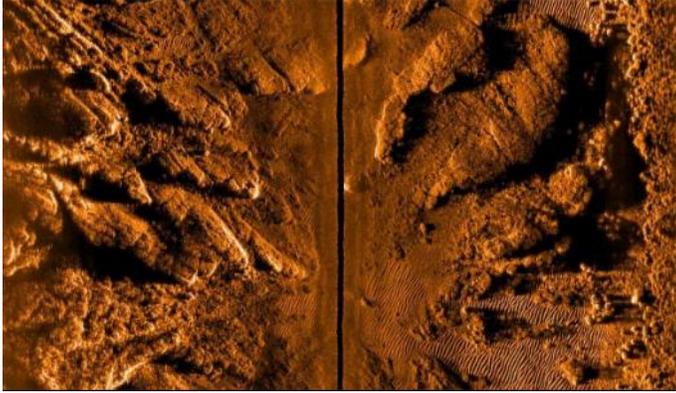


Extraction vases polluées

MAITRISE DES TASSEMENTS - DRAGAGES



MAITRISE DES TASSEMENTS - DRAGAGES



Atteinte des objectifs

- Levés géophysiques au pénétrateur de sédiment :
 - Qualifier l'épaisseur sédimentaire résiduelle
 - Précision 1cm
- Enjeu : valider la fin des dragages et démobiliser la drague
 - Dans les zones de doute, complément aux plongeurs et à la pige
 - S'assurer que les épaisseurs résiduelles ne seront pas préjudiciables à la gestion des tassements

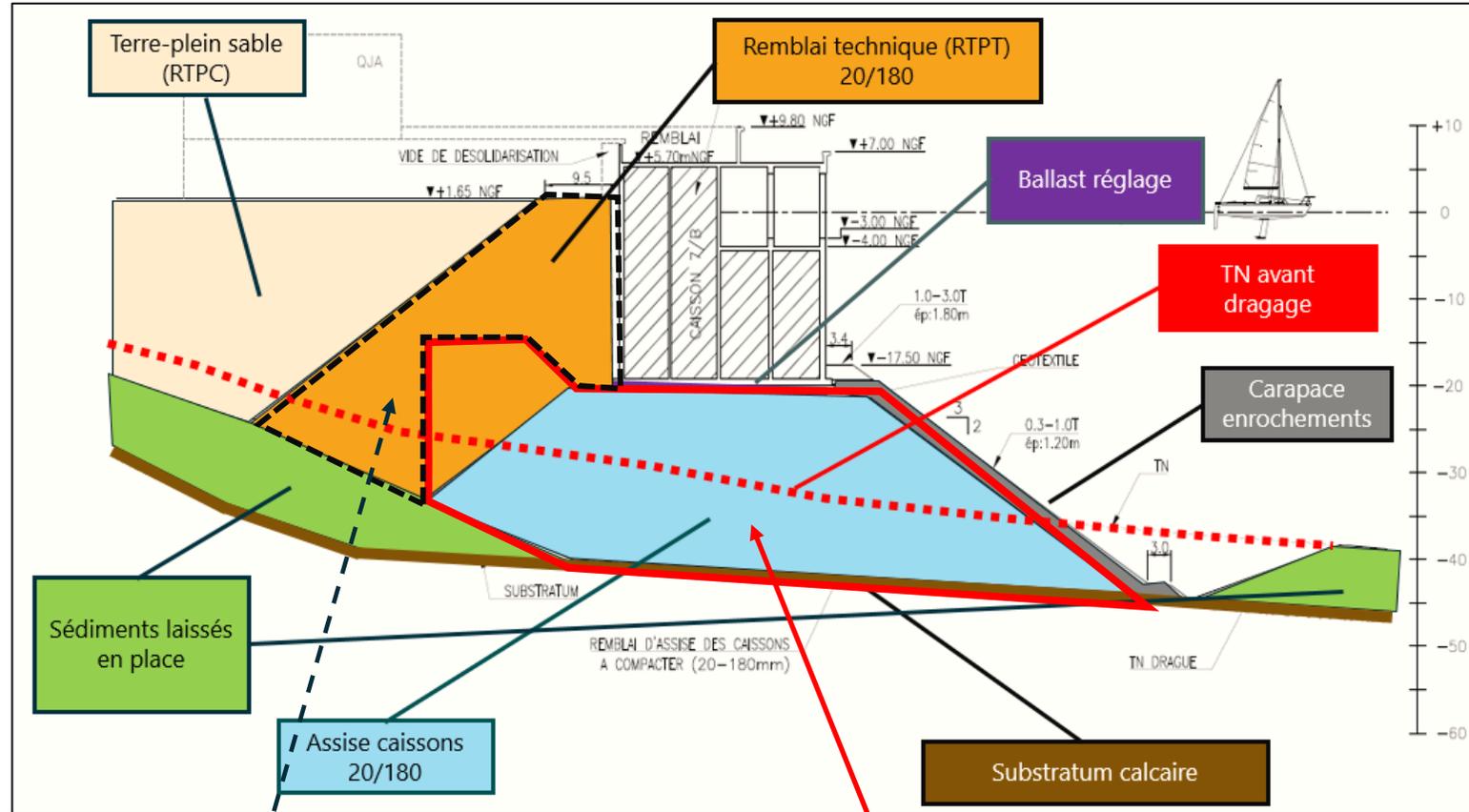
MAITRISE DES TASSEMENTS

VIBRO-COMPACTAGE PAR VOIE MARITIME

Objectif: Densifier RAC ainsi qu'une partie des RTPT afin de respecter les niveaux de tassement cible

3 phases

1. Planche d'essai – Terrestre (tests des mailles et vibreurs)
2. Réalisation d'une planche de convenance sur la zone d'assise des futurs caissons (zone C2-C3 – Confirmation de la maille et méthodologie)
3. Travaux de vibro-compactage par voie maritime



Vibrocompaction terrestre

Vibrocompaction maritime

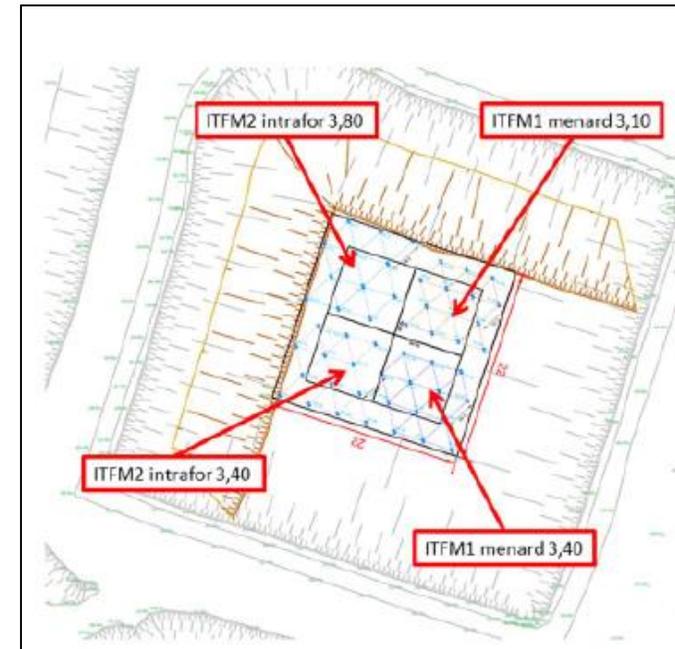
MAITRISE DES TASSEMENTS

■ VIBRO-COMPACTAGE PAR VOIE MARITIME – PLANCHE D'ESSAI

Objectifs de la planche d'essai :

- ✓ Définir les paramètres du vibrocompactage (mailles, type de vibreur, hauteurs de passe, temps de passe, ampérages cible).
- ✓ Caractériser le 20/180 à l'état initial et final
- ✓ Mesurer les tassements post-traitement
- ✓ Caractériser les nuisances sonores et vibratoires

Essai in-situ	Etat initial Avant vibrocompaction	Etat final Après vibrocompaction
Profil sismique réfraction	1	1
CPT	18	41
Essais pressiométrique STAF	3 forages (36 essais)	14 forages (196 essais)
Cross-hole	1 triplet	5 triplets
Relevé 3D (scan)	3	5
Extensomètre	1 (pose et suivi)	5 relevés



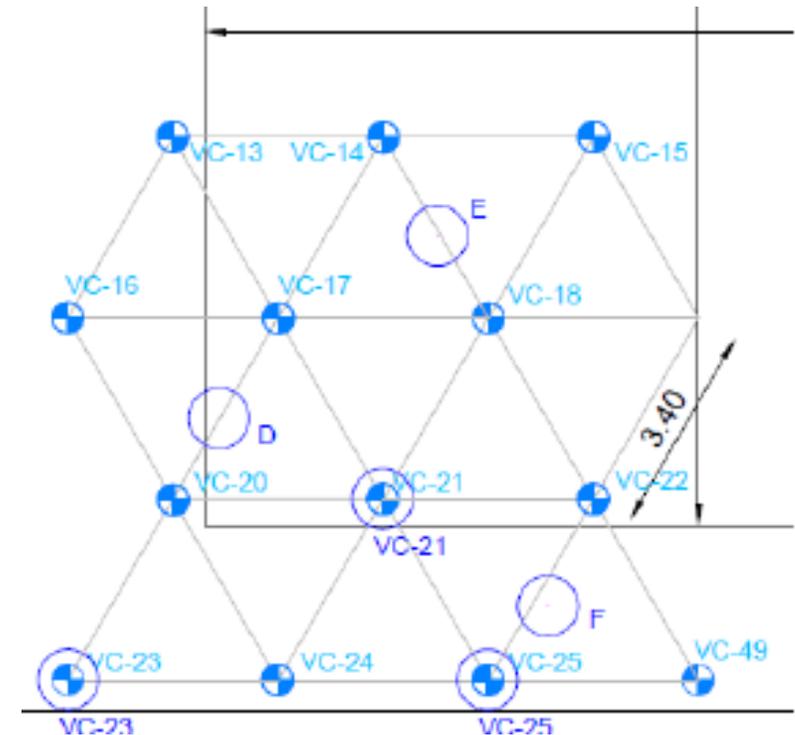
MAITRISE DES TASSEMENTS

■ VIBRO-COMPACTAGE PAR VOIE MARITIME – PLANCHE D'ESSAI

Différents essais ont permis de déterminer les **paramètres de vibrocompaction** répondant aux critères demandés :

- ✓ $E_m \geq 17,5$ MPa
- ✓ $\Phi' \geq 46^\circ$ (mesure en laboratoire – essai triaxial)

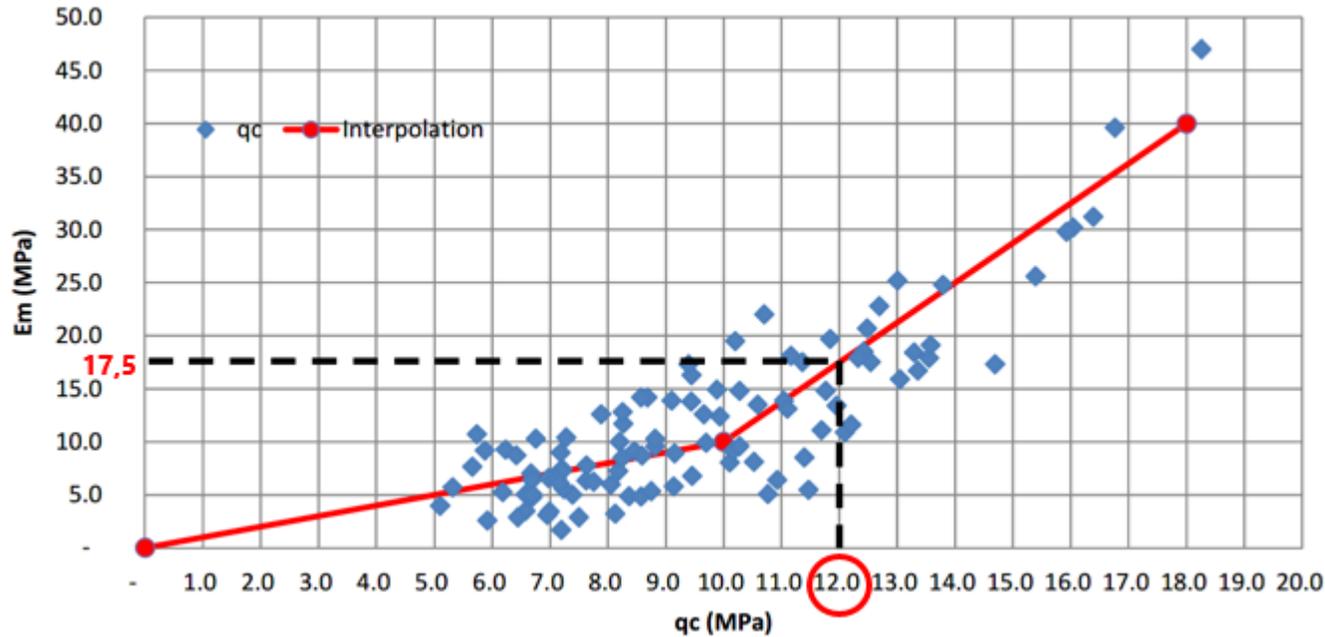
Paramètres	Valeurs
Maille	Triangulaire de 3,4 m
Hauteur de passe	70 cm
Critère de remontée	Ampérage cible : 290 A Ou Temps de passe : <ul style="list-style-type: none"> • 50 sec pour des profondeurs inférieures à 8 m • 30 sec pour des profondeurs supérieures à 8 m



MAITRISE DES TASSEMENTS

VIBRO-COMPACTAGE PAR VOIE MARITIME – PLANCHE D'ESSAI

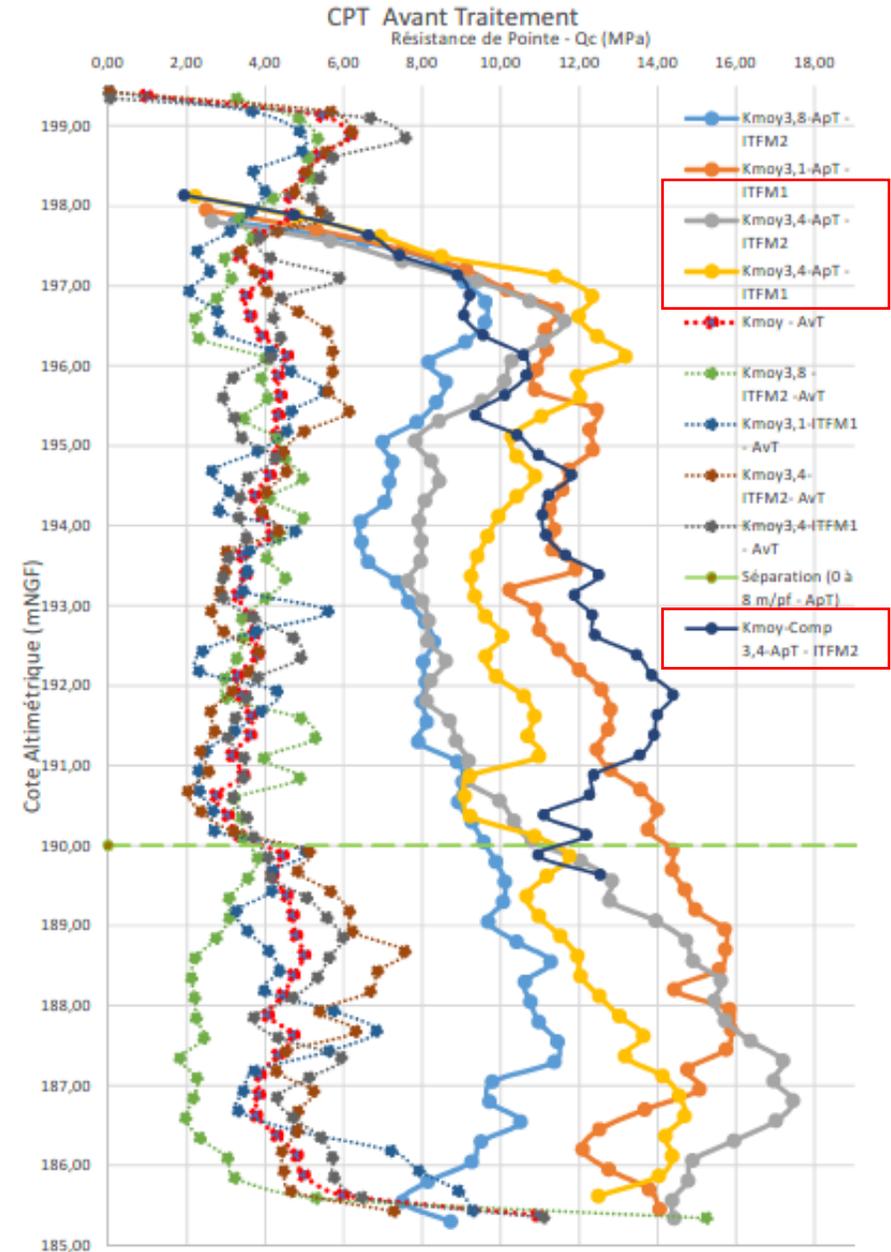
Caractéristiques du 20/180 à l'état initial et final



Corrélation post-traitement entre Em et qc

$$E_m = q_c \text{ si } q_c < 10 \text{ MPa}$$

$$E_m = 3.75 \times q_c - 27.5 \text{ au-delà.}$$



MAITRISE DES TASSEMENTS

VIBRO-COMPACTAGE PAR VOIE MARITIME – PLANCHE D'ESSAI

Lien direct entre la résistance de pointe CPT « q_c » et l'énergie volumique mise en oeuvre

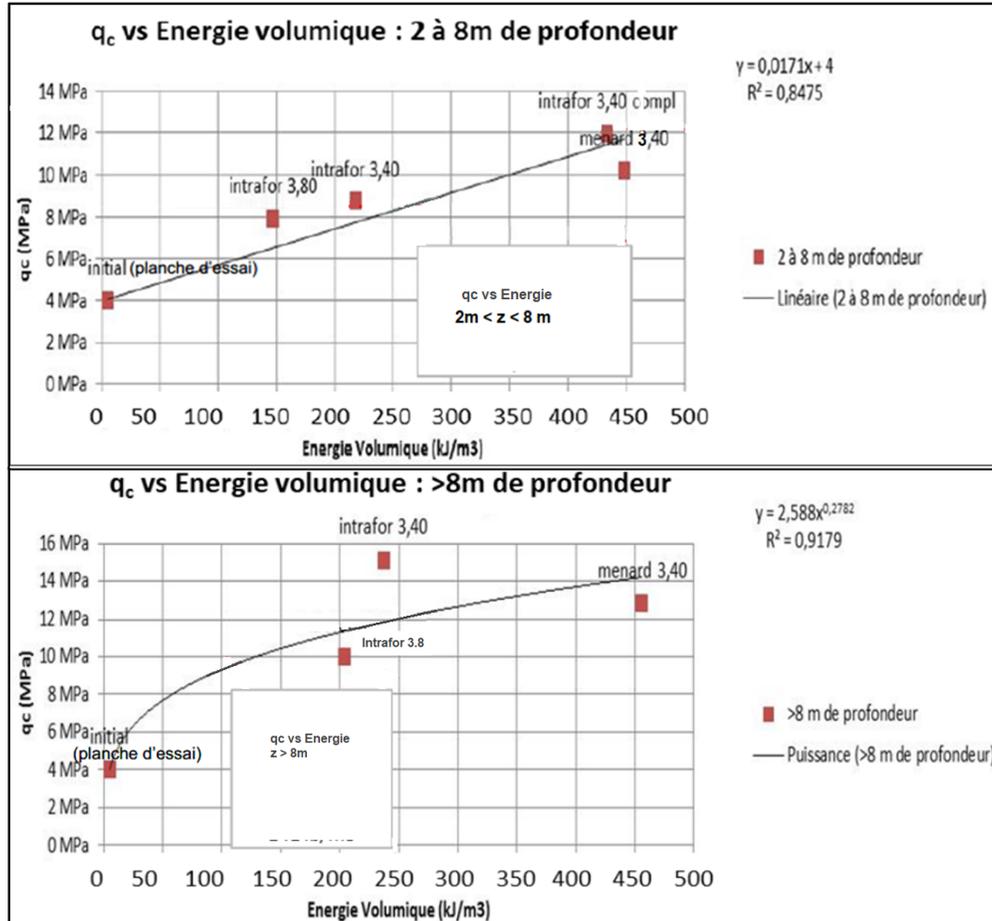
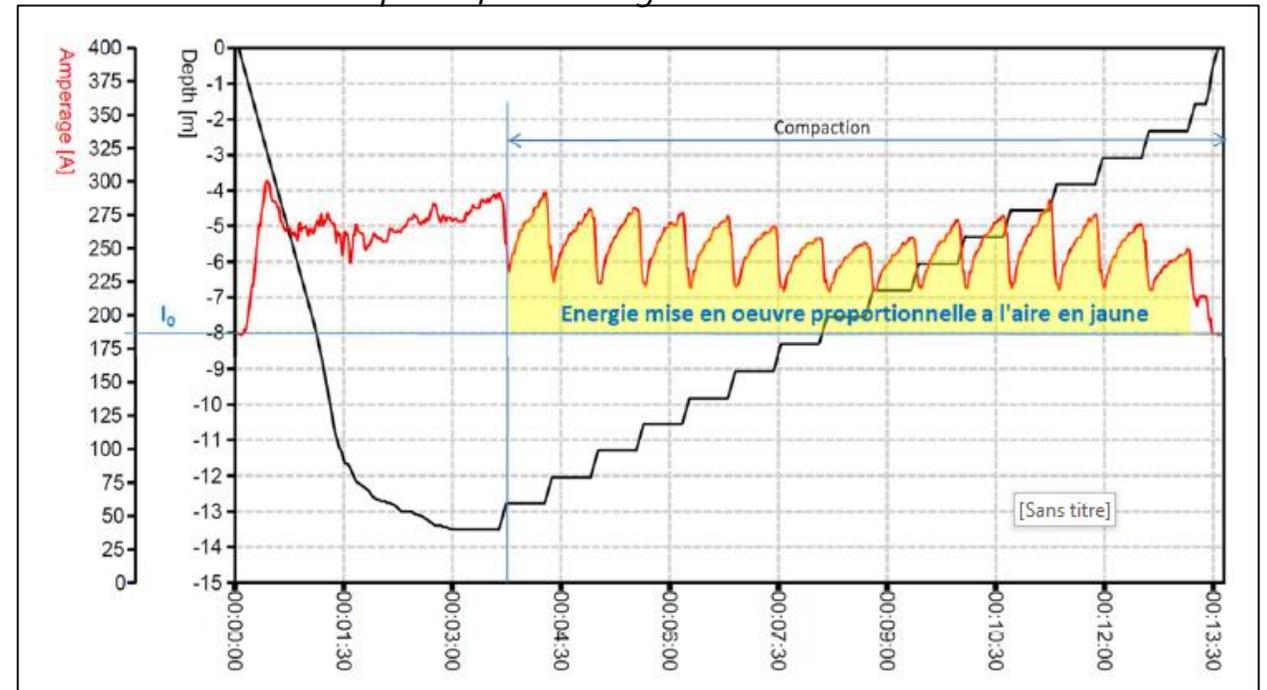


Schéma explicatif de l'énergie mise en oeuvre

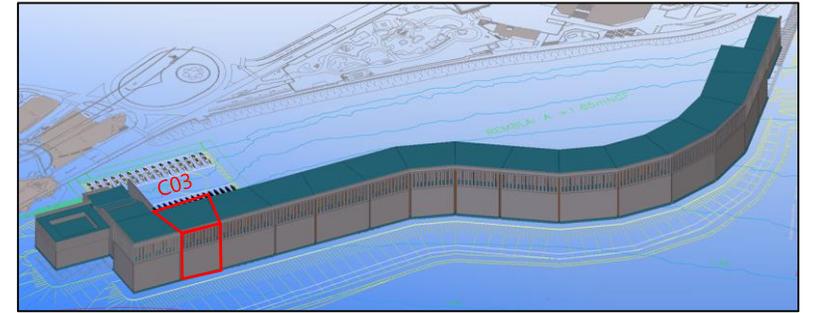


MAITRISE DES TASSEMENTS

■ VIBRO-COMPACTAGE - PLANCHE DE CONVENANCE

Objectifs de la planche de convenance :

- ✓ Confirmer les paramètres du vibrocompactage (mailles, type de vibreur, hauteurs de passe, temps de passe, ampérages cible).
- ✓ Confirmer la densité relative initiale Dr_0 avant vibrocompactation
- ✓ Mesurer les tassements post-traitement



Réalisation de 5 CPT à l'aide d'un bati sous-marin de 22 tonnes (MANTA)

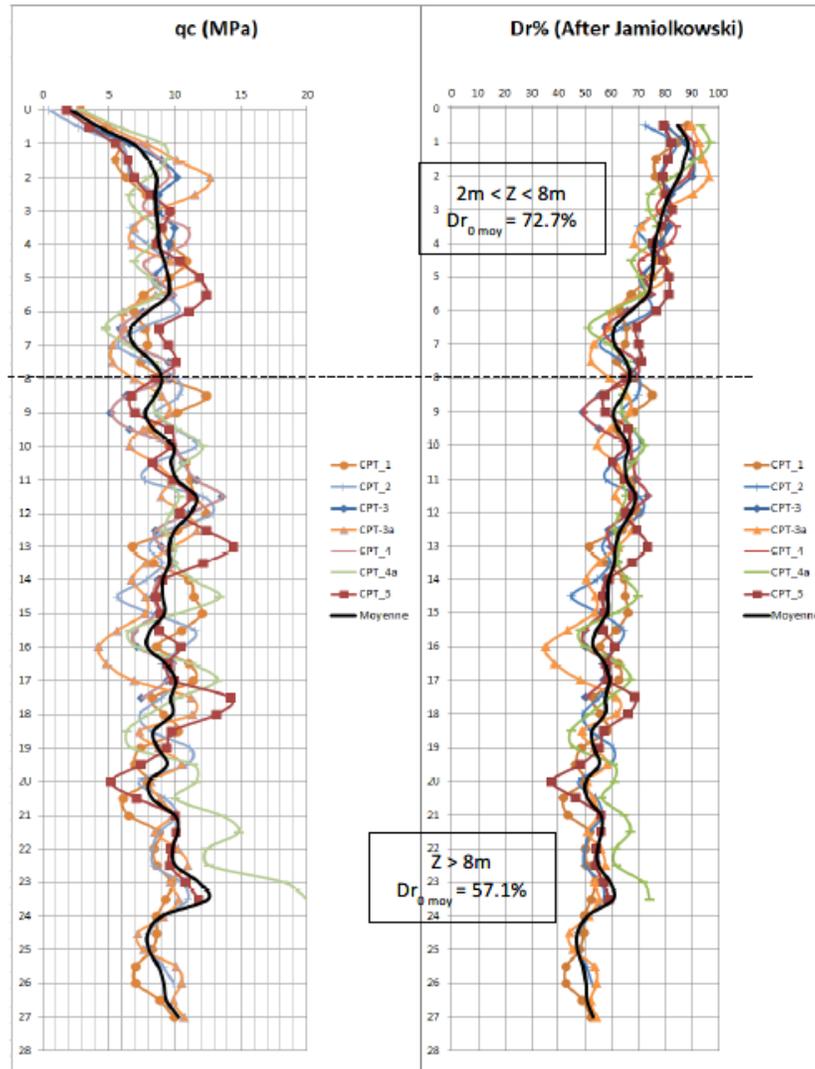
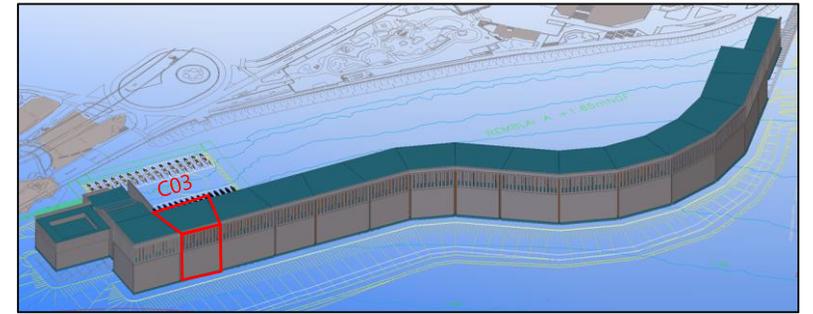


MANTA-200 (configuration 22 tonnes)

MAITRISE DES TASSEMENTS

VIBRO-COMPACTAGE - PLANCHE DE CONVENANCE

Densité relative initiale Dr_0 avant vibrocompaction

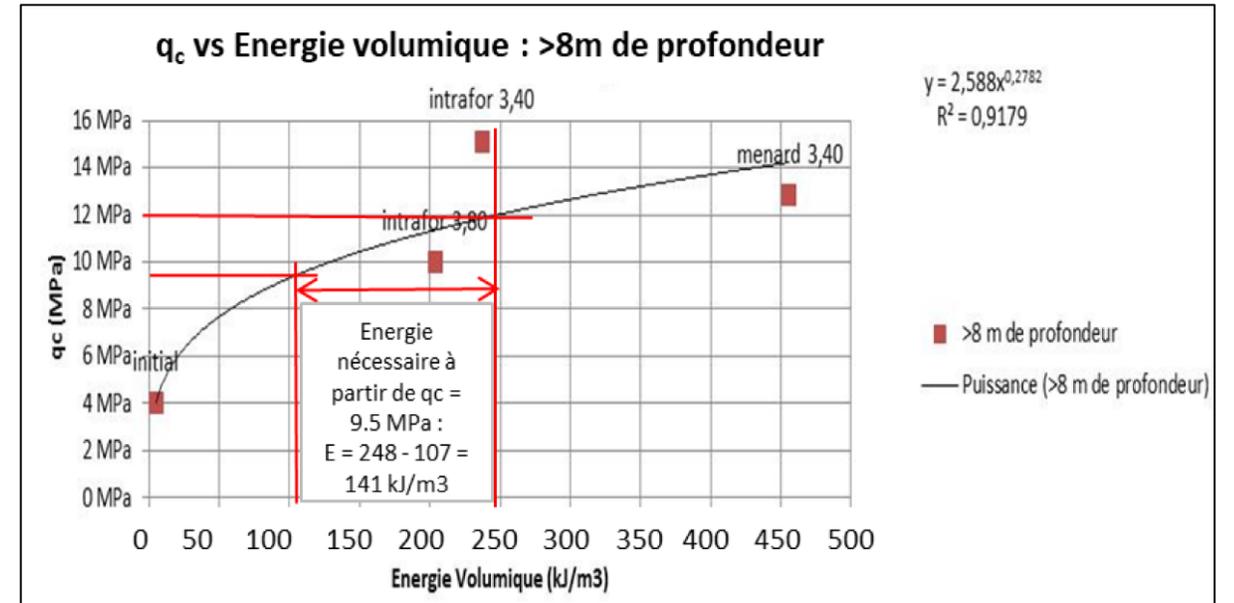
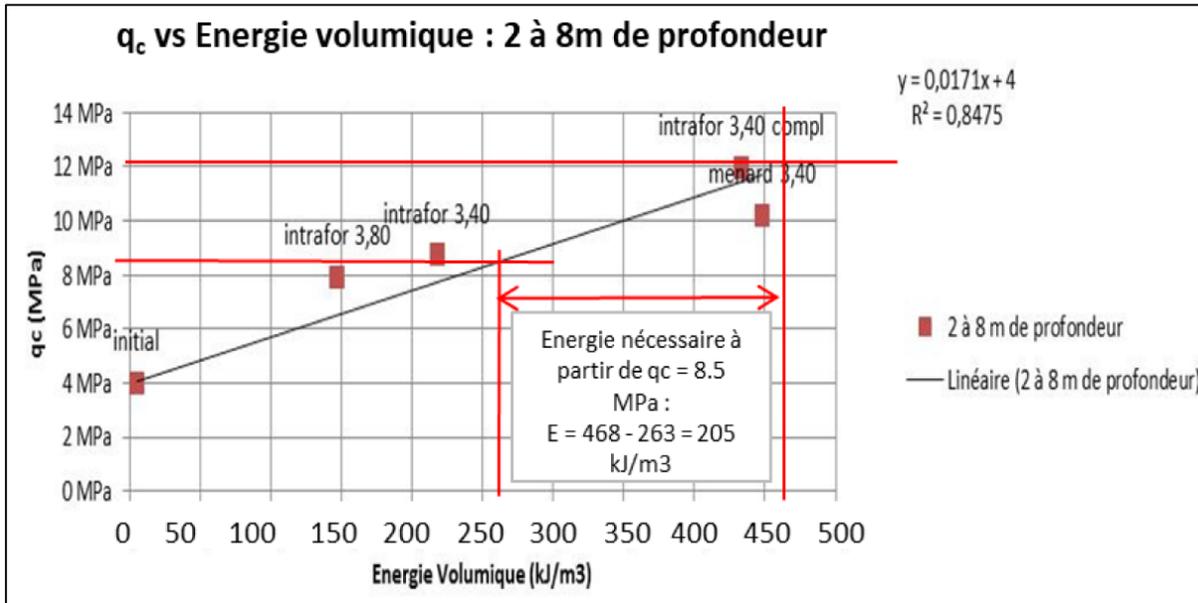
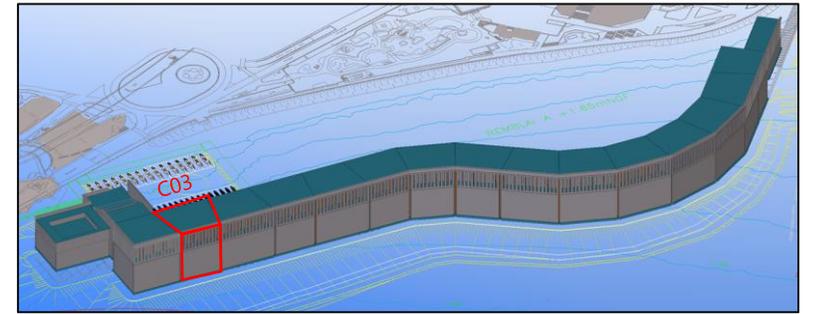


Paramètres avant traitement	Planche de convenance	Planche d'essai
qc (MPa)	8,5 MPa (2 à 8 m de profondeur) 9,5 MPa (Profondeur > 8 m)	4 MPa
Dr (%) <i>*Jamiolkowski 1985</i>	Dr ₀ = 72,7% (2m < z < 8 m) Dr ₀ = 57,1% (z > 8 m) (Dro moyen = 61%)	45,4 %

MAITRISE DES TASSEMENTS

VIBRO-COMPACTAGE - PLANCHE DE CONVENANCE

Optimisation de l'énergie à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs



Maille	Espacement	Voltage (V)	Ampérage a vide I ₀ (A)	I _{max} (A)	Temps (s)	Hauteur Passe (m)	Energie maxi théorique	E/E _{max}	Energie moyenne réalisée
M ₀ (q _{c0} =4 MPa, Dr ₀ =50.0%)	3.4	440	185	290	50	0.70	456.7	95%	434
M _{opt2-8} (q _{c0} =9.5 MPa, Dr ₀ =72.7%)	3.8	440	185	290	40	0.70	292.5	85%	249

Maille	Espacement	Voltage (V)	Ampérage a vide I ₀ (A)	I _{max} (A)	Temps (s)	Hauteur Passe (m)	Energie maxi théorique	E/E _{max}	Energie moyenne réalisée
M ₀ (q _{c0} =4 MPa, Dr ₀ =41.5%)	3.4	440	185	290	30	0.70	274.0	86%	236
M _{opt8+} (q _{c0} =9.5 MPa, Dr ₀ =57.1%)	3.8	440	185	290	30	0.70	219.4	85%	186

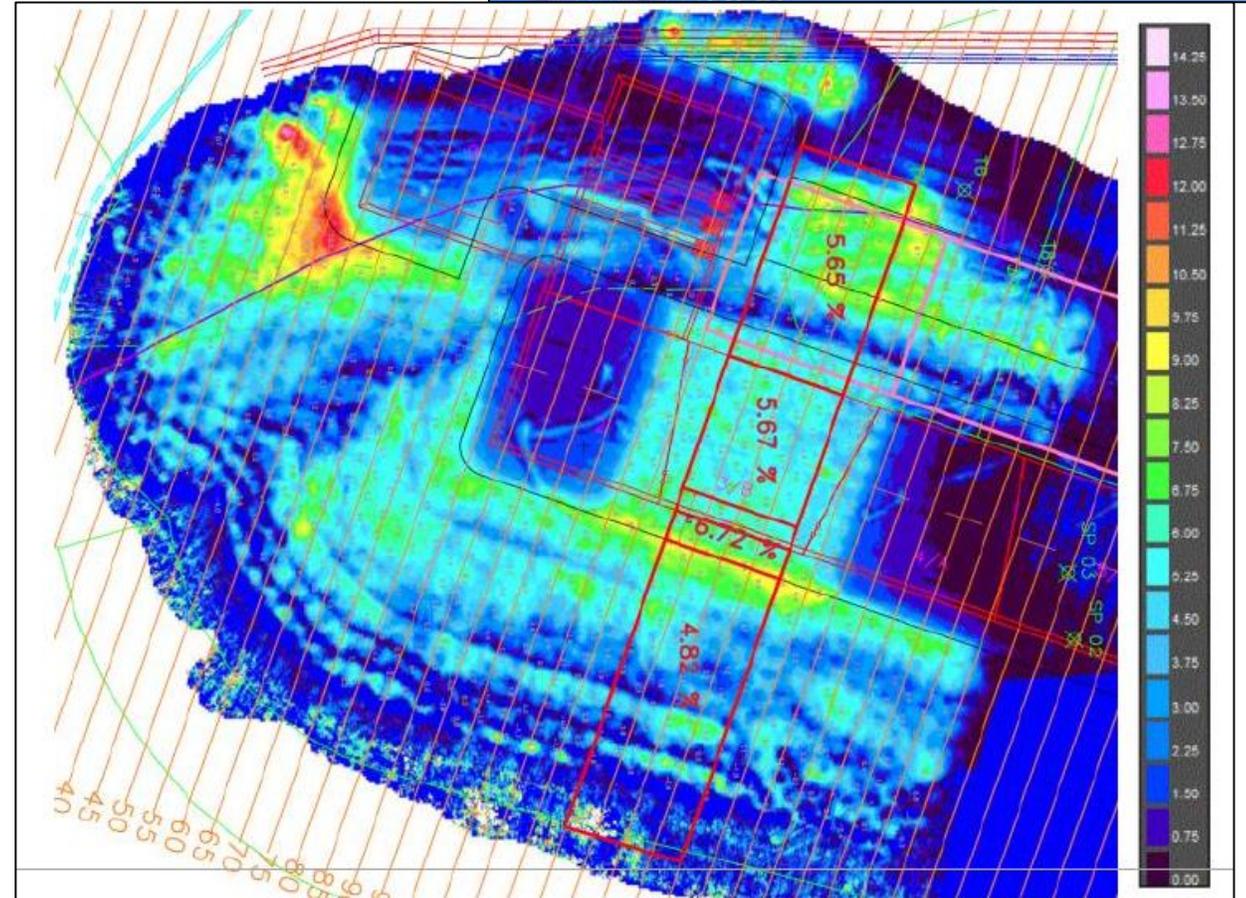
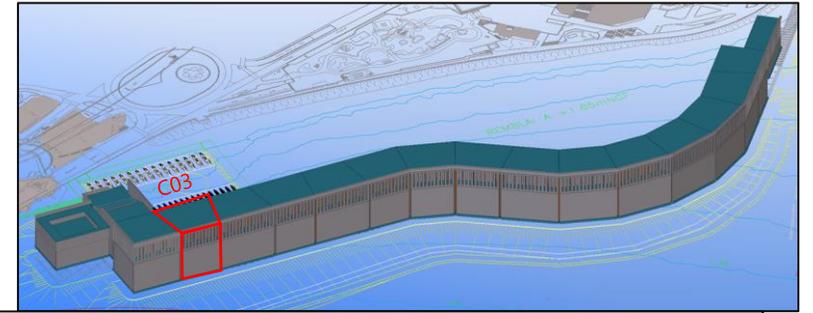
MAITRISE DES TASSEMENTS

■ VIBRO-COMPACTAGE - PLANCHE DE CONVENANCE

Estimation des tassements selon la densité relative :

- ✓ Dr_0 (moyenne) avant vibrocompactage = 61%
- ✓ Dr_{finale} (moyenne) après vibrocompactage = 74%

=> Tassement objectif de 5,8%



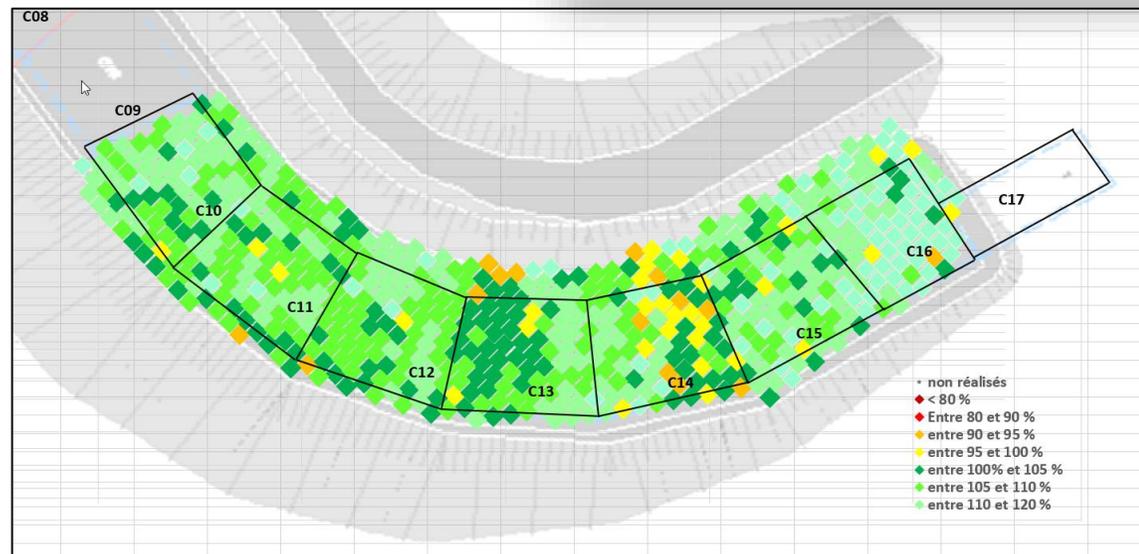
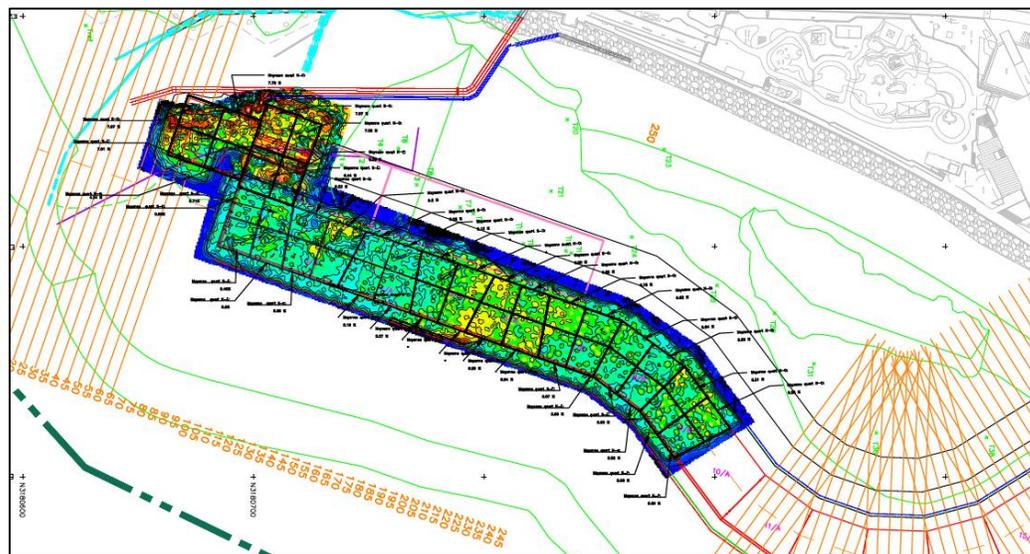
=> Tassement observé par bathymétrie (sous caisson) : 5,67 %

MAITRISE DES TASSEMENTS

■ VIBRO-COMPACTAGE – TRAVAUX MARITIME

Réception des travaux de vibro-compactage selon 2 critères :

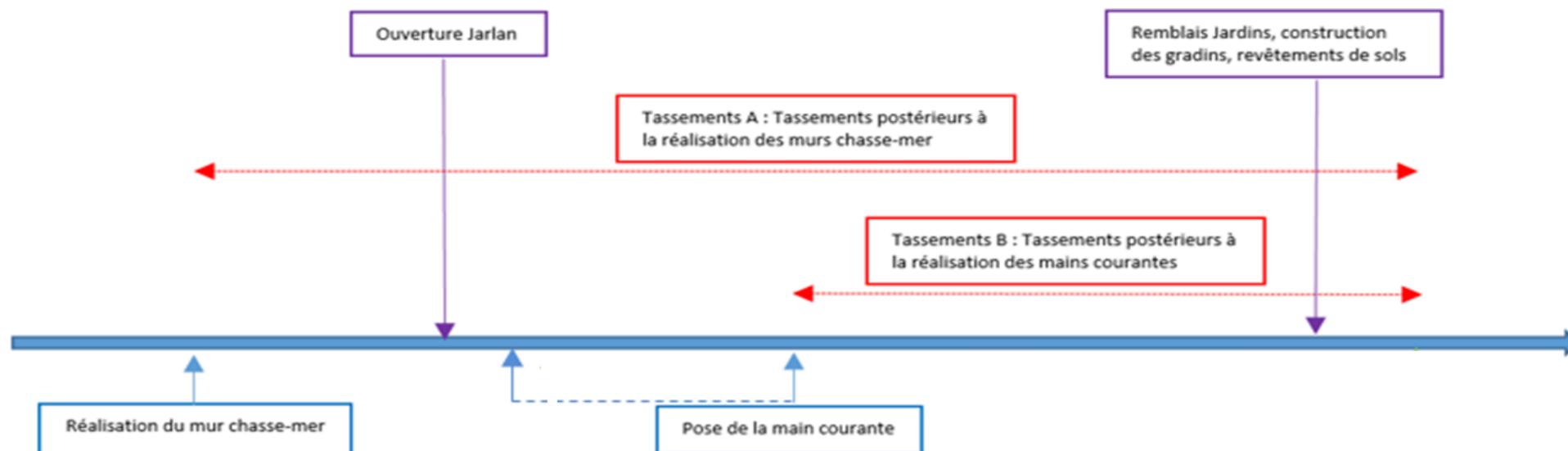
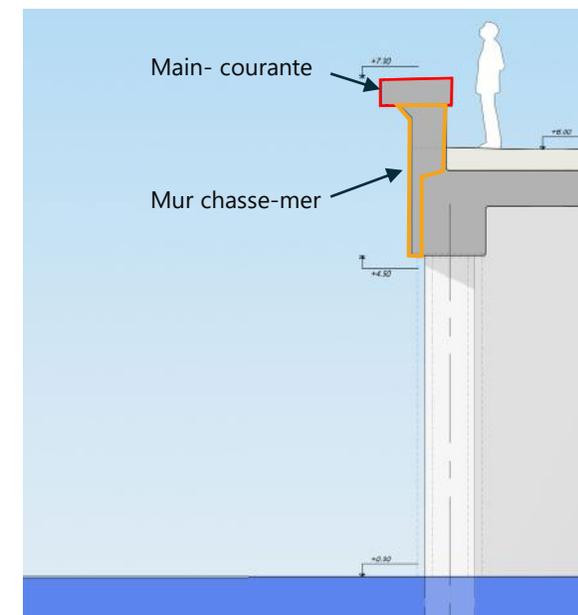
- ✓ Tassement mesuré par bathymétrie : Objectif de tassement de 5,8% (+/- tolérance)
- ✓ Analyse énergétique de l'assise du caisson



MAITRISE DES TASSEMENTS

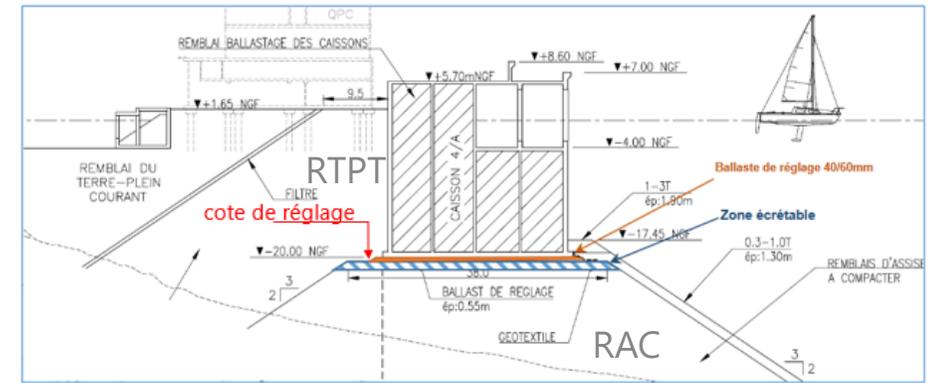
LES CRITÈRES DE TASSEMENT POUR CAISSONS

	Après pose du mur chasse mer Tassement A	Après pose de la main courante Tassement B
Tassements absolus	≤ 30mm	≤ 20mm
Tassements différentiels entre caissons successifs	< 10mm	< 10mm
Décalage de magistrale entre caissons successifs	≤ 10mm (≤ 5mm dans la partie droite de la promenade)	< 10mm (≤ 5mm dans la partie droite de la promenade)

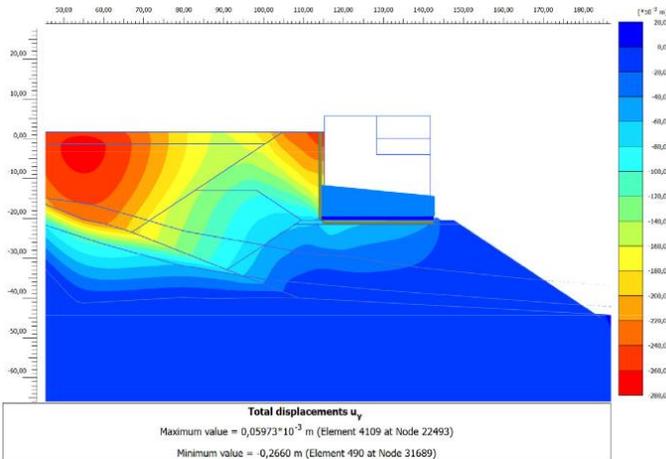


MAITRISE DES TASSEMENTS

■ DÉTERMINATION DE LA COTE DE RÉGLAGE DE L'ASSISE DES CAISSONS



Etape 1
Calcul des tassements –
Modèle 2D par caisson



Etape 2 :
Intégration des tolérances de
réalisation

Sur le nivellement de l'assise de
+/- 5cm

Sur la réalisation des structures
de caisson : +/- 2cm

Etape 3
Compensation possible
d'altimétrie au niveau des
superstructures des caissons

Coté terre : +5cm / -15 cm
Coté mer: +10cm / -10 cm

Côte de réglage
d'assise compatible
avec la
compensation
d'altimétrie au
niveau des
superstructures

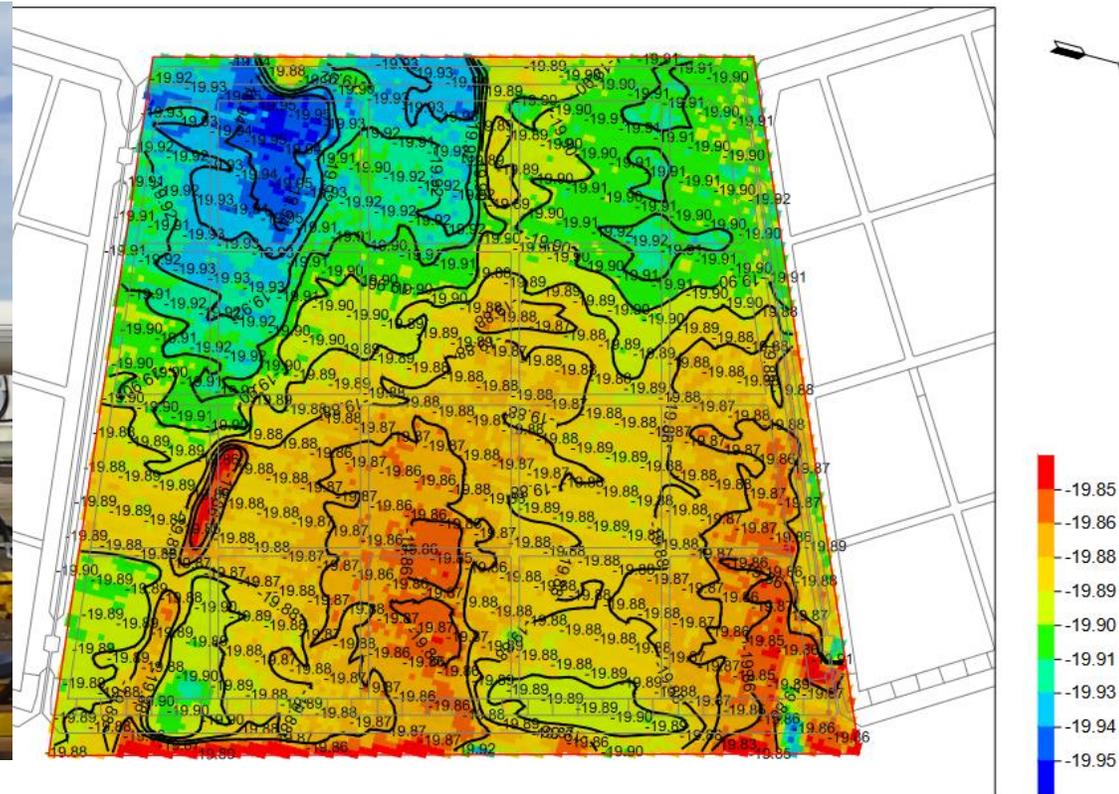


MAITRISE DES TASSEMENTS

■ DÉTERMINATION DE LA COTE DE RÉGLAGE DE L'ASSISE DES CAISSONS



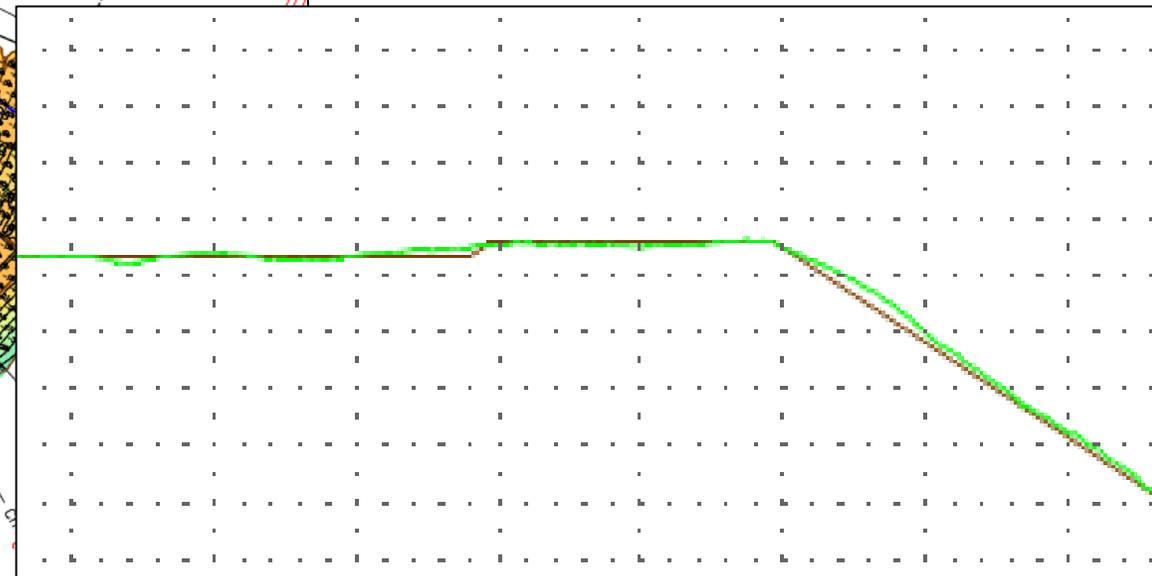
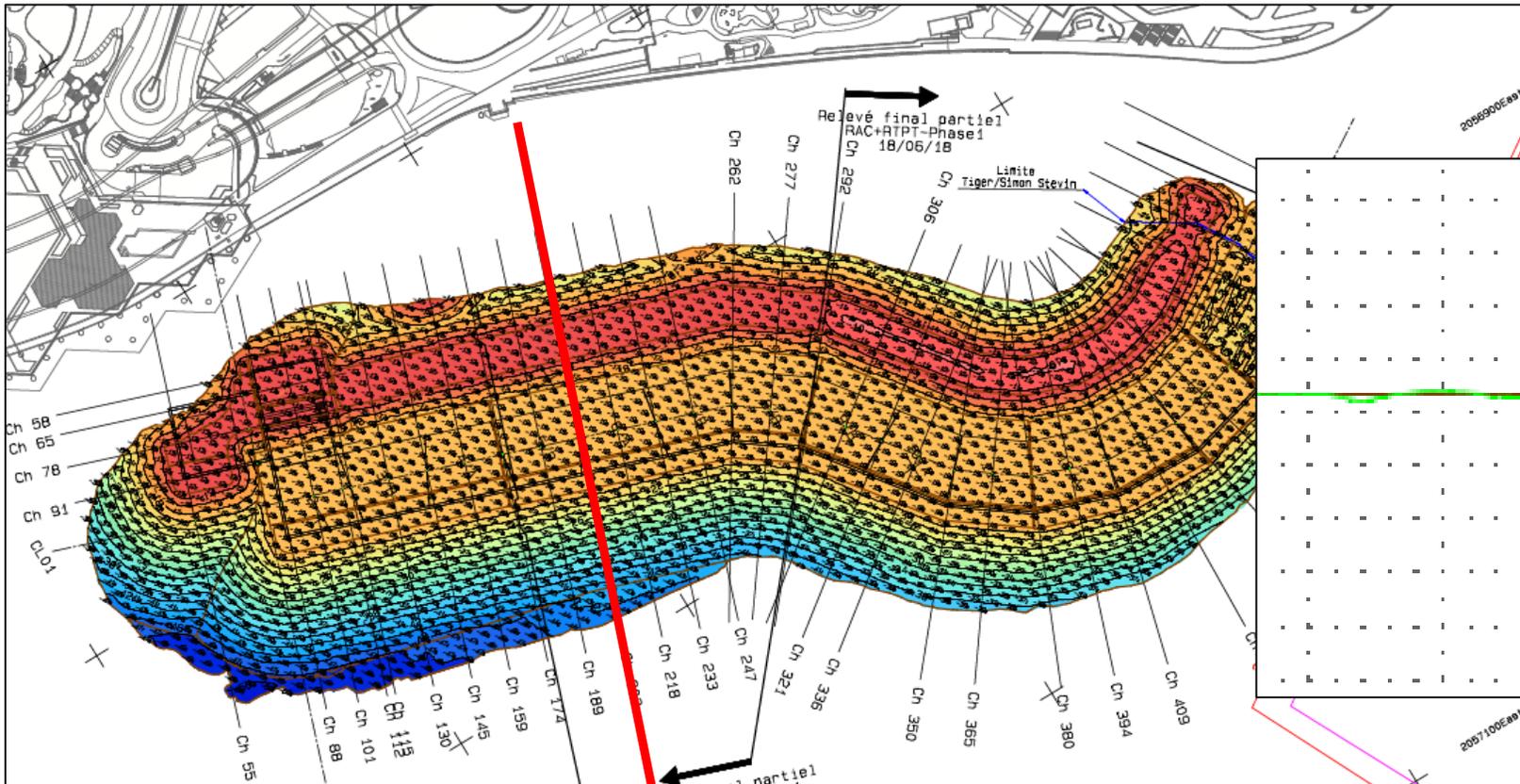
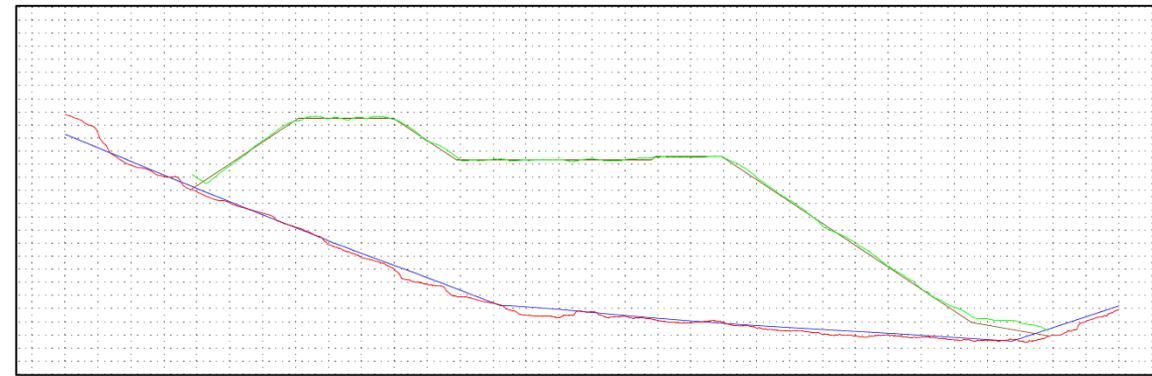
Essai à terre du niveleur sur 20/40



Réception par bathymétrie

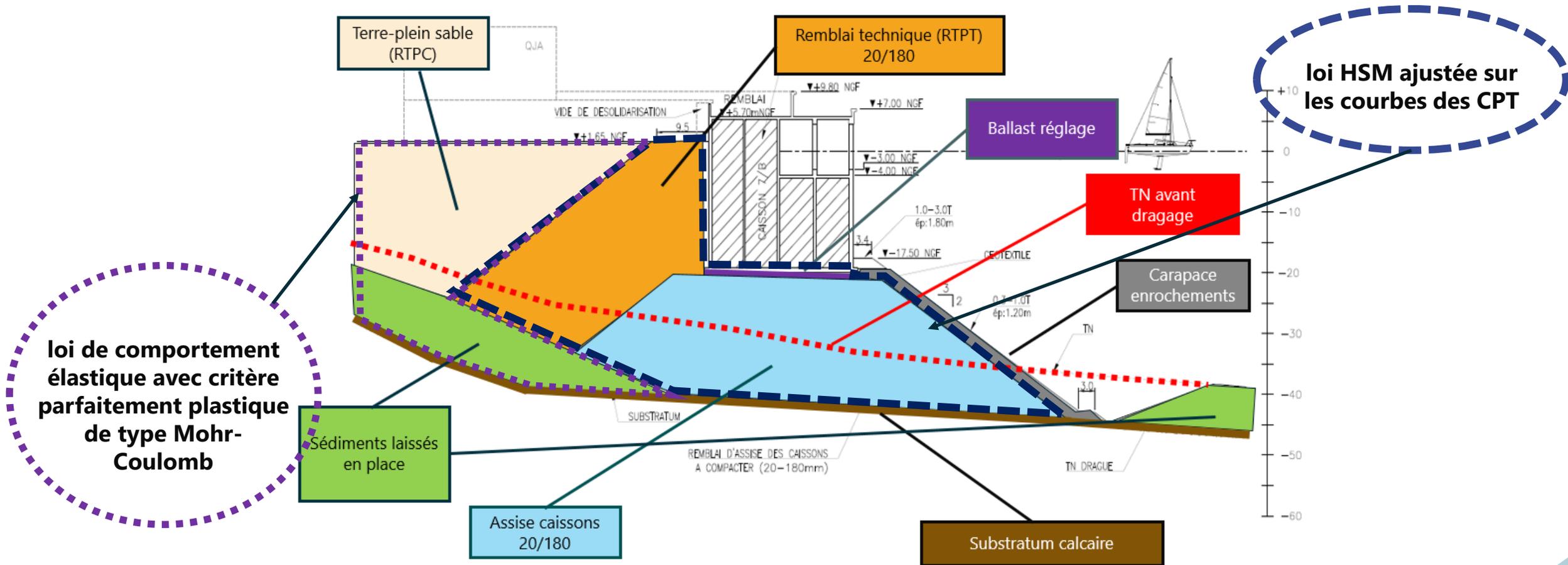
MAITRISE DES TASSEMENTS

■ DÉTERMINATION DE LA COTE DE RÉGLAGE DE L'ASSISE DES CAISSONS



MAITRISE DES TASSEMENTS

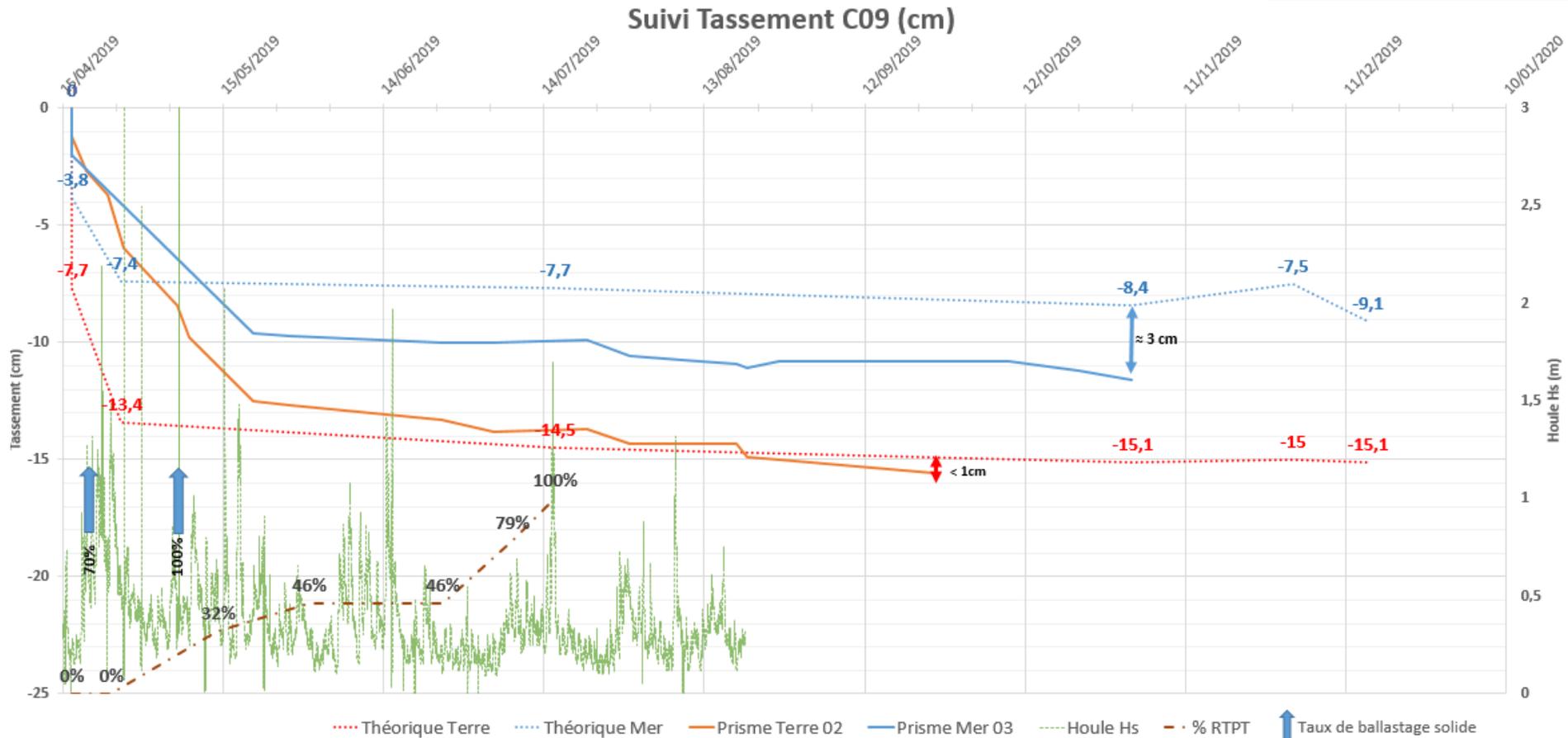
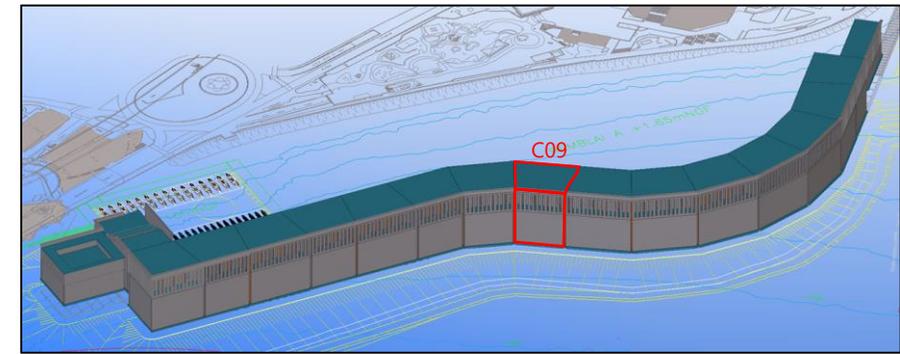
■ DÉTERMINATION DE LA COTE DE RÉGLAGE DE L'ASSISE DES CAISSONS



MAITRISE DES TASSEMENTS

■ SUIVI DES TASSEMENTS SOUS CAISSONS

Comparaison des tassements calculés / mesurés
(exemple du caisson C09 => Hauteur du remblai > 30 m)



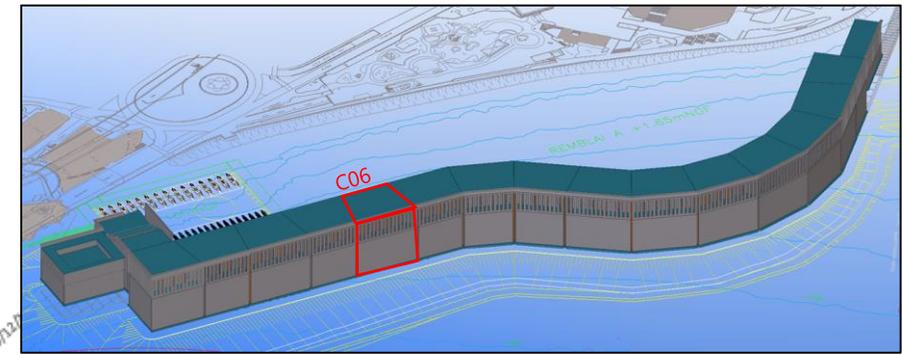
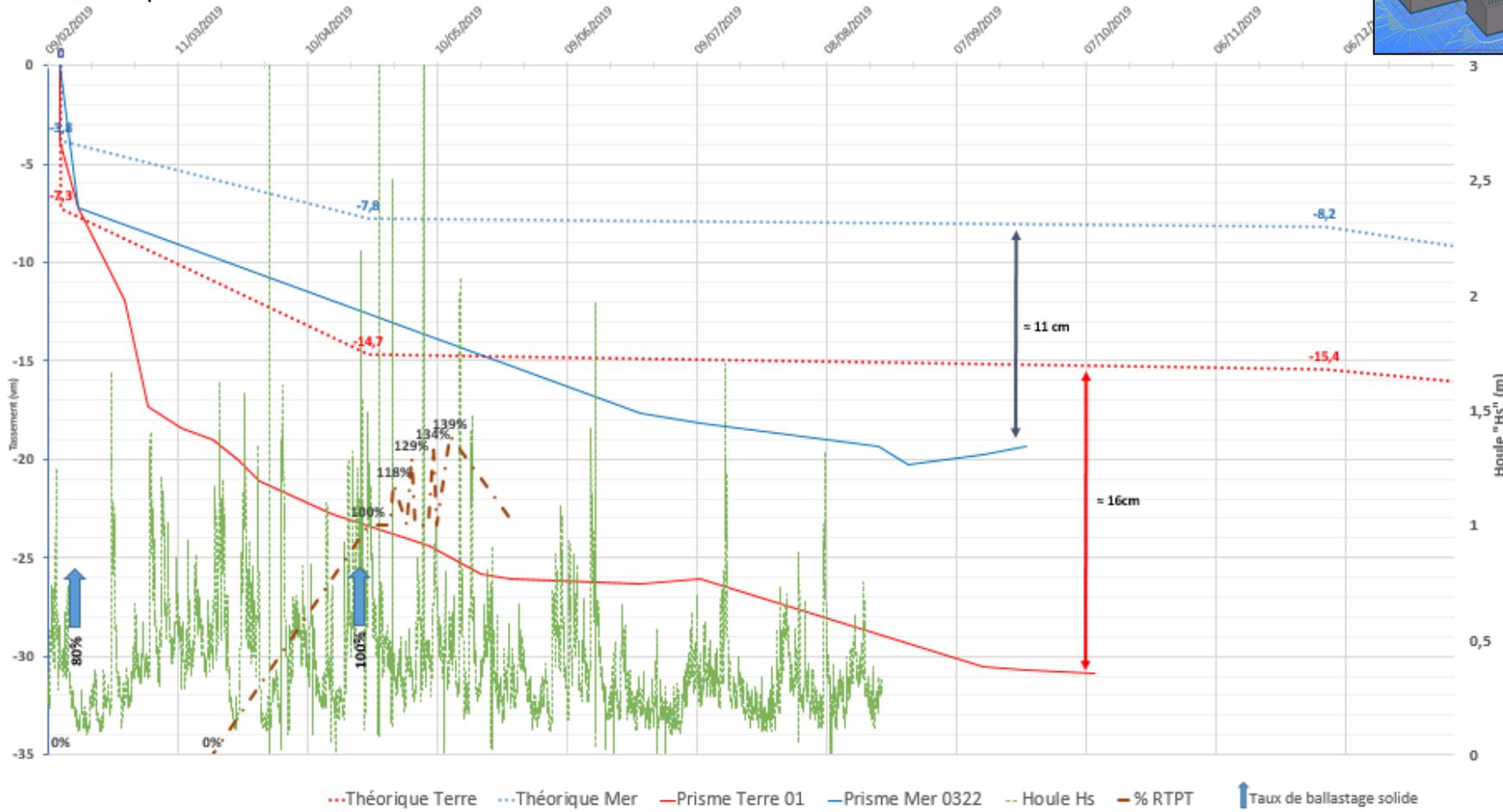
- ✓ Bonne cohérence sur la répartition des tassements terre/mer
- ✓ Ecart tassements calculés / mesurés de l'ordre de 1 à 3 cm

MAITRISE DES TASSEMENTS

SUIVI DES TASSEMENTS SOUS CAISSONS

Comparaison des tassements calculés / mesurés
(exemple du caisson C06)

Suivi tassement C06 (cm)

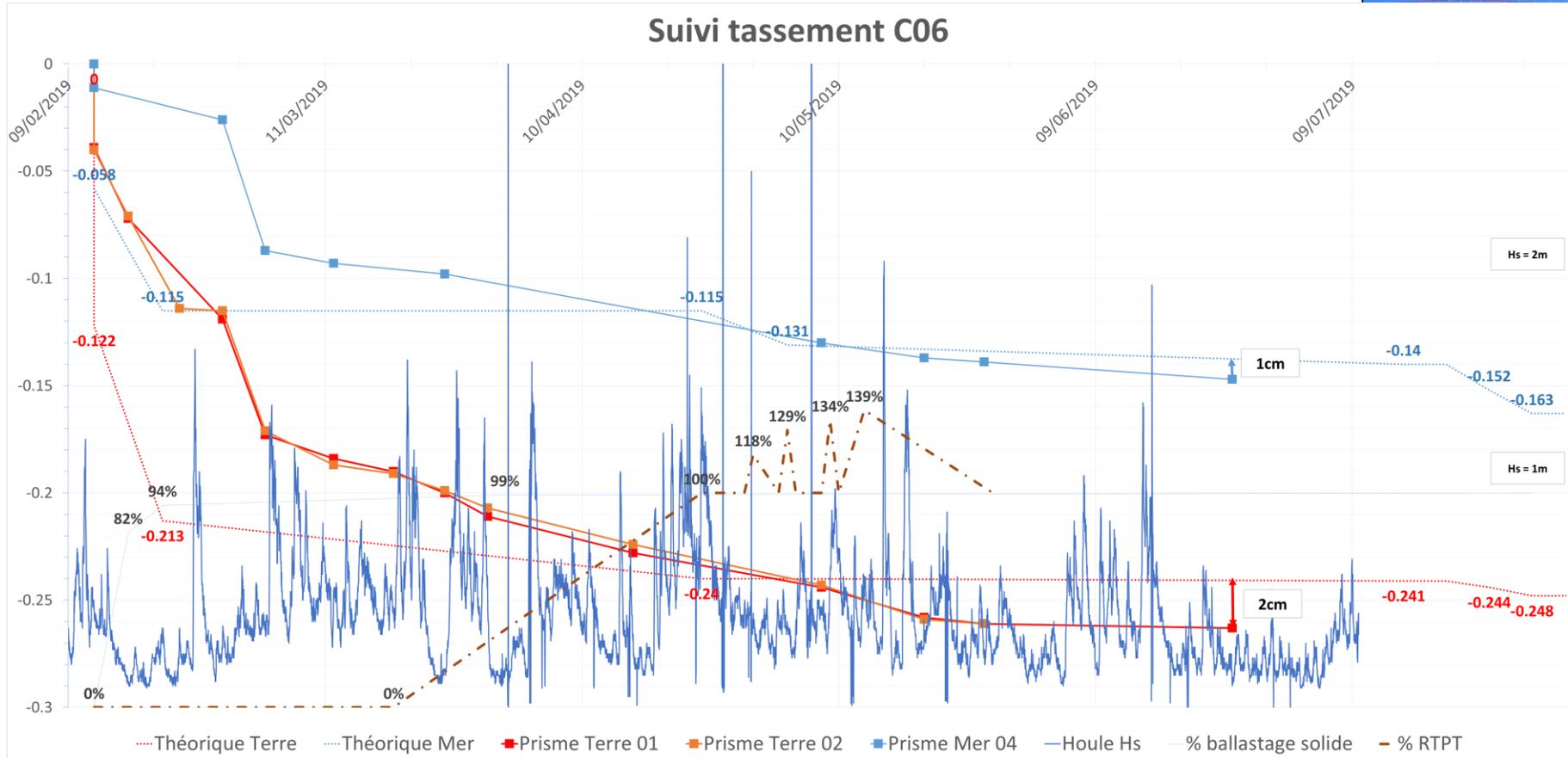
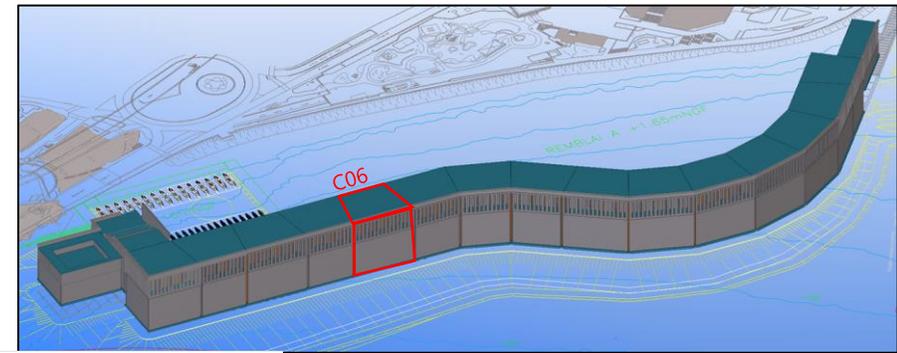


Mesure de sur-tassement coté terre et mer selon les différentes étapes de chargement liés à des coup de mer significatif

MAITRISE DES TASSEMENTS

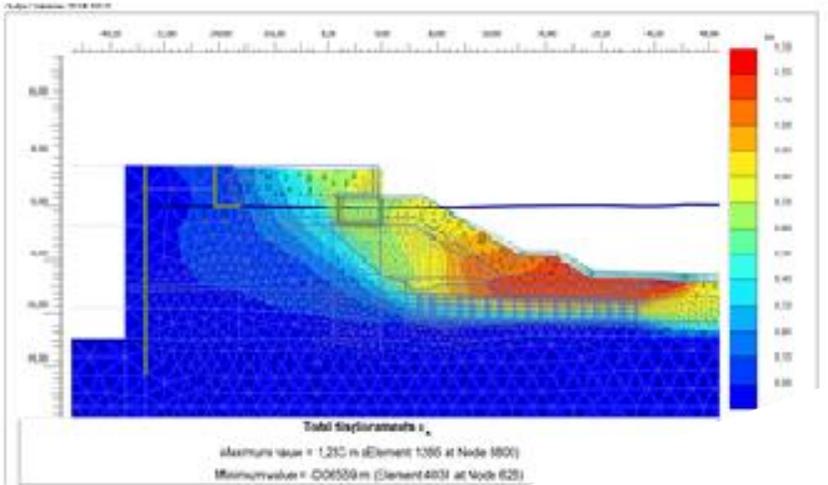
SUIVI DES TASSEMENTS SOUS CAISSONS

Comparaison des tassements calculés avec recalage du modèle / mesurées (exemple du caisson C06)



Les écarts que l'on peut noter dans les premières phases de ballastage solide se réduisent progressivement une fois le ballastage achevé où l'écart résiduel n'est que de 1 à 2 cm désormais entre le modèle et l'observation

Le modèle recalé représente donc bien le comportement réel des caissons.



STABILITÉ DES OUVRAGES

03.

STABILITÉ DES OUVRAGES

■ TRAITEMENT DE SOL – PHASE CONCEPTION

Principes envisagés pour traiter la liquéfaction :

- Augmenter la compacité du sol liquéfiable → augmentation de la résistance à la liquéfaction
 - ✓ Vibrocompactage pour les matériaux rapportés,
 - ✓ Colonnes ballastées pour les sédiments en place
 - ✓ Injections solides
- Réduire la sollicitation sismique par concentration de contraintes dans des éléments plus raides → réduction des sollicitations sur les sols
 - ✓ Colonnes ballastées
 - ✓ Injections solides
- Réduire rapidement les surpressions interstitielles lors du séisme
 - ✓ Colonnes ballastées
 - ✓ Drains verticaux
- Par confinement
 - ✓ Caissons en jet-grouting ou soil mixing

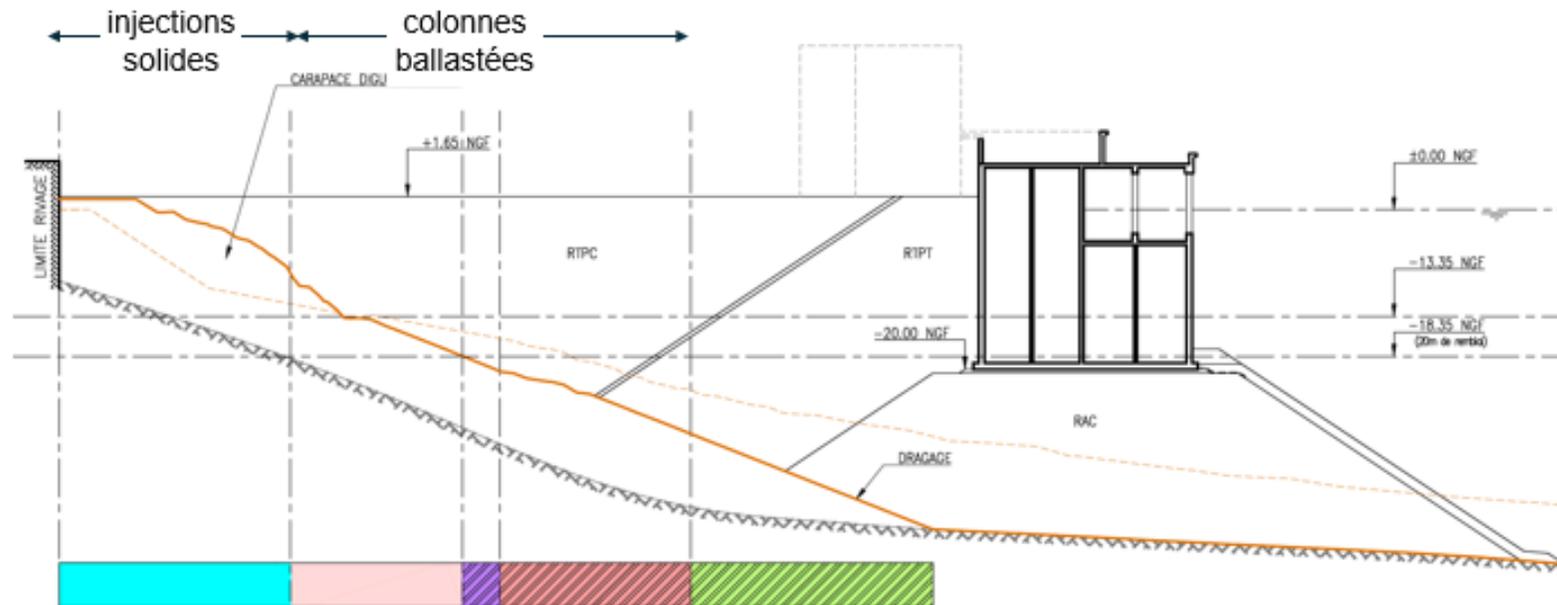
STABILITÉ DES OUVRAGES

■ TRAITEMENT DE SOL – PHASE CONCEPTION

Principes retenus lors des phases de conception pour la liquéfaction:

- Traitements par voie maritime: colonnes ballastées;
- Traitement de sol par voie terrestre: colonnes ballastées et injections solides (zones avec présence d'encrochements),

Point particulier: prise en compte de l'effet favorable du remblaiement dans la conception



STABILITÉ DES OUVRAGES

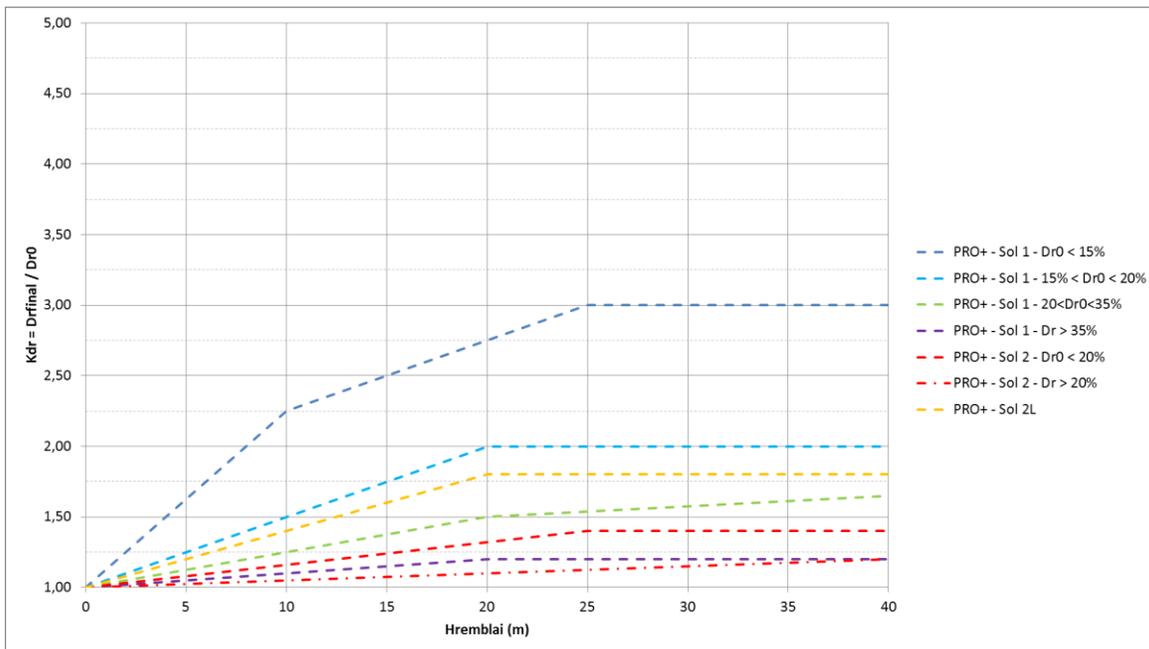
■ TRAITEMENT DE SOL – PHASE CONCEPTION

Prise en compte des remblais rapportés :

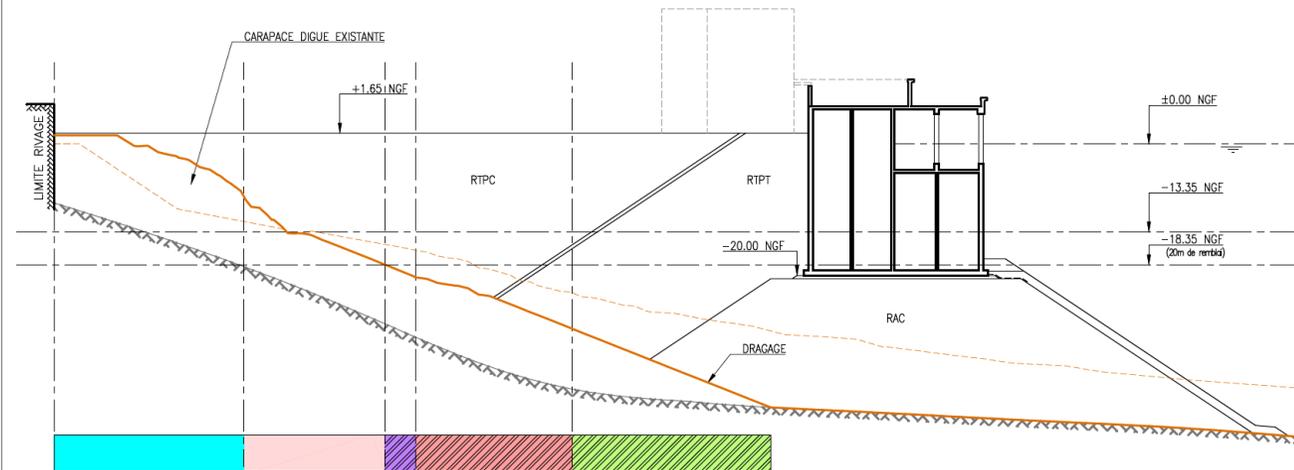
- L'augmentation des contraintes dans le sol naturel (sous l'effet de la charge apportée par rapport au niveau de sol initial),
- La consolidation de ce sol (sous cette même charge).

L'analyse réalisée pour l'état initial est ainsi modifiée de la manière suivante :

- Modification du calcul du CSR pour tenir compte de la nouvelle géométrie et de la surcharge apportée
- Prise en compte de l'augmentation de la densité relative, suite à la consolidation des sols sous la charge de remblai

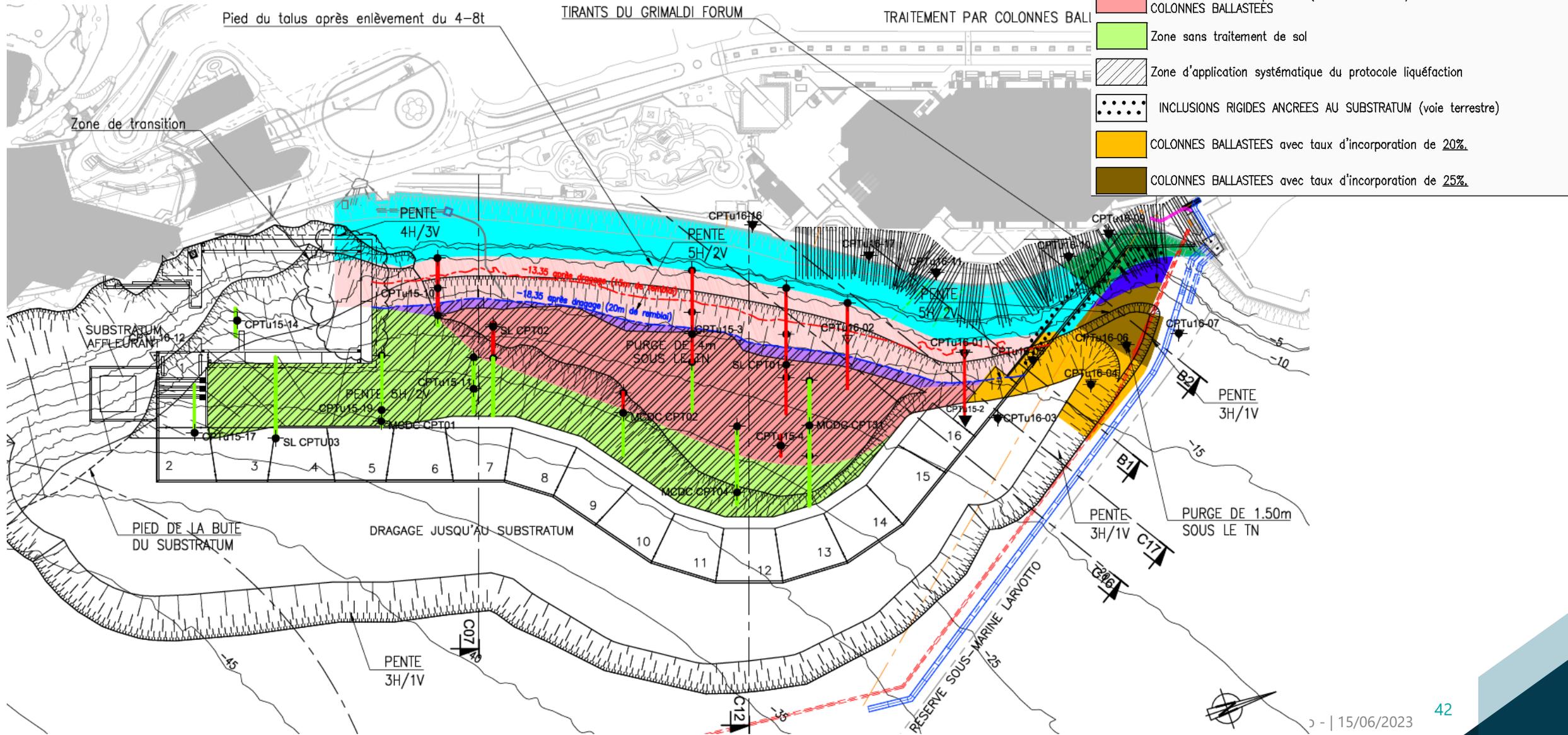


Exploitation des essais œdométriques et triaxiaux disponibles sur le projet



STABILITÉ DES OUVRAGES

■ TRAITEMENT DE SOL – PHASE CONCEPTION



STABILITÉ DES OUVRAGES

■ TRAITEMENT DE SOL – PHASE EXECUTION

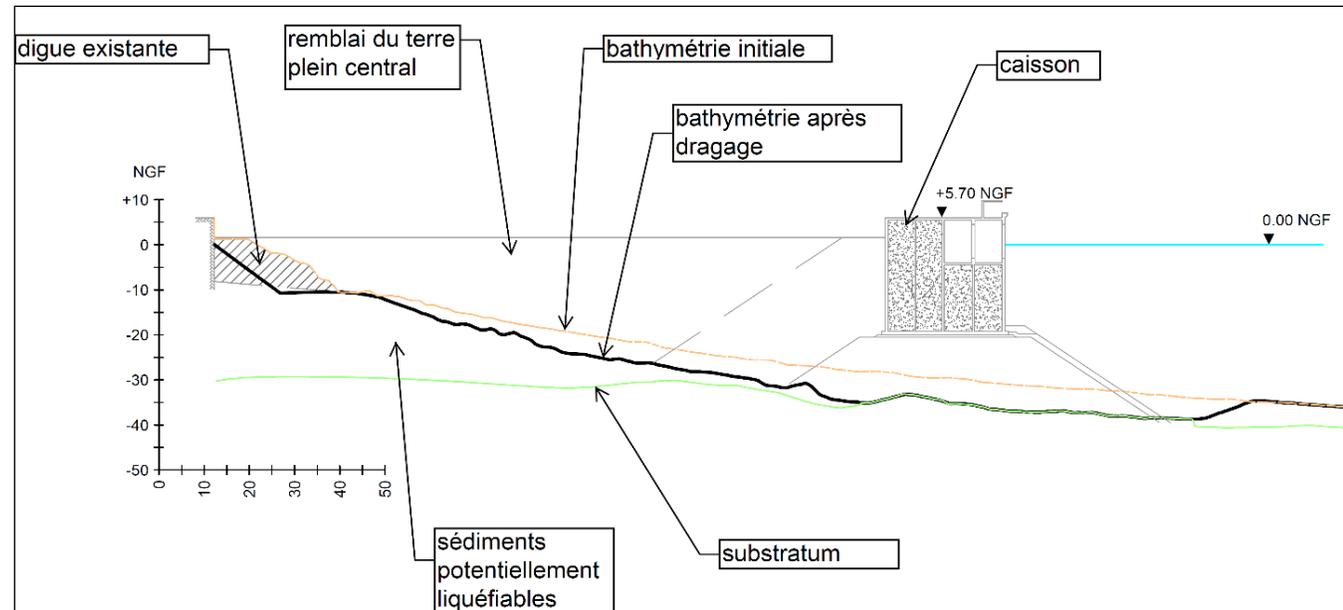
Traitement de sol	Contrainte
Colonnes ballastées par voie maritime	Présence des enrochements à proximité de la cote maritime
Casing en jet grouting	Traitement de sol par voie terrestre, dans la zone concernée par les enrochements en place
Drains sismiques	Traitement de sol par voie terrestre, hors zone concernée par les enrochements en place



Réalisation de planche d'essai pour les différentes techniques et adaptation des traitements de sol prévus lors des études de conception

- injections solides
- colonnes ballastées
- jet grouting
- drains

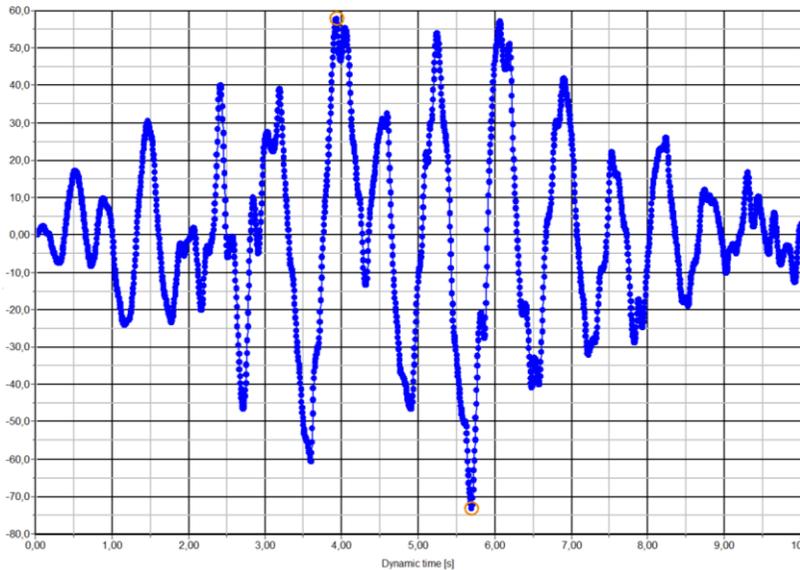
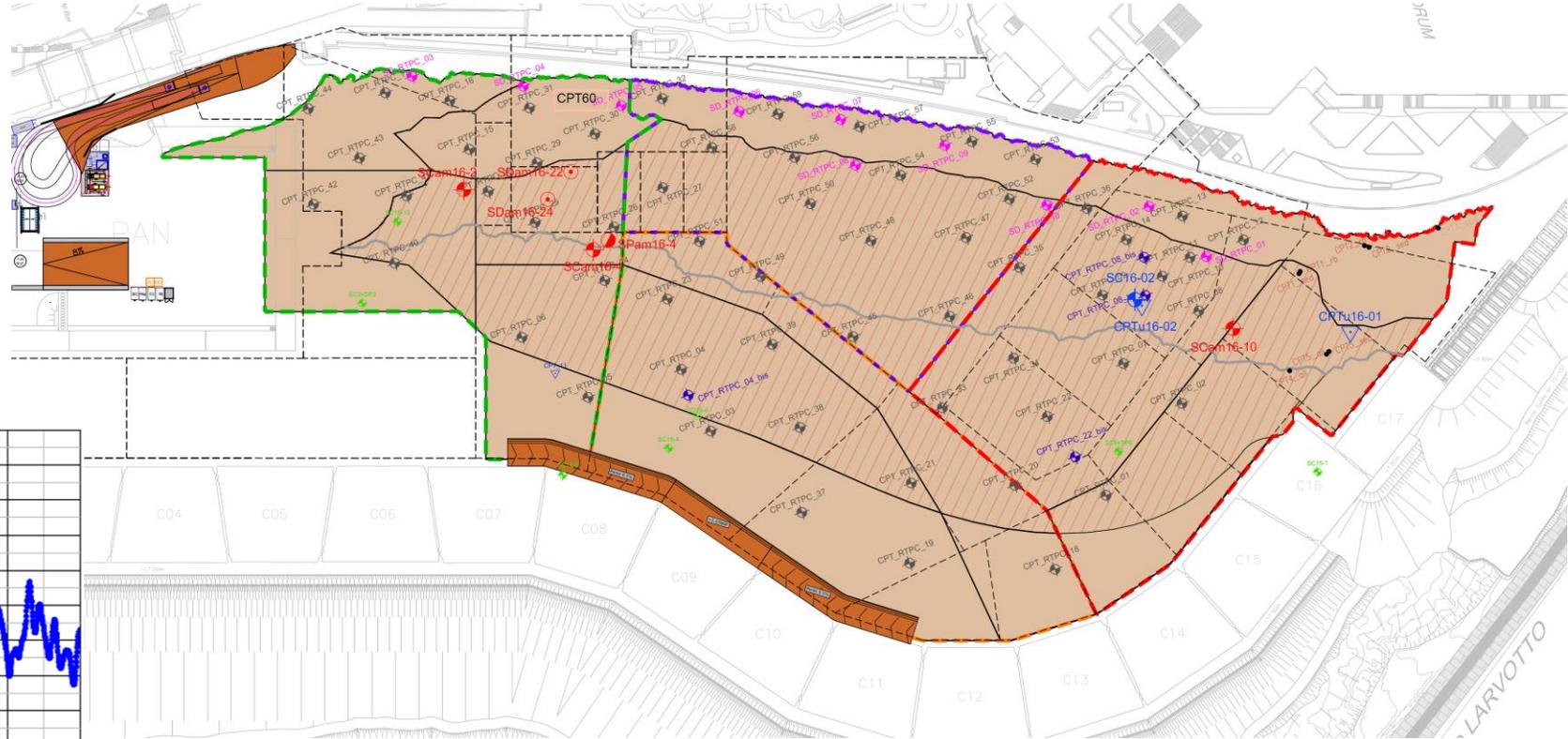
Évolution du remblai du terre plein central:
Remblai hydraulique (sable fin) ==> matériau granulaire de carrière (0/20 et 0/50)



STABILITÉ DES OUVRAGES

■ TRAITEMENT DE SOL – PHASE EXECUTION

Réalisation d'une campagne de reconnaissance adaptée aux enjeux (plus de 50 CPTu réalisés)

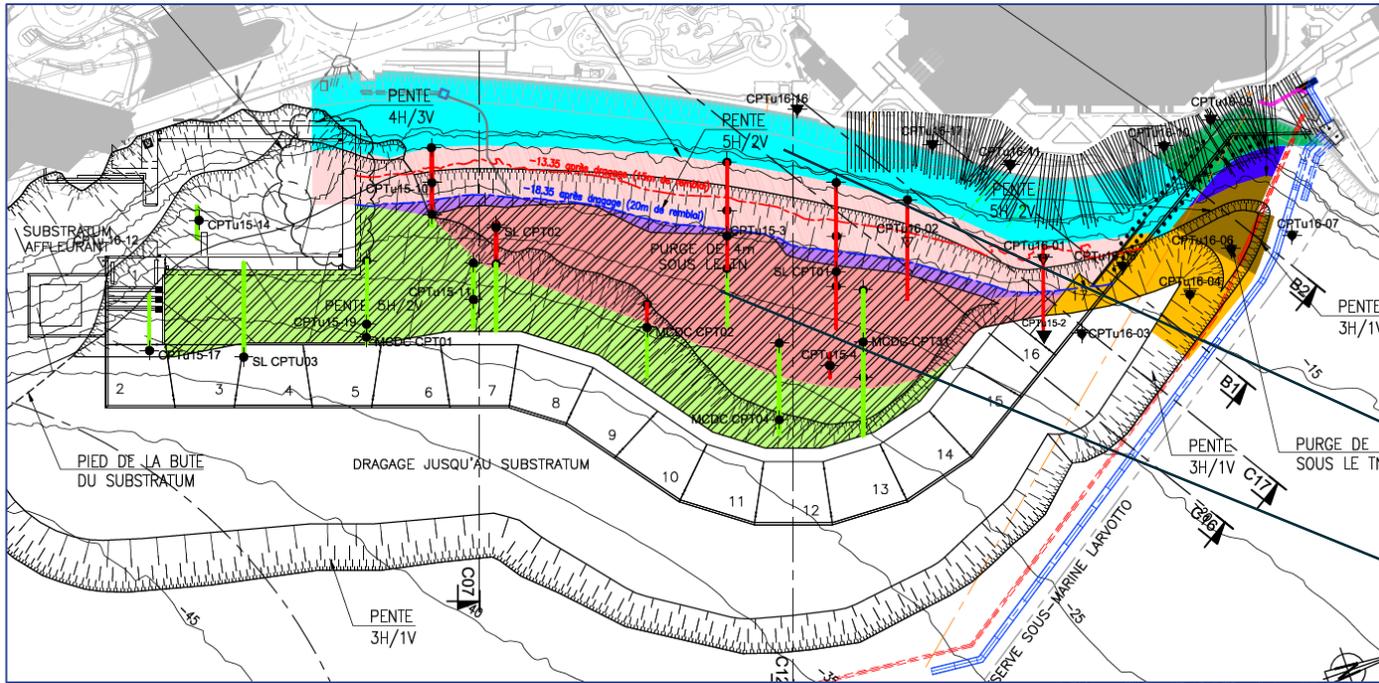


Cisaillement en fonction du temps, calcul de colonne de sol

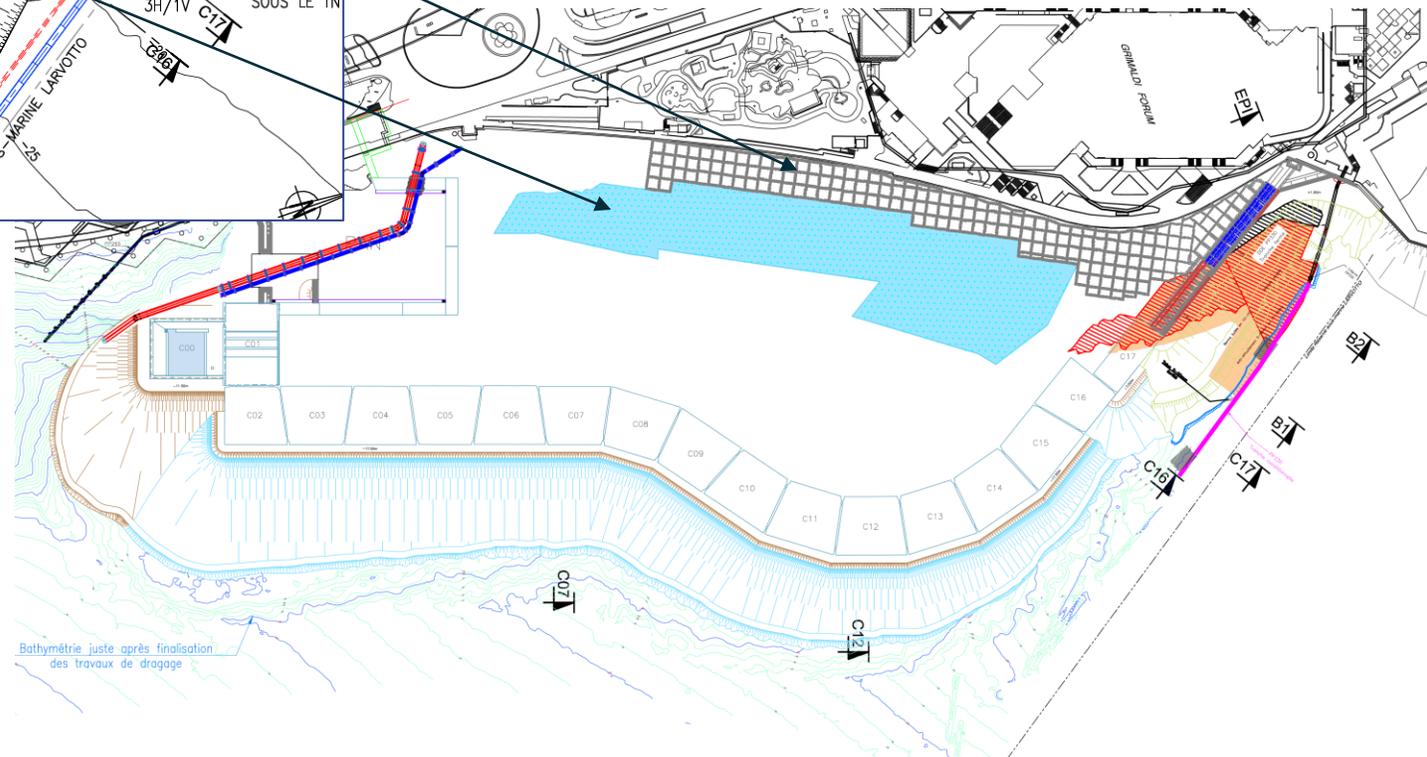
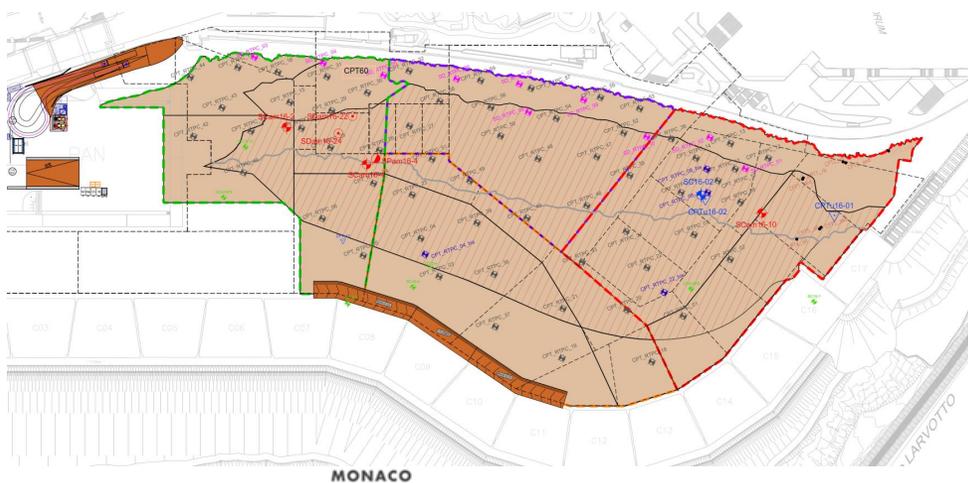
Poursuivi par des calculs complexes et en quantités (plus de 50 CPTu pris en compte dans des calculs dynamiques couplés temporels)

STABILITÉ DES OUVRAGES

■ TRAITEMENT DE SOL – BILAN CONCEPTION/EXECUTION



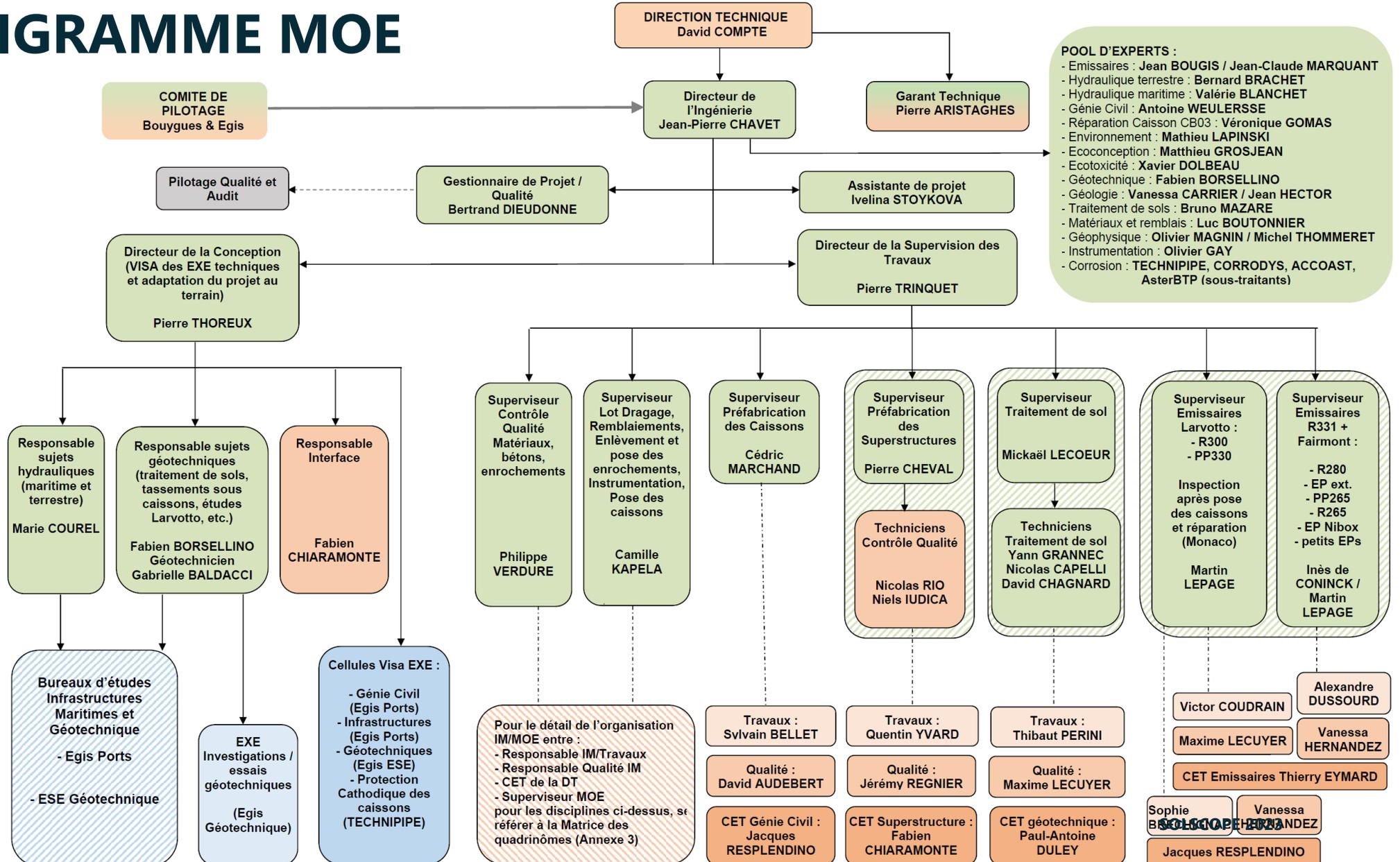
Traitement de sol phase conception	Traitement de sol phase execution
Colonnes ballastées par voie maritime	Colonnes ballastées par voie maritime
Injections solides	Casing en jet grouting
Colonnes ballastées par voie terrestre	Drains sismiques



04.

**PROCESSUS / FONCTIONNEMENT DU
GROUPEMENT ENTREPRISE ET
MAITRISE D'OEUVRE**

ORGANIGRAMME MOE



- POOL D'EXPERTS :**
- Emissaires : Jean BOUGIS / Jean-Claude MARQUANT
 - Hydraulique terrestre : Bernard BRACHET
 - Hydraulique maritime : Valérie BLANCHET
 - Génie Civil : Antoine WEULERSSE
 - Réparation Caisson CB03 : Véronique GOMAS
 - Environnement : Mathieu LAPINSKI
 - Ecoconception : Matthieu GROSJEAN
 - Ecotoxicité : Xavier DOLBEAU
 - Géotechnique : Fabien BORSELLINO
 - Géologie : Vanessa CARRIER / Jean HECTOR
 - Traitement de sols : Bruno MAZARE
 - Matériaux et remblais : Luc BOUTONNIER
 - Géophysique : Olivier MAGNIN / Michel THOMMERET
 - Instrumentation : Olivier GAY
 - Corrosion : TECHNIPIPE, CORRODYS, ACCOAST, AsterBTP (sous-traitants)



PROCESSUS / FONCTIONNEMENT GROUPEMENT

■ LES ENJEUX DES GRANDS PROJETS MARITIME DU POINT DE VUE RESPONSABLE

- Avoir une équipe de conception-construction performante
- Préserver et sauvegarder les écosystèmes R
- Trouver le bon dosage entre les règlements et la réalité de terrain R**
- Respecter le planning du Client (difficulté accrue en maritime)
- Ne pas maximiser les travaux de création du terre-plein R
- Travailler en sécurité car milieu très accidentogène R

PROCESSUS / FONCTIONNEMENT GROUPEMENT

En conception

Emission

MOE

Contrôle NIV1

Interne

Contrôle NIV2

Externe

- DT
- Tvx
- Qualité
- Risques
- Consultants etc..

Contrôle NIV3

Extérieur

- Interfaces
- CT

Contrôle

Client

ENT

**MOE
DT**

TVX

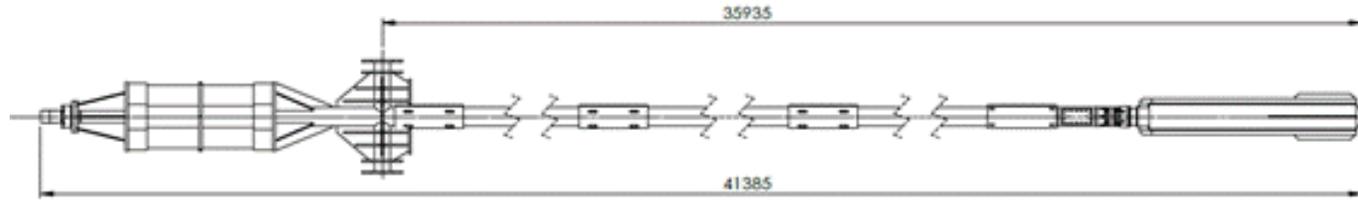
- Méthode
- Qualité
- CSPS
- Experts etc..

Extérieur

- Interfaces
- CT
- Direction travaux

PROCESSUS / FONCTIONNEMENT GROUPEMENT

IMPACTS DES DIMENSIONNEMENT SUR LES TRAVAUX



Conception initiale

Création du surpoids et mise en œuvre du barillet de 13 t

Mise en œuvre d'une peinture spéciale

Création d'un surpoids « pot de yaourt » amovible

A t0
Au démarrage

A t0+2 s
Après réalisation des
talus >20 m

Avant démarrage
de l'assise C03

Temps

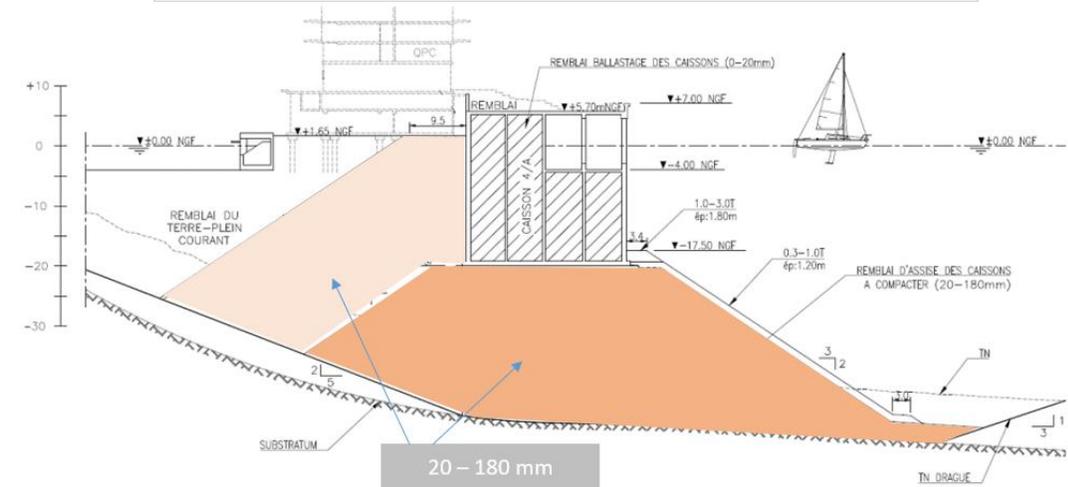
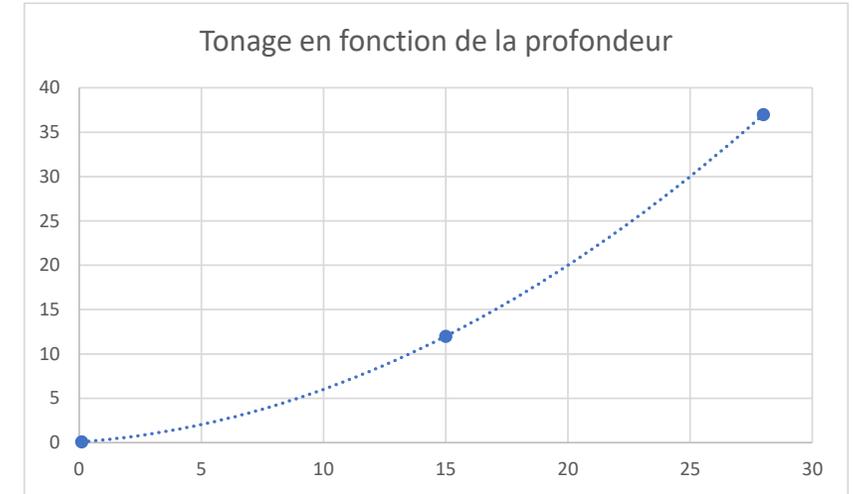
Poids (t)

19

32

32

37,7



PROCESSUS / FONCTIONNEMENT GROUPEMENT

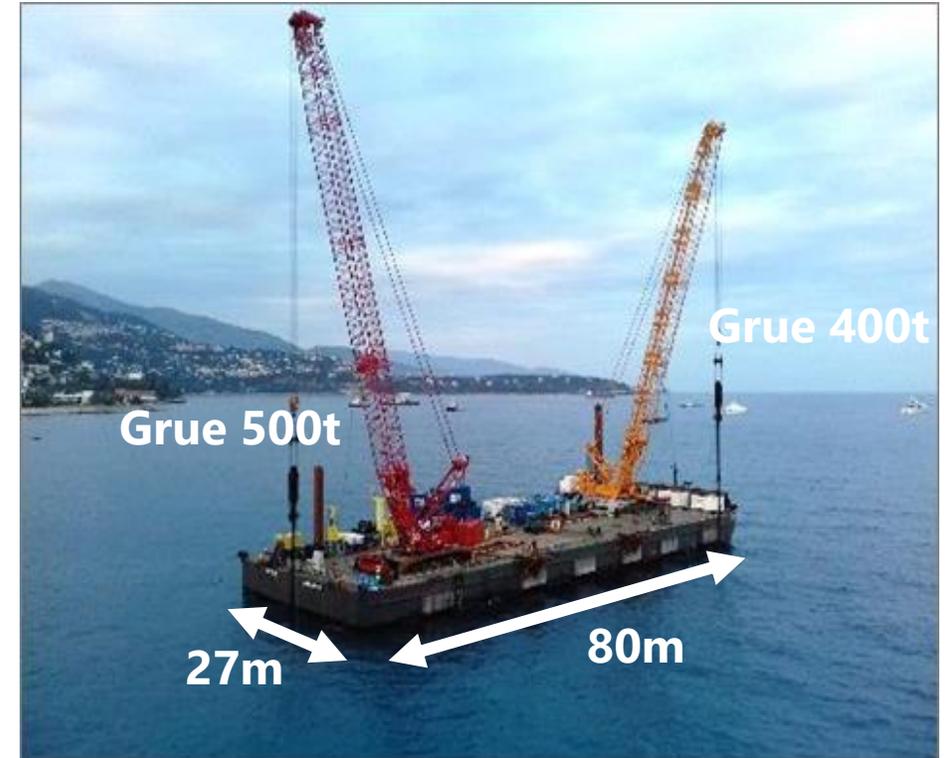
■ LES ENJEUX DES GRANDS PROJETS MARITIME DU POINT DE VUE RESPONSABLE



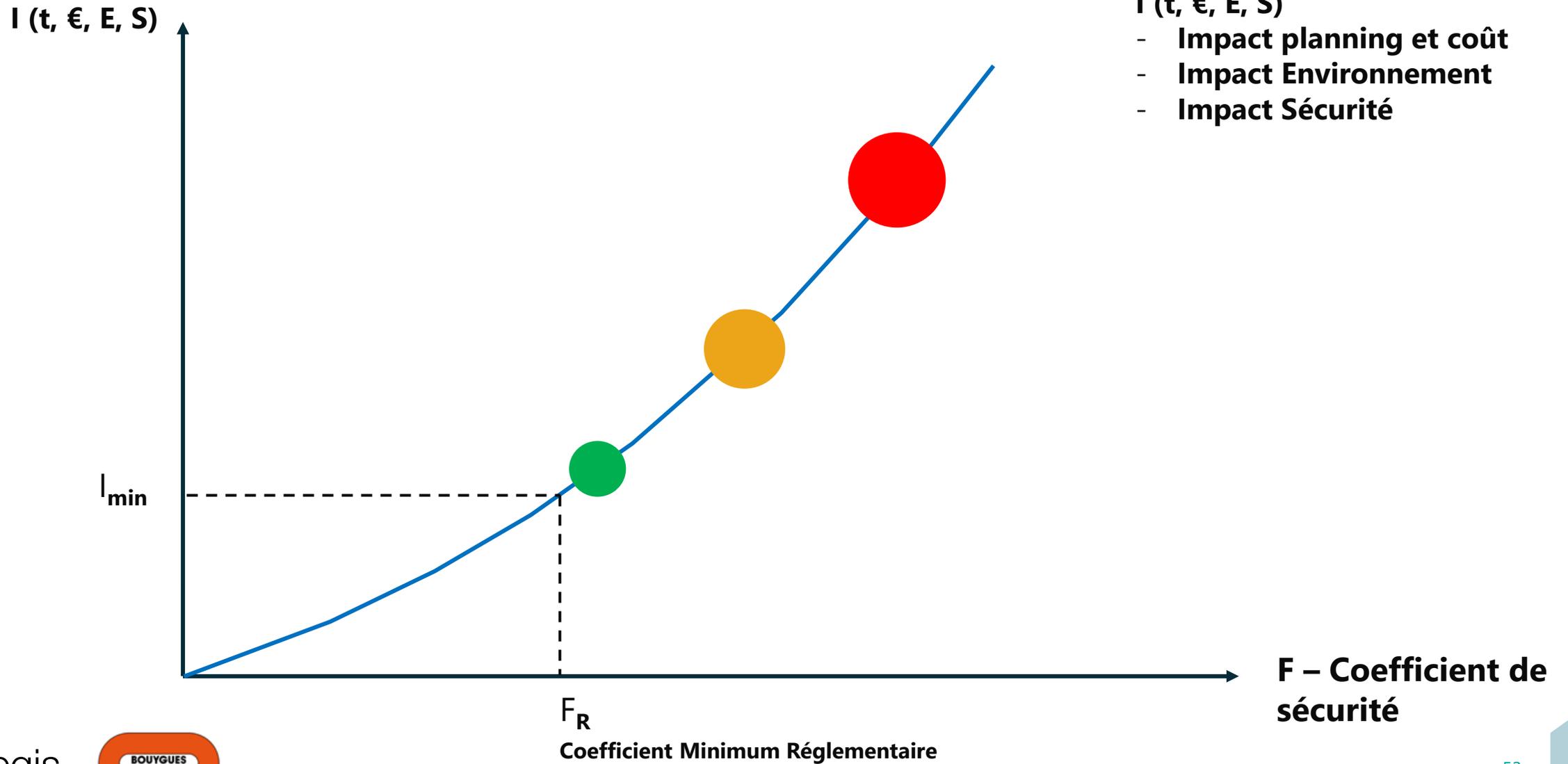
Plateforme + Fourchette



Sécurité



ETRE RESPONSABLE C'EST QUOI ?



QUESTIONS
■