EXTENSION EN MER AU DROIT DU PORTIER - MONACO

Infrastructure Maritime
Traitements de sol

WEBINAR CFMS
Le 08 décembre 2020

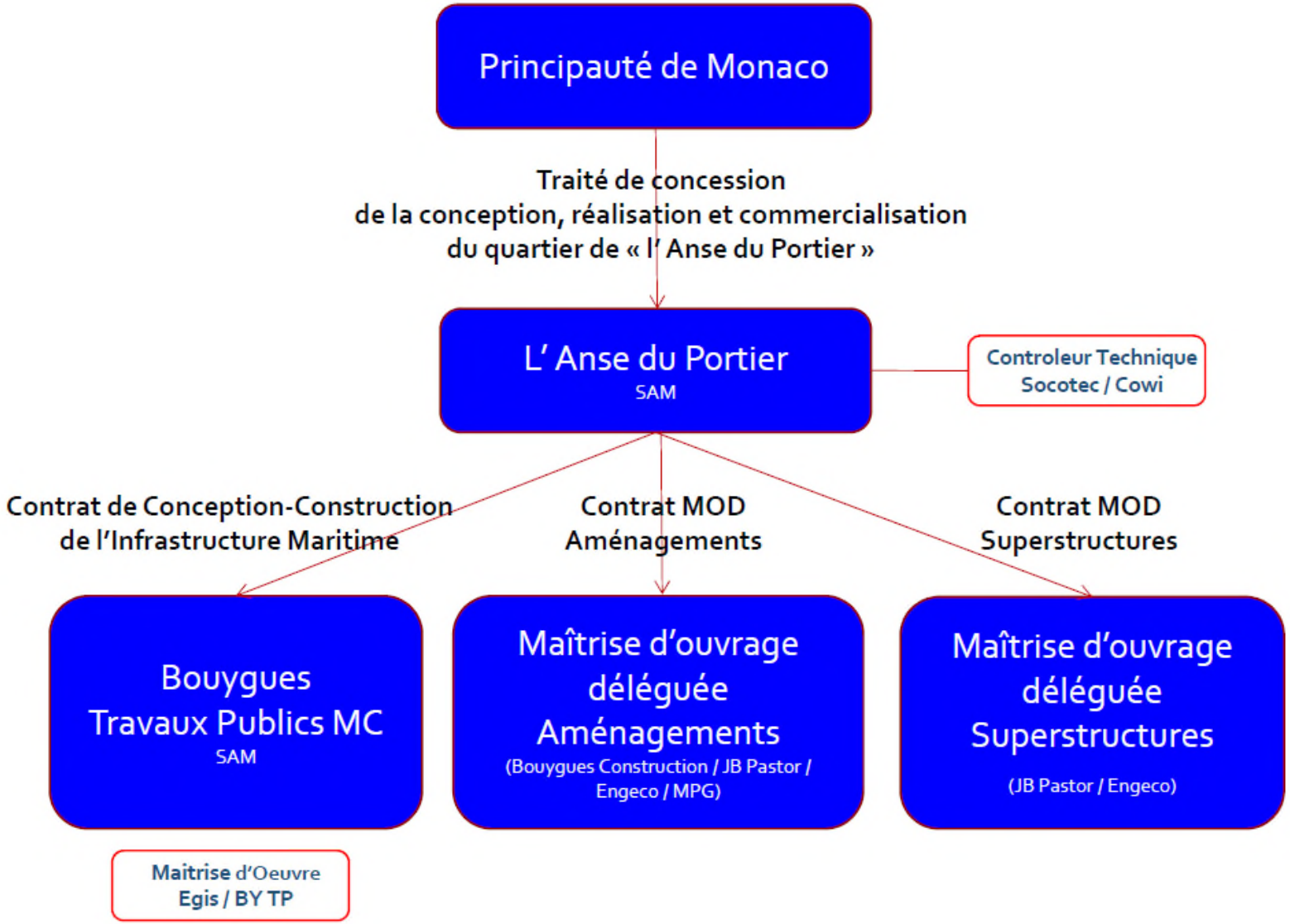
Thibaut Perini (Bouygues)
Fabien Borsellino (Egis)
Maelle Jourdren (Menard)

PRÉSENTATION DU PROJET

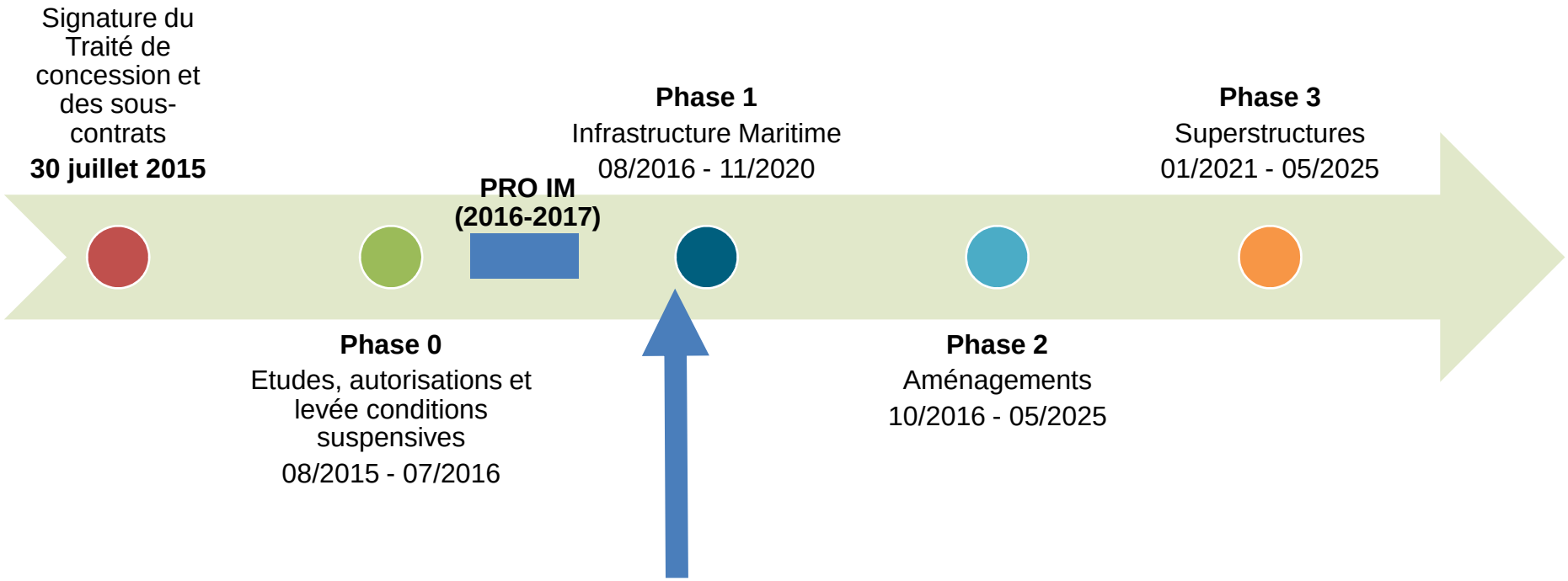
01.

Localisation du projet

Organisation du projet

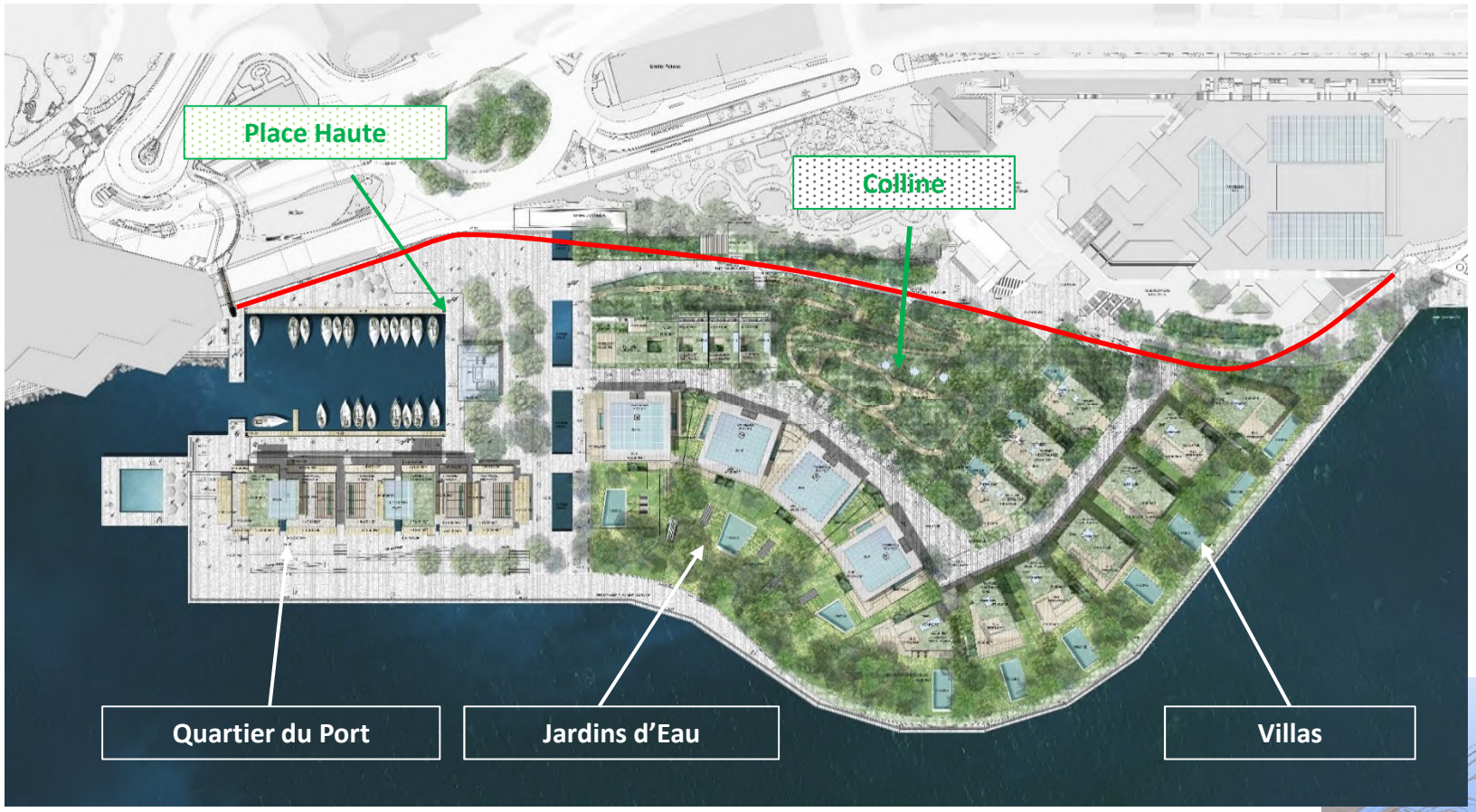


Planning indicatif



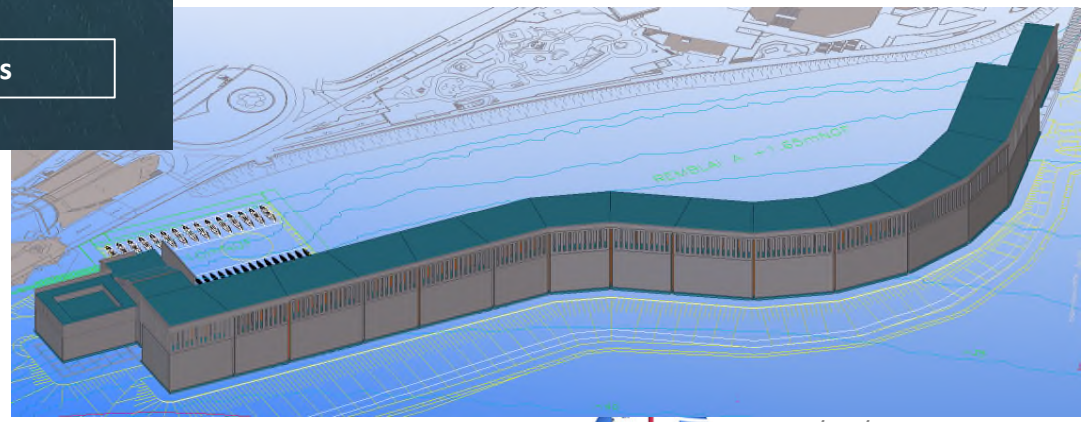
Aperçu du projet

PLAN MASSE



L'extension en mer:

- Eco-quartier (remblai gagné sur la mer)
- Surface: 6 hectares
- 18 caissons en béton préfabriqués
- Taille d'un caisson:
  - Hauteur: 26m
  - Poids: 10 000 tonnes



Anse du Portier après travaux

Le projet à la loupe

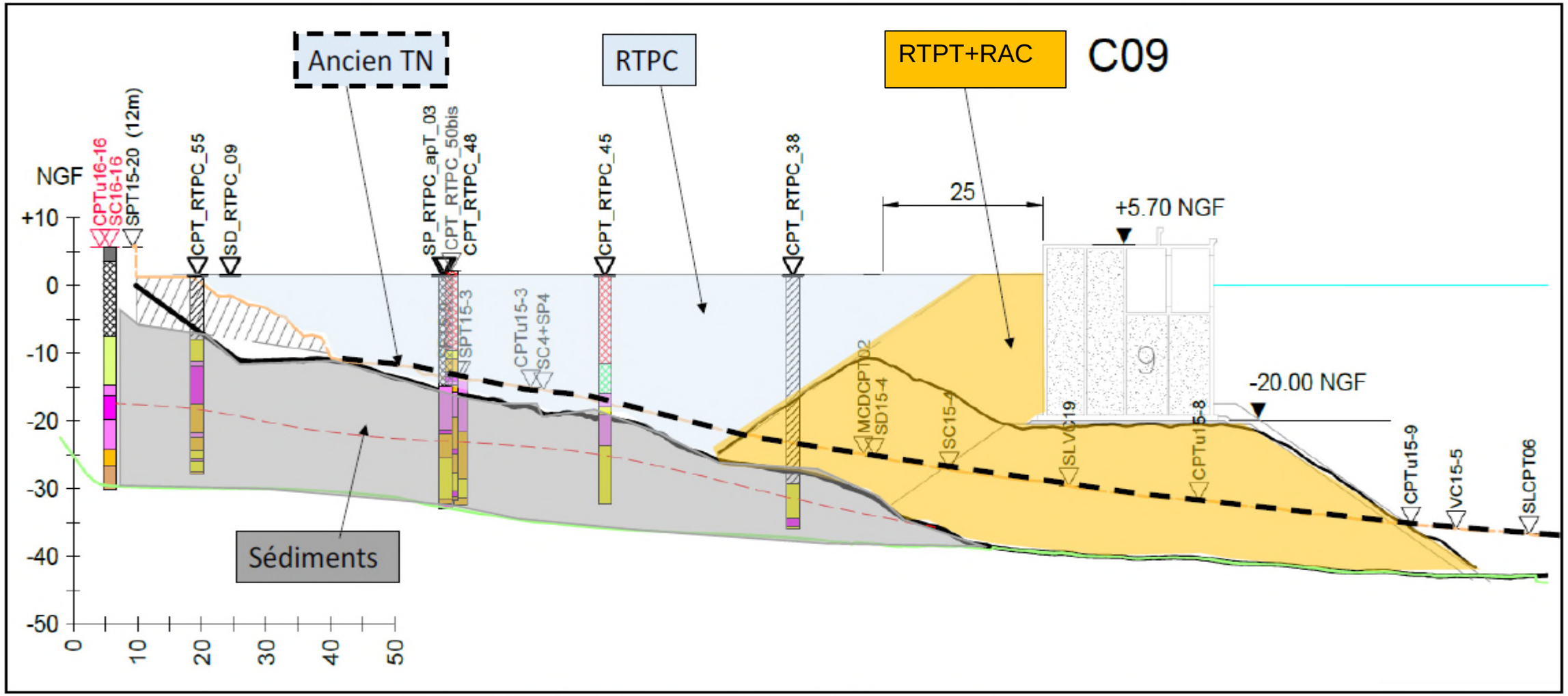


Figure 2 : Coupe géotechnique synthétique au droit d'un caisson

ENJEUX GÉNÉRAUX

- Prendre en compte le contexte sismique;
- Prendre en compte les contraintes de délai de construction;
- Prendre en compte le contexte urbain et maritime du projet.

ENJEUX DE L'INGÉNIERIE GÉOTECHNIQUE

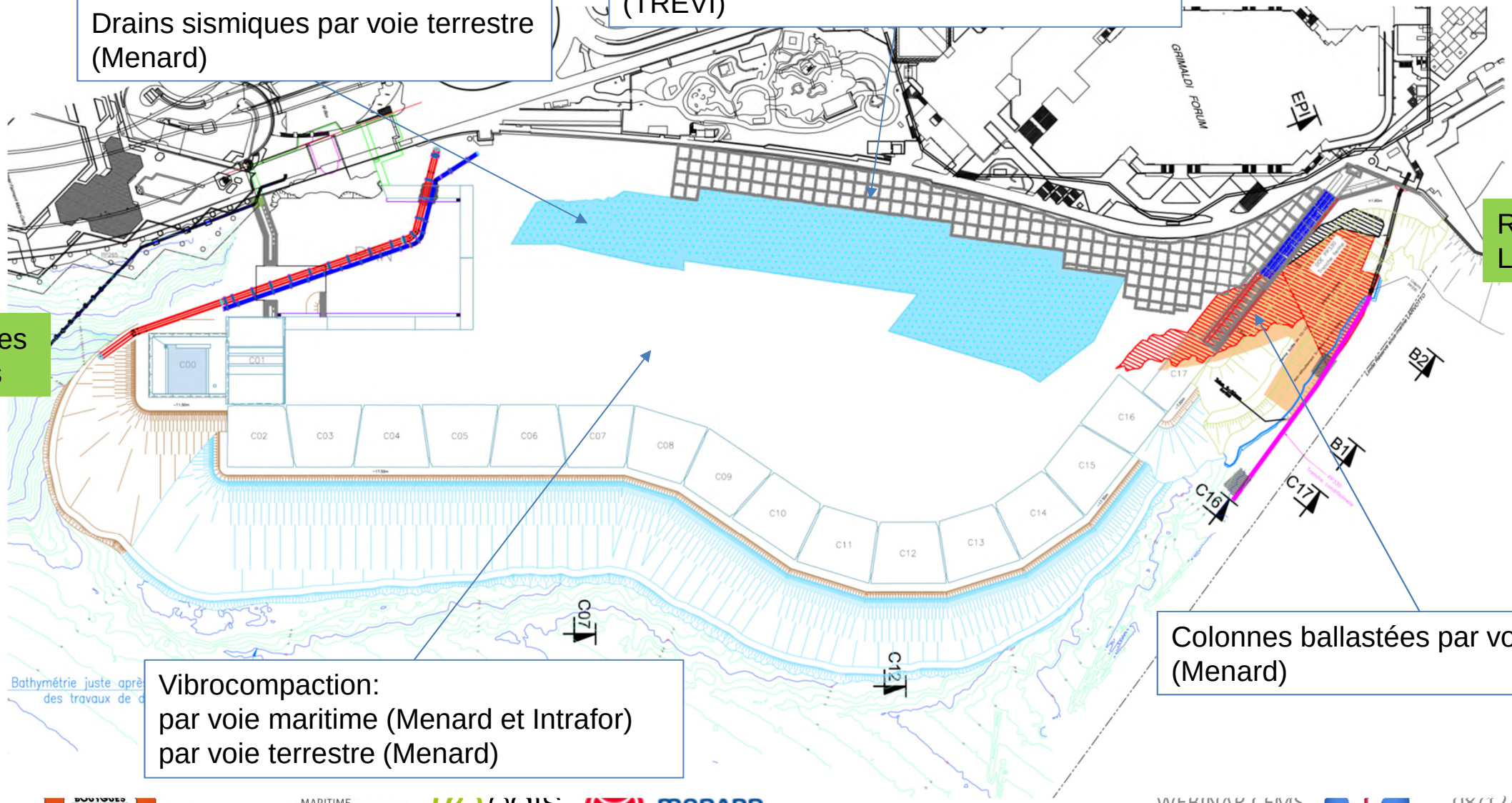
- Garantir la stabilité des ouvrages;
- Garantir une plate-forme non liquéfiable;
- Maitriser les tassements de la plate-forme;
- Performances des matériaux de remblai.

	Vibrocompaction RAC/RTPT	Vibrocompaction RTPC	Colonnes Ballastées	Cellules en Jet Grouting	Drains sismiques
Densification	X	X			
Liquéfaction des sédiments			X	X	X
Stabilité au grand glissement			X		
Tassements (15 à 90 mm admissible selon les différentes zones du projet)				X	X

Localisation des traitements de sol

Cellules en Jet Grouting par voie terrestre (TREVI)

Drains sismiques par voie terrestre (Menard)



Réserve des Spélugues

Réserve du Larvotto

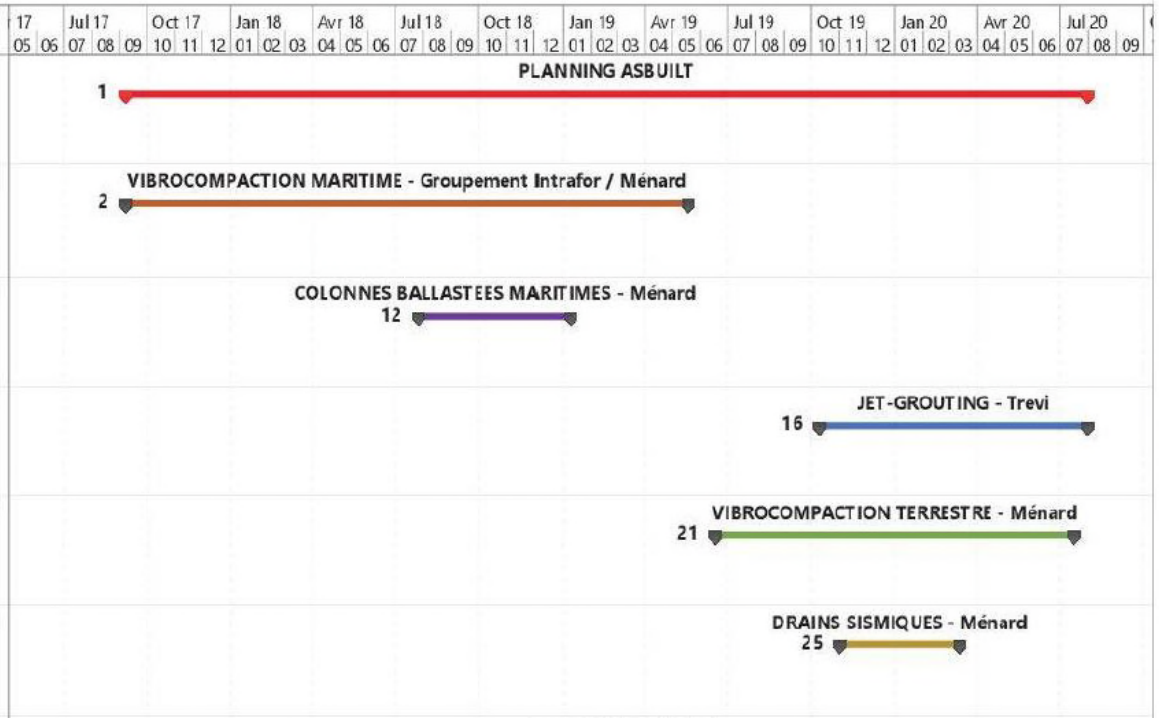
Colonnes ballastées par voie maritime (Menard)

Vibrocompaction:
par voie maritime (Menard et Intrafor)
par voie terrestre (Menard)

Planning des traitements de sol

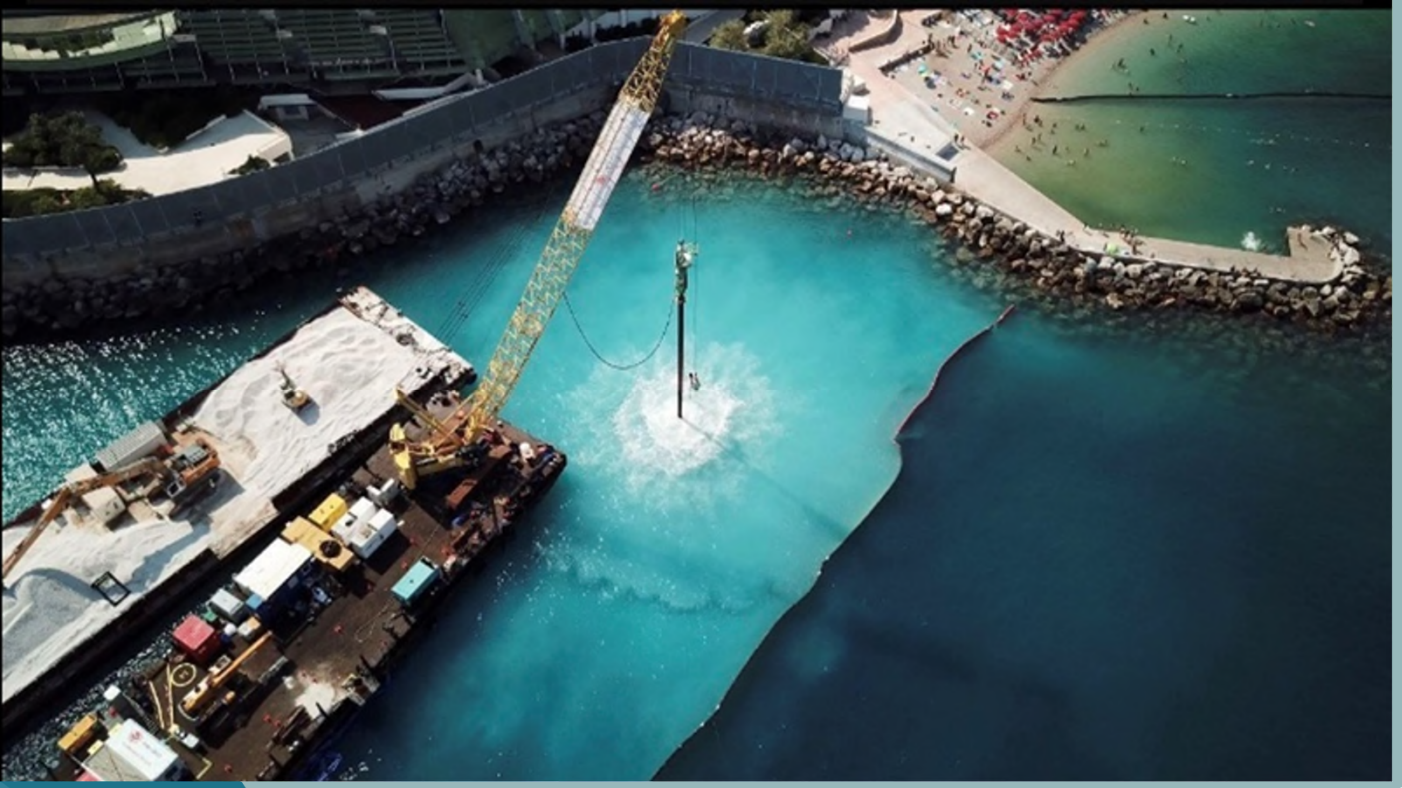
PLANNING ASBUILT
TRAITEMENTS DE SOLS

N°	Nom de la tâche	Durée	Début	Fin
1	PLANNING ASBUILT	756 jours	Jeu 07/09	Jeu 30/07
2	VIBROCOMPACTION MARITIME - Groupement Intrafor / Ménard	442 jours	Jeu 07/09	Ven 17/05
12	COLONNES BALLASTEES MARITIMES - Ménard	118 jours	Ven 27/07	Mar 08/01
16	JET-GROUTING - Trevi	211 jours	Jeu 10/10	Jeu 30/07
21	VIBROCOMPACTION TERRESTRE - Ménard	283 jours	Lun 17/06	Mer 15/07
25	DRAINS SISMIQUES - Ménard	94 jours	Ven 01/11	Mer 11/03



Volume de traitement

- ≈ 693 000 m³
- ≈ 26 000 m³
- ≈ 71 000 m³
- ≈ 143 000 m³
- ≈ 462 000 m³



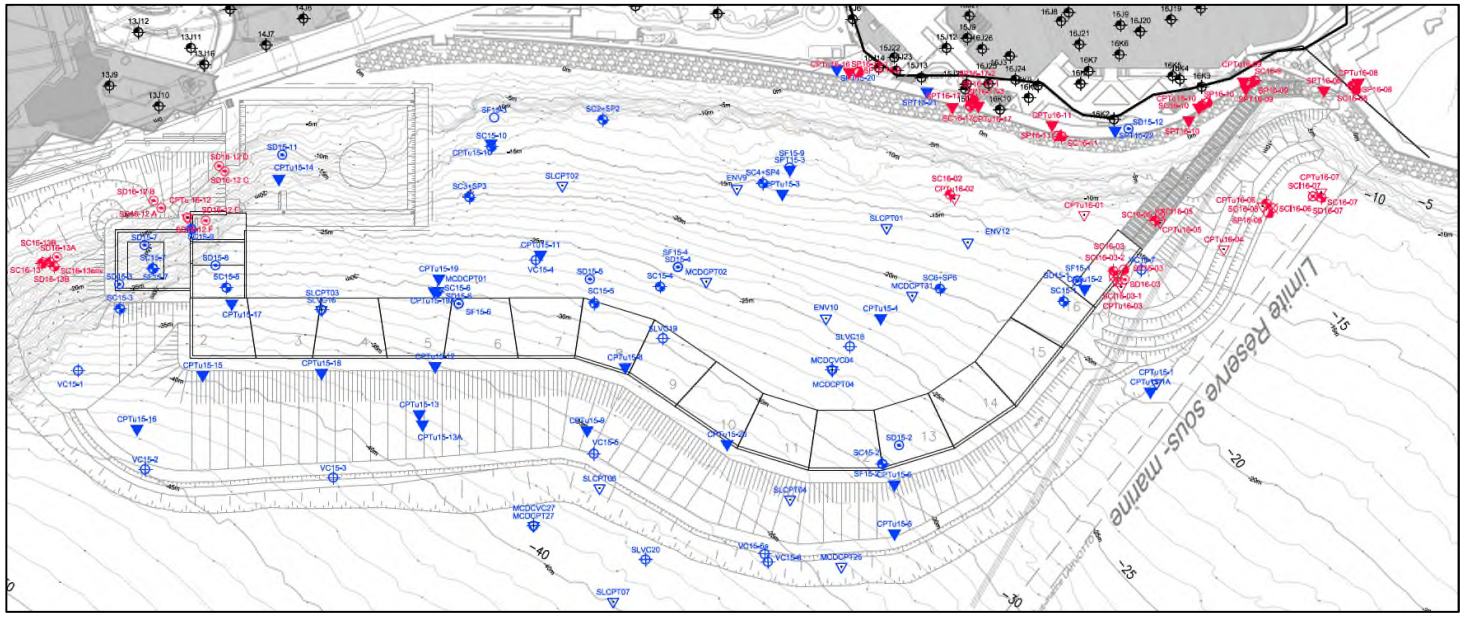
LES COLONNES BALLASTÉES

Conception
Travaux
Contrôles

02.

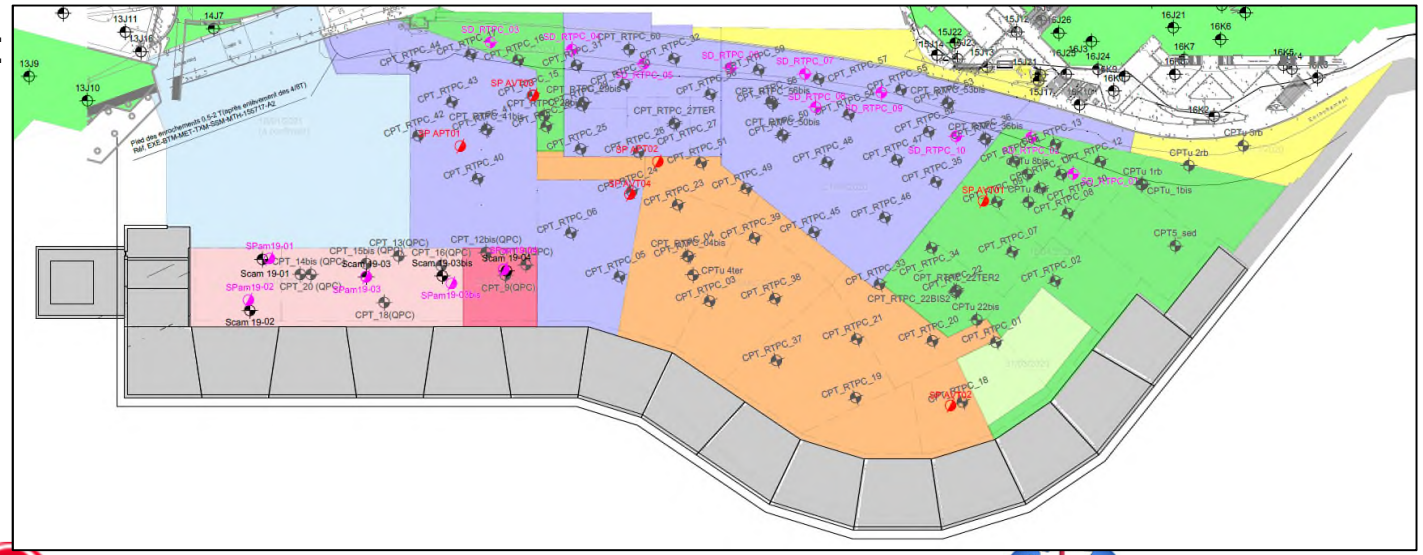
Sondages par voie maritime:

- Sondages CPTu (>30);
- Sondages scissométriques;
- Standard Penetration Test (sur la cote);
- sondages destructifs;
- sondages pressiométriques;
- profil avec caméra thermique et des profils géophysiques maritimes;
- sondages carottés;
- géophysique en forage.



Sondages par voie terrestre (post remblaiement):

- Sondages CPTu (>50);
- Sondages scissométriques;
- sondages destructifs;
- sondages pressiométriques;
- Cross holes;
- sondages carottés;

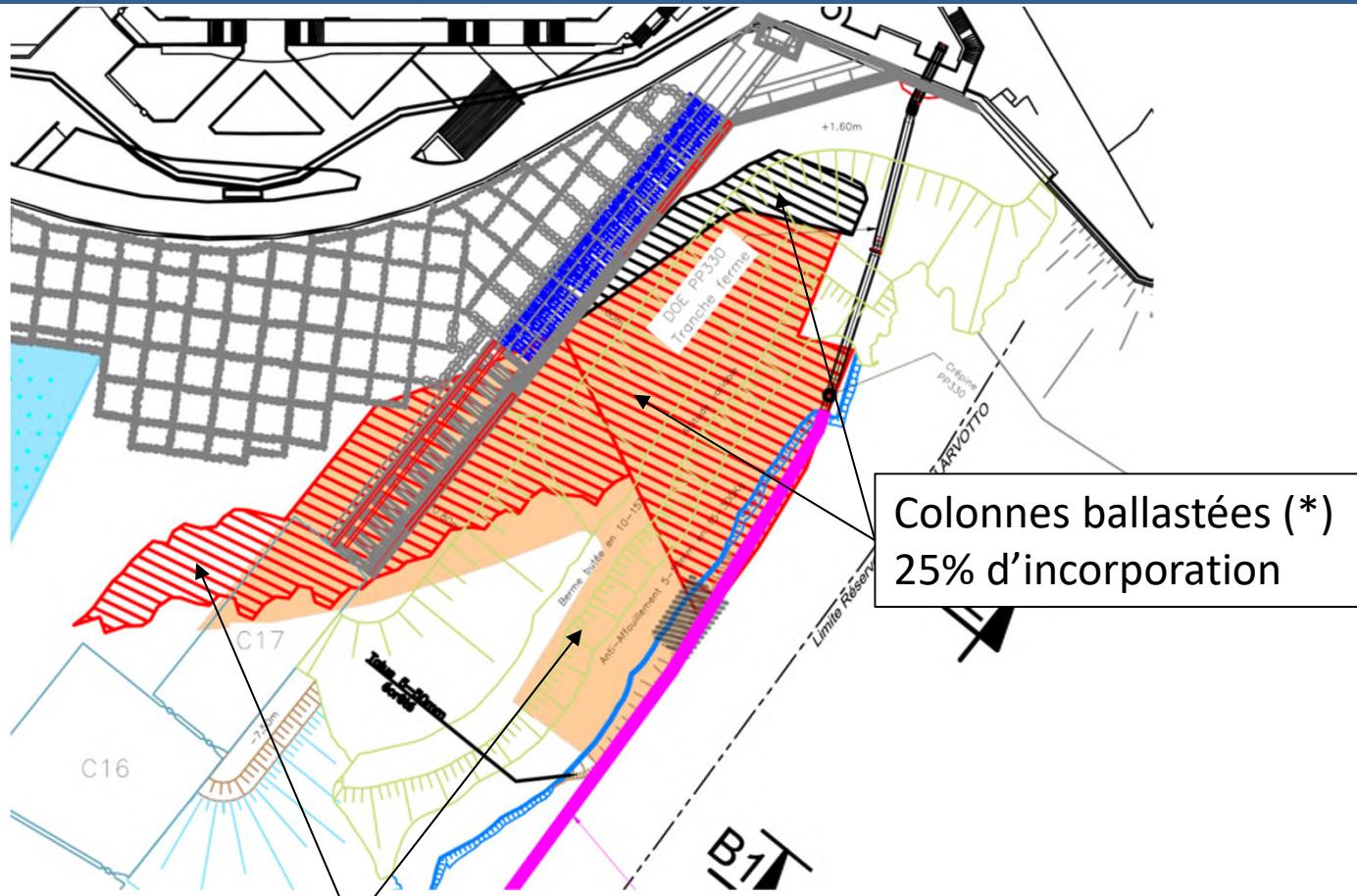


Objectifs du traitement par colonnes ballastées

- Garantir une plate-forme non liquéfiable;
- Contribuer à la stabilité des ouvrages.

Contraintes

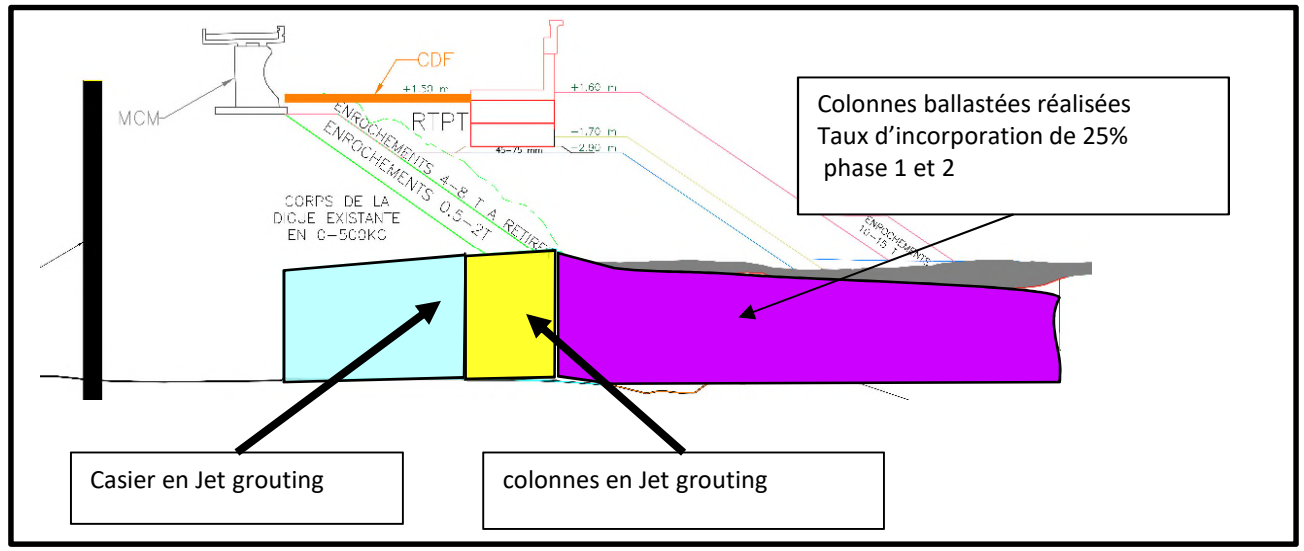
- Ne peut être réalisé qu'en dehors de la zone des enrochements;
- Présence des anciens tirants d'ancrage du forum Grimaldi;
- Taux d'incorporation très important.



(*) nota: pas d'utilisation d'air pour les travaux de colonnes ballastées compte-tenu des enjeux environnementaux (réserve du Larvotto)

Justification de la stabilité au grand glissement

➔ Justification en termes de déplacements de la zone hors villa au moyen de calculs aux éléments finis



PIANC: ces recommandations permettent de quantifier, pour un niveau d'endommagement donné, les déplacements acceptables

Table 3.1. Acceptable level of damage in performance-based design.*

Level of damage	Structural	Operational
Degree I : Serviceable	Minor or no damage	Little or no loss of serviceability
Degree II: Repairable	Controlled damage**	Short-term loss of serviceability***
Degree III: Near collapse	Extensive damage in near collapse	Long-term or complete loss of serviceability
Degree IV: Collapse****	Complete loss of structure	Complete loss of serviceability

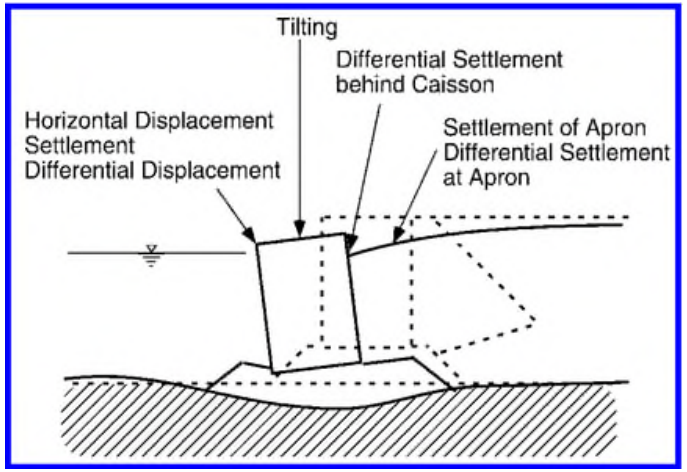


Table 4.1. Proposed damage criteria for gravity quay walls.

Level of damage		Degree I	Degree II	Degree III	Degree IV
Gravity wall	Normalized residual horizontal displacement (d/H)*	Less than 1.5%**	1.5~5%	5~10%	Larger than 10%
	Residual tilting towards the sea	Less than 3°	3~5°	5~8°	Larger than 8°

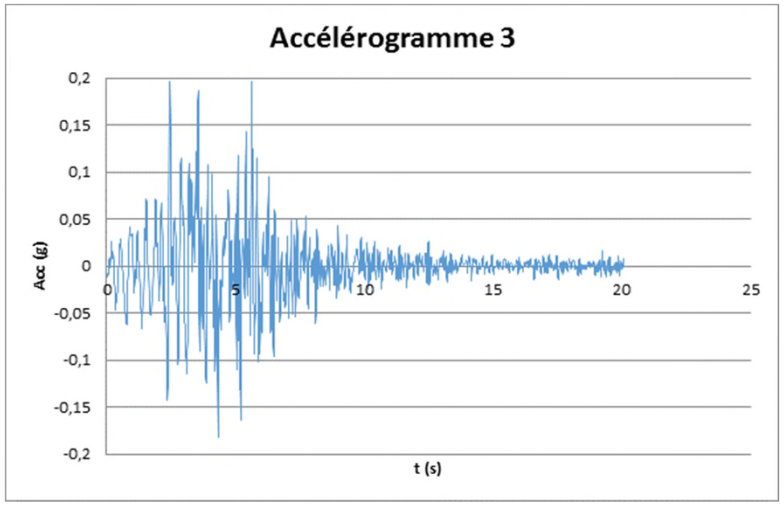
* d: residual horizontal displacement at the top of the wall; H: height of gravity wall.

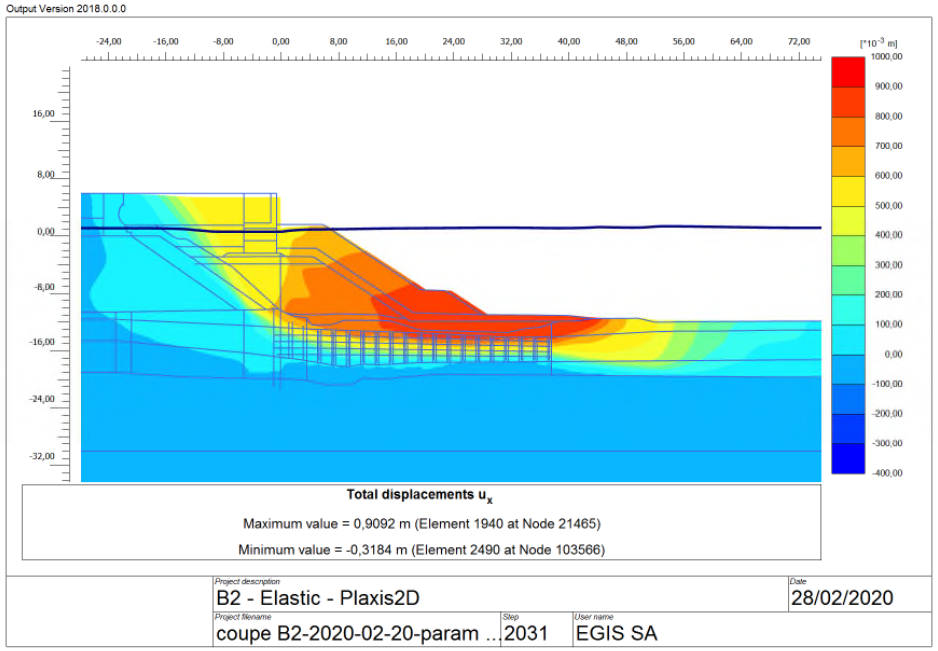
➔ Calculs Plaxis prenant en compte les sols traités par casing en jet grouting et par colonnes ballastées

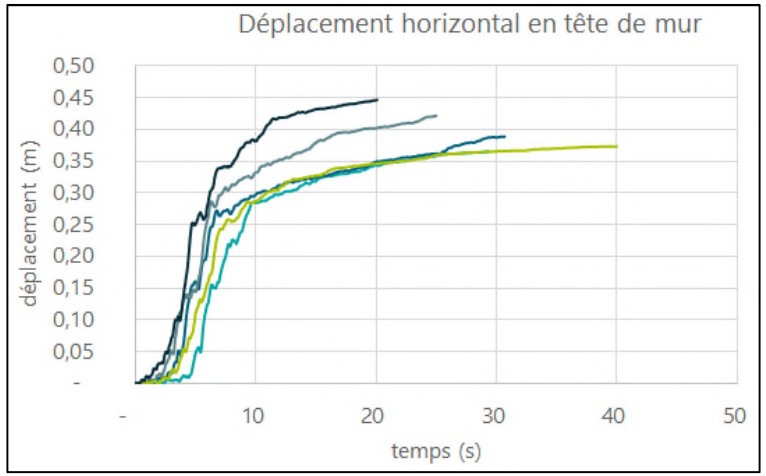
lois de comportement :

- Loi HSS pour les remblais et sédiments non liquéfiables ;
- Loi UBC3D pour les sols potentiellement liquéfiables.

Calculs dynamiques basés sur 5 accélérogrammes du type:



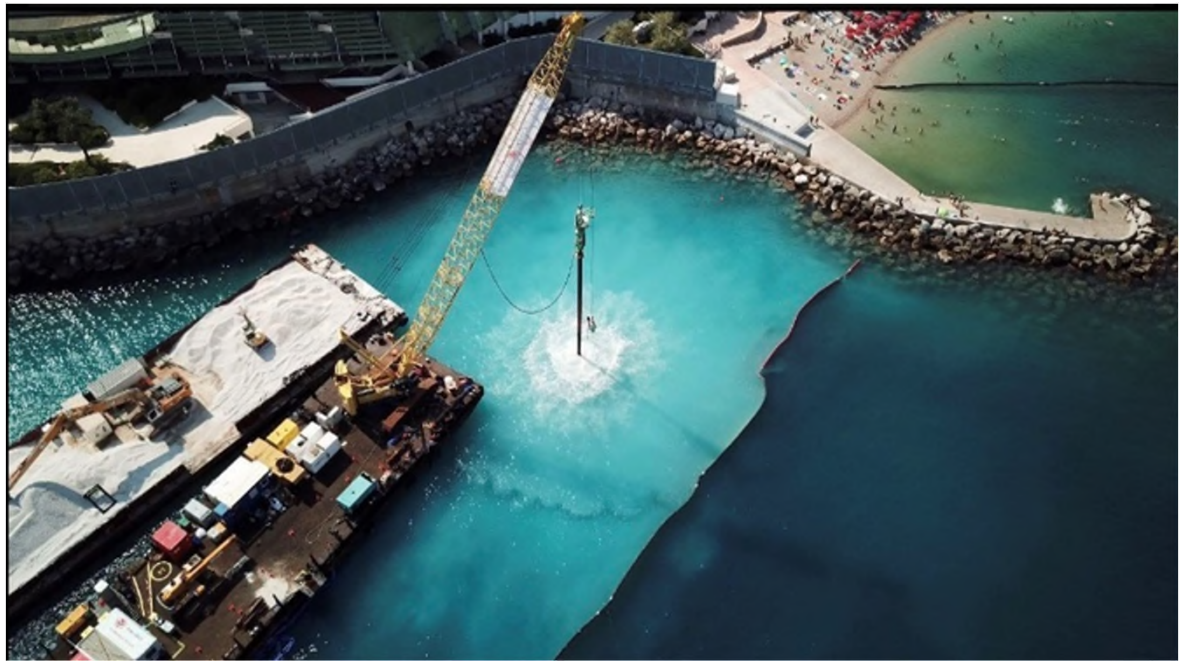


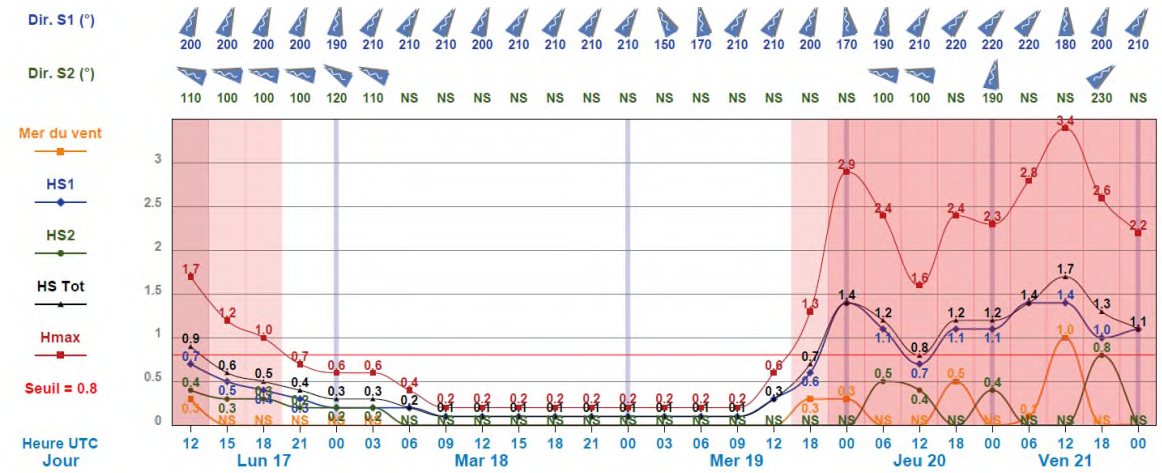


Enjeux environnementaux

- Présence d'un écosystème marin riche en matière de biodiversité.
- Présence d'espèces en danger qui sont protégées au niveau européen/international.

- Maitrise de la turbidité: écran anti-turbidité;
- Suivi acoustique des Cétacés : Mise en place d'un effaroucheur
- Pollution aquatique : minimiser le risque de fuite des équipements concernés : Présence de Kit anti-pollution (20L; 50L et 250L);
- Pollution en mer : Risque lors de l'avaitaillement;
- Nuisances sonores : zone sensible;
- Nuisances vibratoires;
- Déchets: collecte, tri et évacuation;
- Météo, etc.





Principe & Méthodologie d'exécution

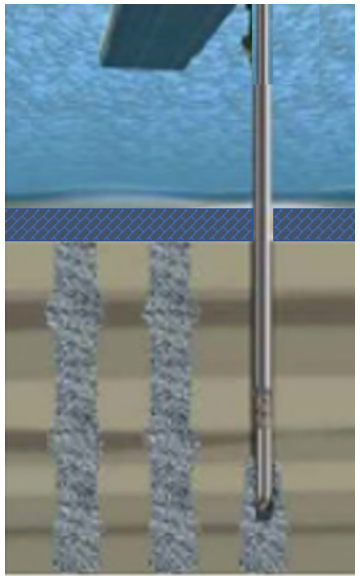
Principe: incorporer dans le terrain des matériaux granulaires compactés:

Bottom Feed

Les colonnes ballastées par voie maritime sont réalisées à l'aide d'un vibreur à double sas avec lançage à l'air et à l'eau, permettant de mettre en œuvre et d'acheminer le ballast au niveau de la pointe du vibreur.

Top Feed

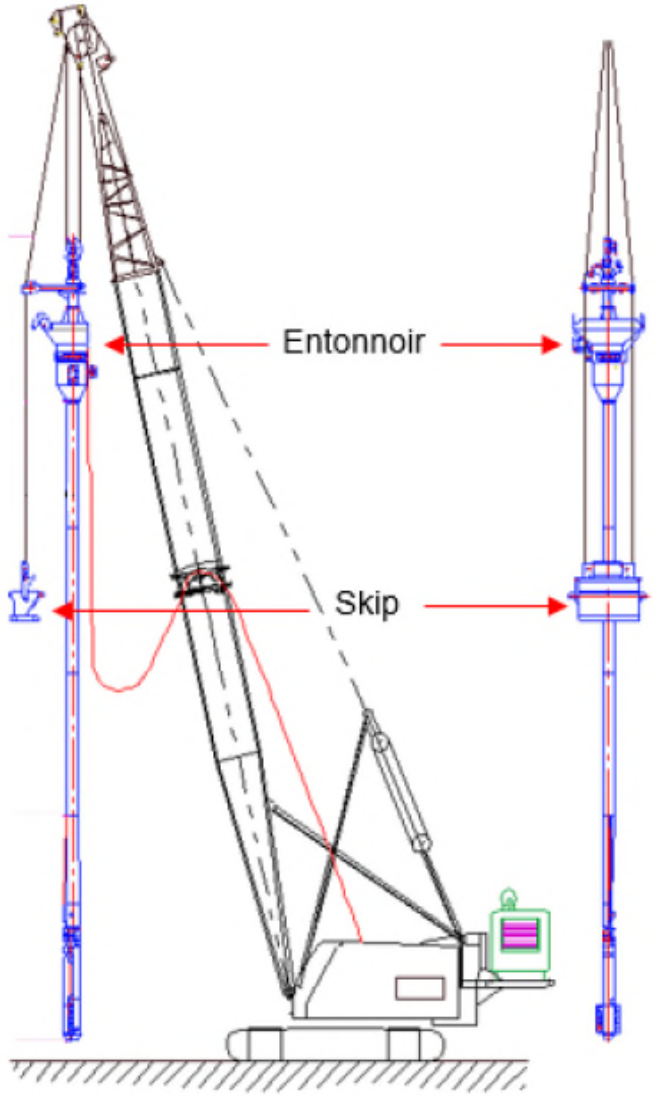
Le matériau est préalablement mis en place. C'est ce matériau qui sera incorporé dans le terrain à densifier.



Réalisation des colonnes ballastées

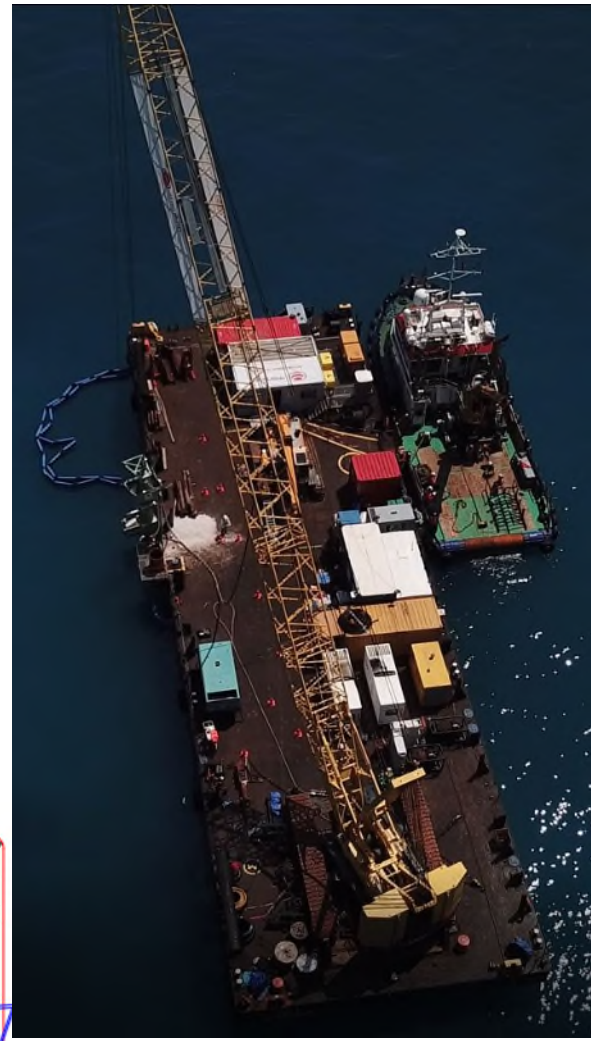
- **Objectif:**
  Améliorer la cohésion Cu des matériaux mis en place;
  Augmenter le facteur de sécurité FS pour limiter le risque lié à la liquéfaction en cas d'évènement sismique.

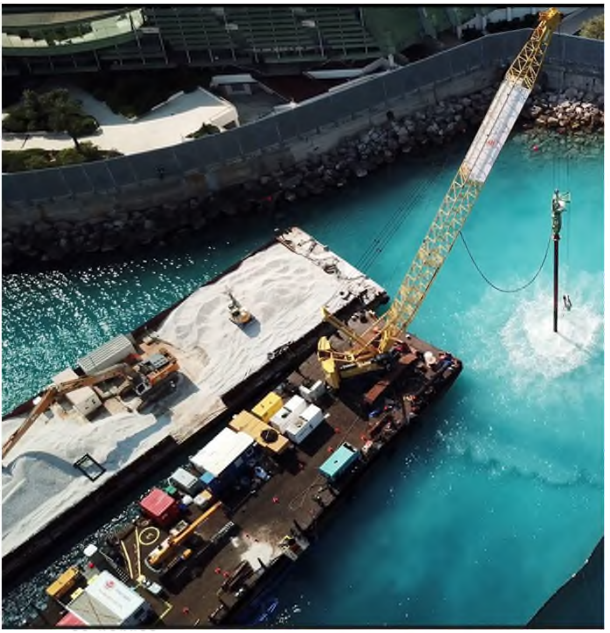
- **4 étapes :**
  - Réalisation des colonnes ballastées en « **bottom feed** » (phase 1)
    Mise en œuvre du ballast selon maillage primaire → **taux d'incorporation** de l'ordre de **10%.**
  - Contrôle et réception
    Campagne de CPT 14 jours après la fin du traitement;
    Contrôle de la bathymétrie.
  - Réalisation des colonnes ballastées en « **top feed** » (phase 2)
    Mise en œuvre en inter-maille → **taux d'incorporation** de l'ordre de **25%.**
  - Contrôle et réception
    Campagne de CPT 14 jours après la fin du traitement;
    Contrôle de la bathymétrie.

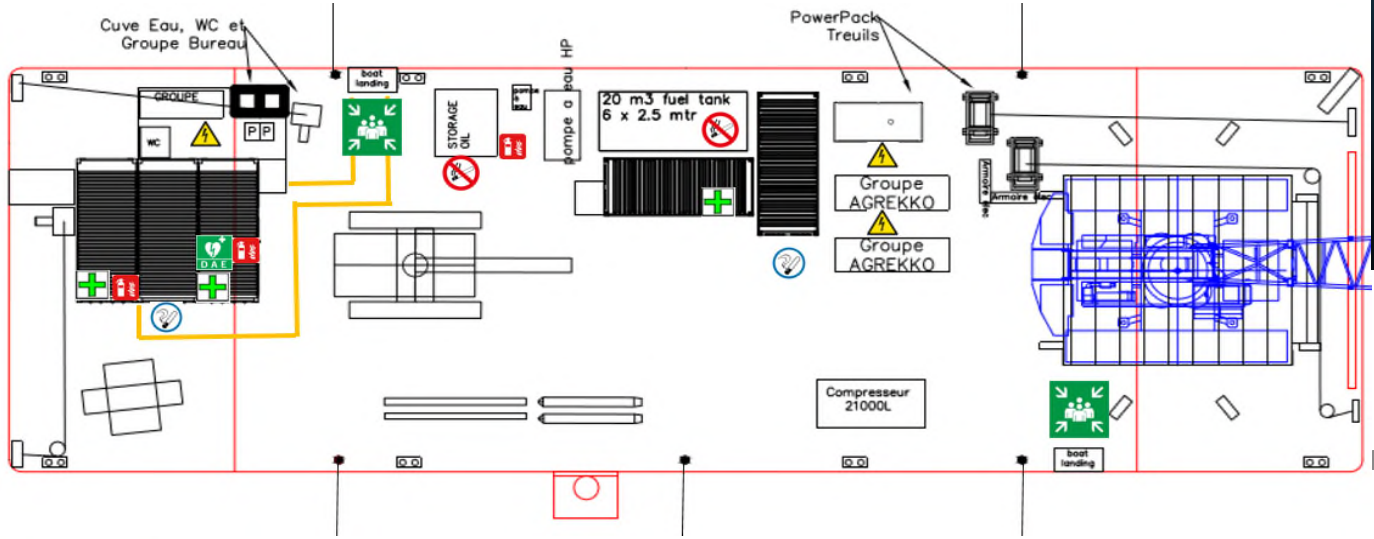


Les moyens utilisés

- 1 barge principale (55m x 17m x 3,6m);
- 1 barge de stockage de cailloux (70m x 20m x 4,3m);
- 1 multicat & 1 remorqueur;
- 1 grue Kobelco CKE 2750G (Longueur de flèche = 48.8m);
- 1 grue de manutention télescopique 40T;
- 1 VREX (vibreur, entonnoir, tube cailloux) + 2 vibreurs électriques V23;
- 1 antenne GPS;
- 3 vibreurs V48 (utilisés en phase 2 uniquement);
- 1 Grue télescopique sur la barge B2 – G3;
- 1 Pelle 13T Komatsu - P1.







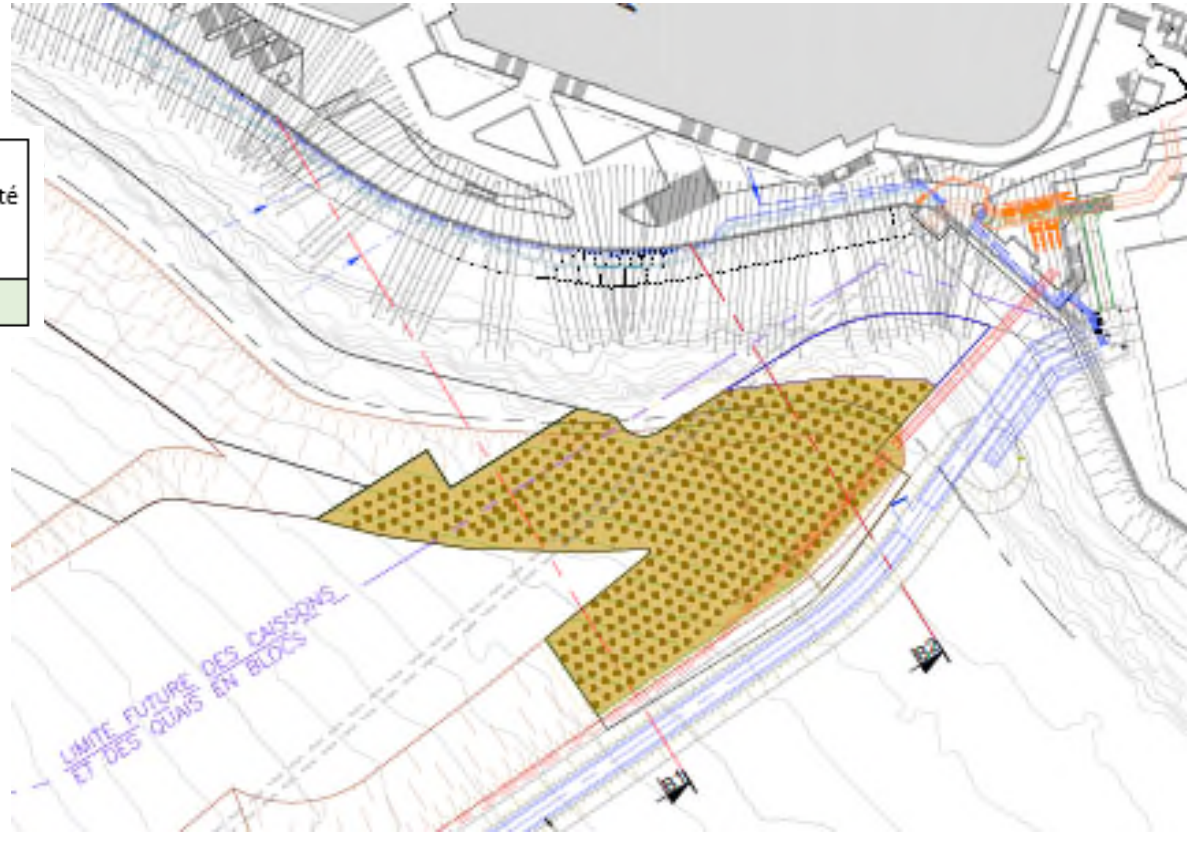
Le phasage des travaux de colonnes ballastées

Réalisation des Colonnes Ballastées (bottom feed) dans la zone du Larvotto

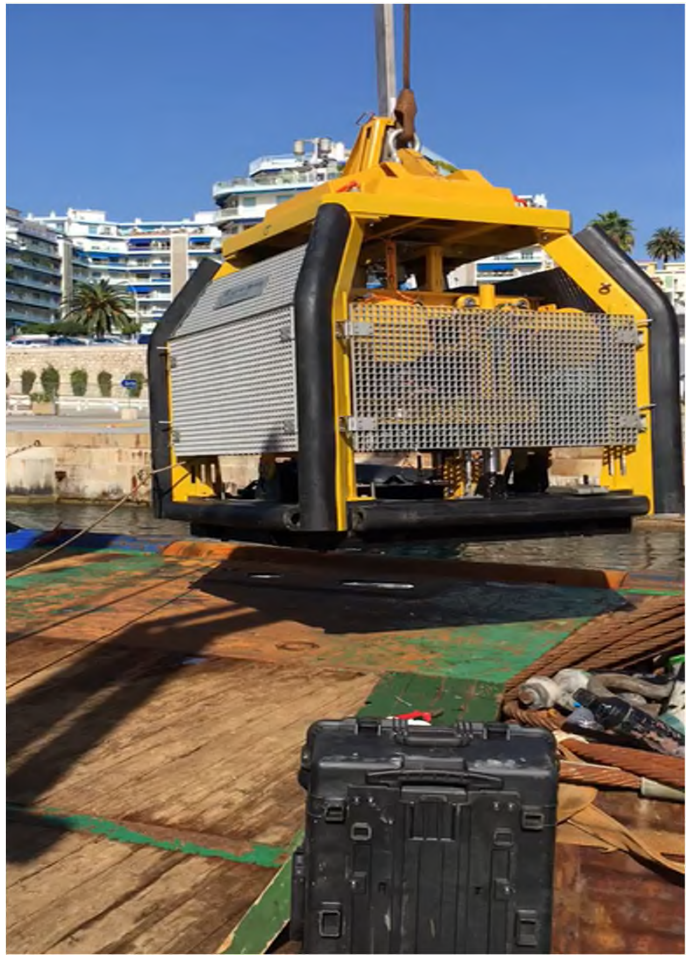
N TOTAL CB théorique (u)	N TOTAL CB réalisées (u)	CB non-réalisées (FAT) (u)	CB non-réalisées (u)	N TOTAL linéaire foré (ml)	N TOTAL linéaire traité (ml)	Quantité ballast consommée (m3)	Quantité ballast consommée (T)	Taux d'incorporation calculé (suivant méthode validé par constructeur et MOE)
818	785	32	1	6438,69	6007,67	2461	4183,7	12%

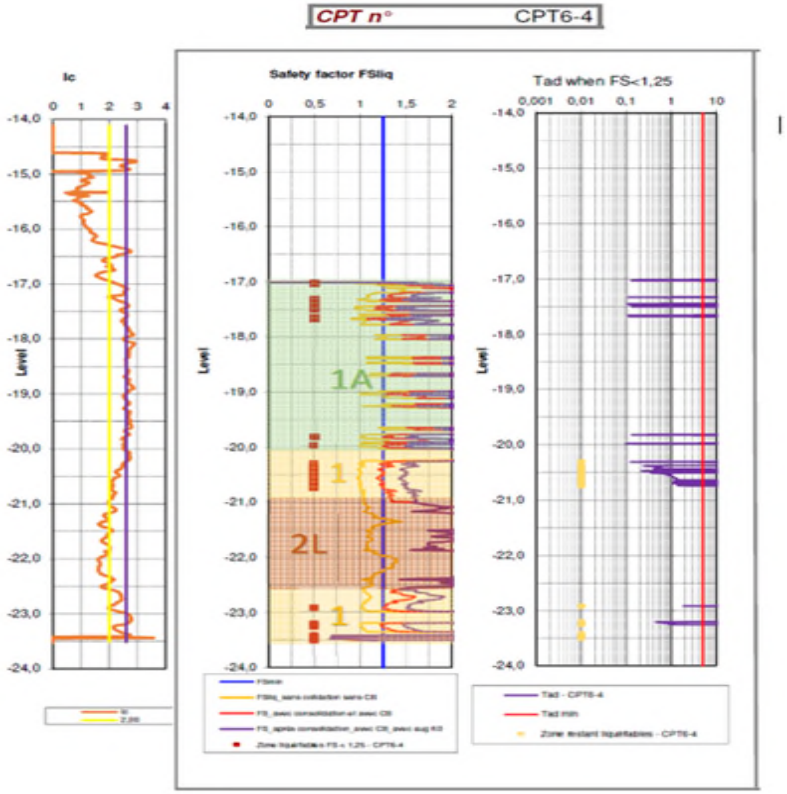
Réalisation des Colonnes Ballastées (Top feed) dans la zone du Larvotto

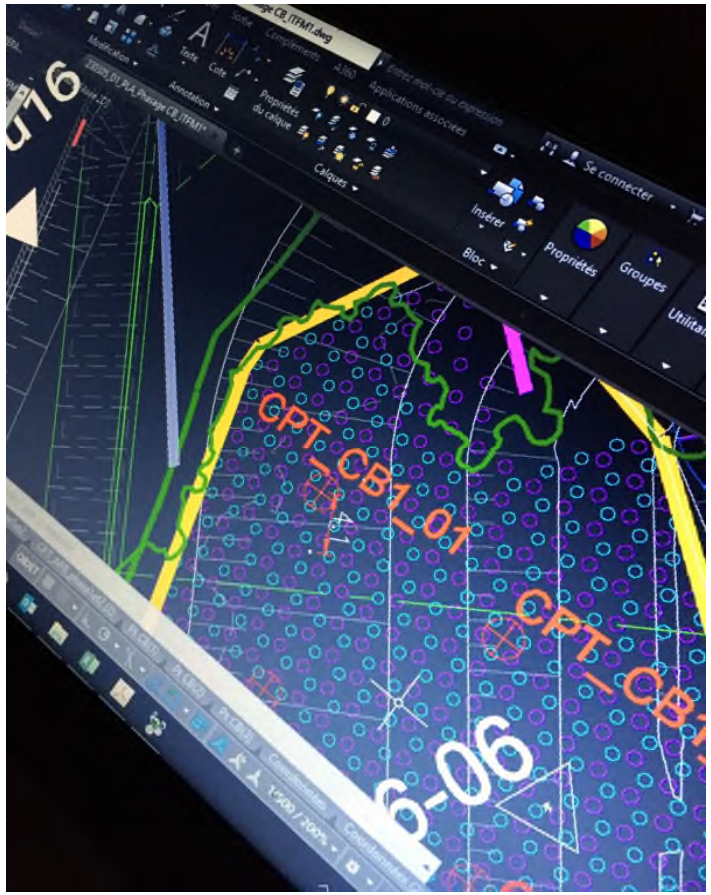
N TOTAL CB théorique (u)	N TOTAL CB réalisées (u)	CB non-réalisées (Enrochement)(u)	N TOTAL linéaire foré (ml)	N TOTAL linéaire traité (ml)
368	366	2	3097,27	3078,87



Réception &Test & Contrôle







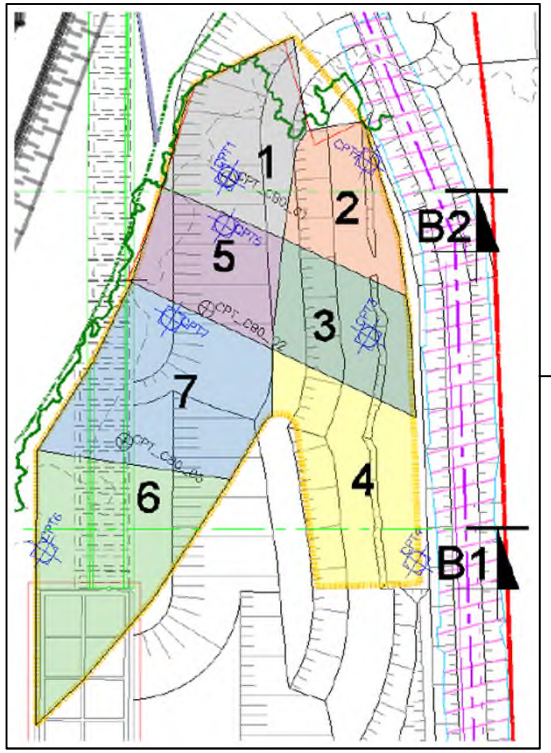
Zone traitée par colonnes ballastées réceptionnée sur la base des CPT et des taux d'incorporations:

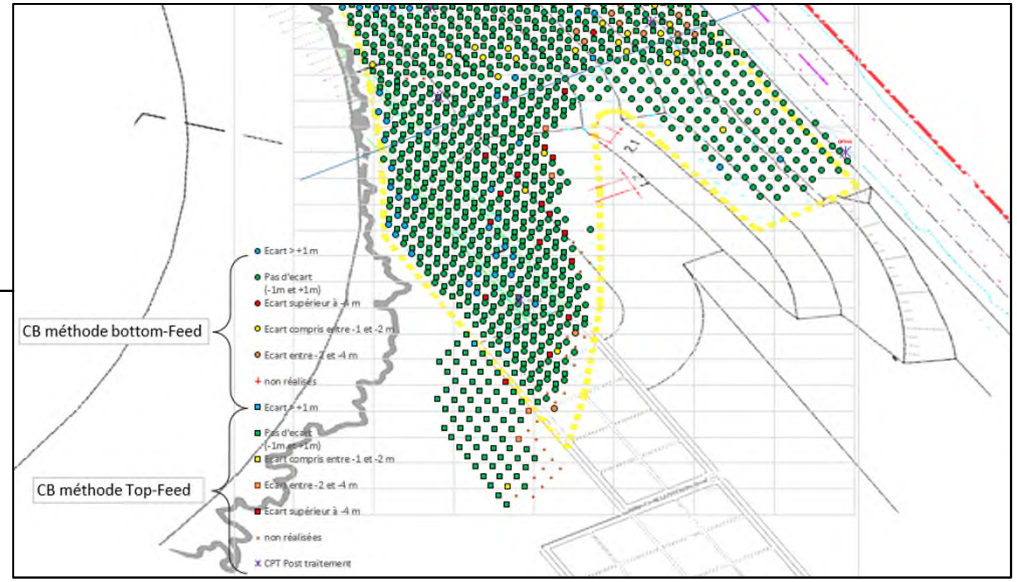
➔ Fs>1,25 au droit de la plate-forme

➔ Objectifs de cohésion non drainée atteints

Contrôle des travaux (MOE)

- Contrôle du niveau du substratum;
- Contrôle du taux d'incorporation (Bottom feed);
- Analyse des sondages CPTu (3 CPTu pré-traitement et 7 CPTu post traitement).





<u>Réception des travaux</u>

Facteur de sécurité vis-à-vis de la non-liquéfaction Fs > 1,25 (analyse NCEER)

Amélioration de la cohésion non-drainée « Cu » => Vérification la stabilité générale

LA VIBROCOMPACTION

Conception
Travaux
Contrôles

03.

Objectifs du traitement par vibrocompaction des remblais :

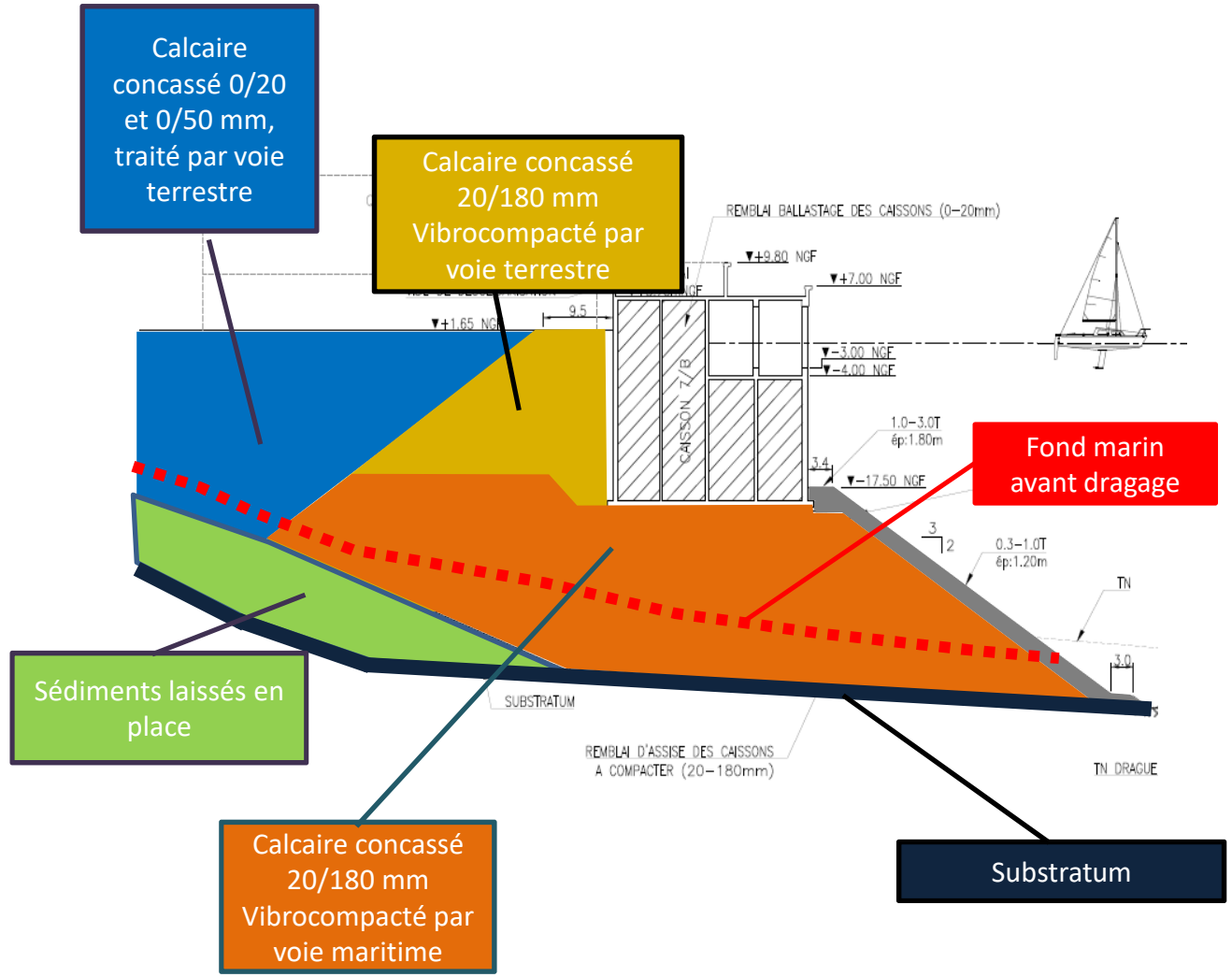
- Respecter les <u>critères d'interface</u> entre les maîtrises d'œuvre et les <u>besoins en conception</u> du projet:

RAC et RTPT

- ✓ Em=17,5 MPa (calage loi HSM);
- ✓ Phi'=46°;
- ✓ kh et kv>1.10^{-3} m/s.

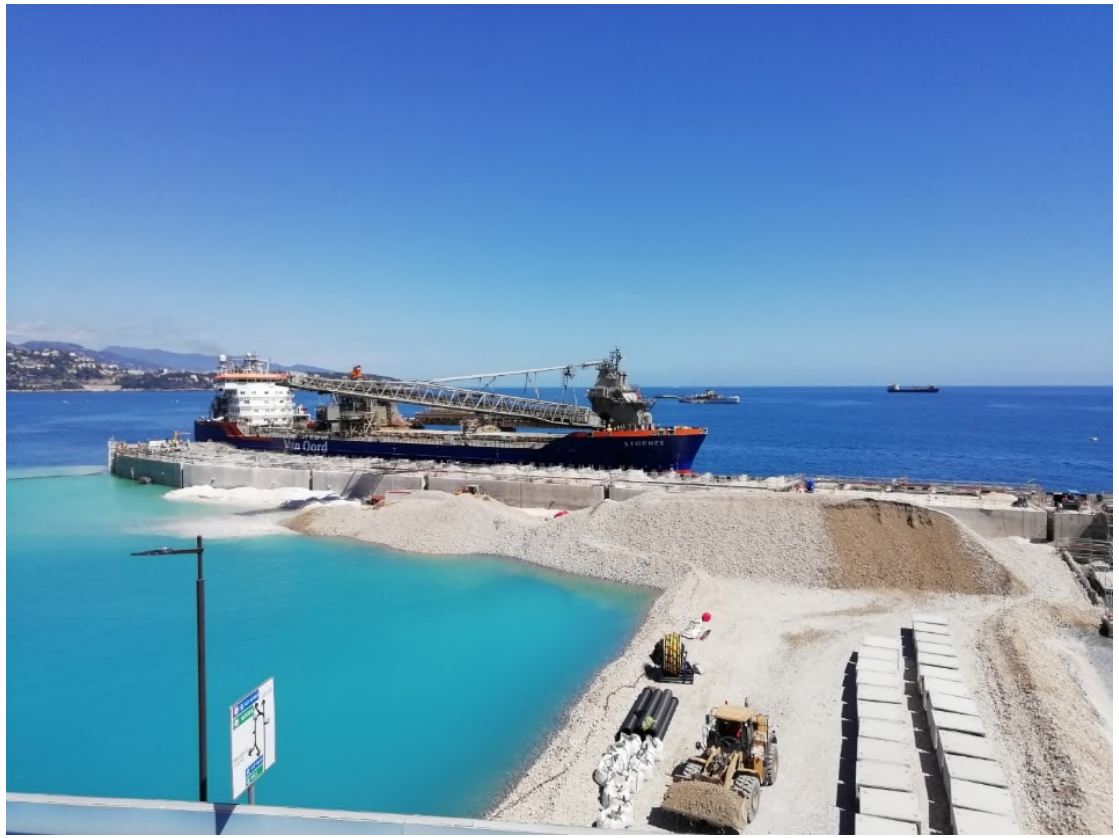
RTPC

- ✓ Em=15 MPa sur les 3 m supérieurs puis 10 MPa (calage loi HSM);
- ✓ Phi'= 33° sur les 3 m supérieurs puis 30° .



Contraintes pour le traitement par vibrocompaction :

- Première phase de vibrocompaction par voie maritime, à grande profondeur;
- Granulométrie du matériau;
- Énergie à mettre en place fonction de l'état initial de densité relative des matériaux.



Principe de conception pour déterminer l'énergie à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs de performance des matériaux:

Méthode:

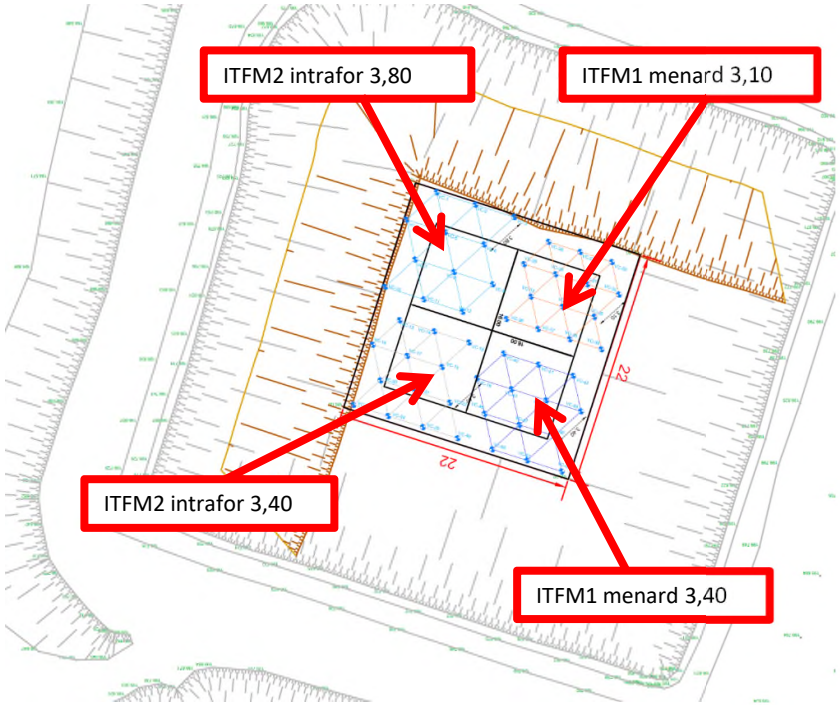
- Planche d'essai – traitement par voie terrestre ;
- Planche de convenance sur projet – traitement par voie maritime;
- Travaux de vibrocompaction;
- Contrôles et réception.

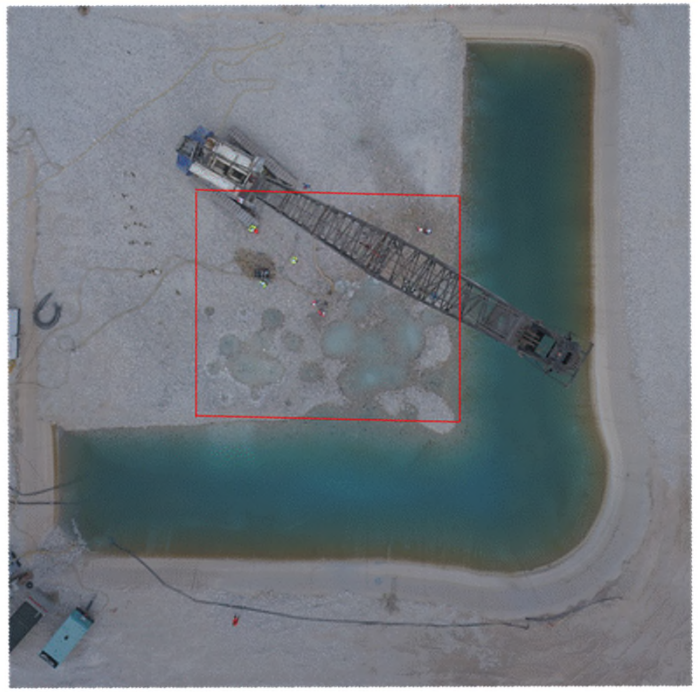
Objectifs - déterminer:

- Le maillage du vibrocompactage;
- Les paramètres de vibrocompactage:
  ➔ énergie de vibrocompactage à mettre en œuvre

- Le respect des objectifs de performance des matériaux;
- Le tassement post-traitement.

Réalisation d'une planche d'essai (en carrière)





Objectif de déterminer notamment, avant et après vibrocompactage :

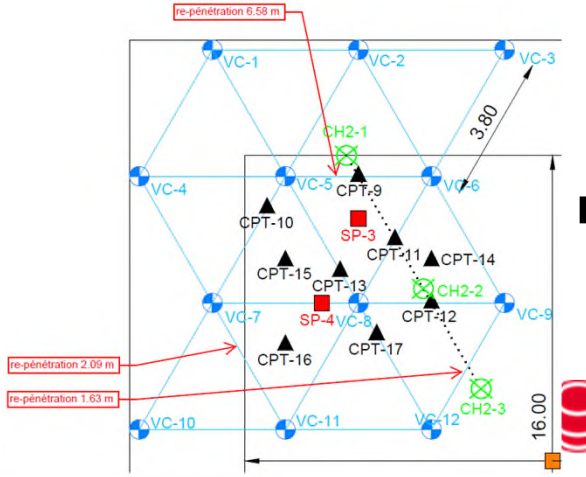
- La densité relative;
- Les caractéristiques géotechniques (qc, Em, Vs, etc.);
- Le tassement post-traitement.

➔ Campagnes de reconnaissances (géotechnique, géophysique, etc.) pour caractériser les matériaux :

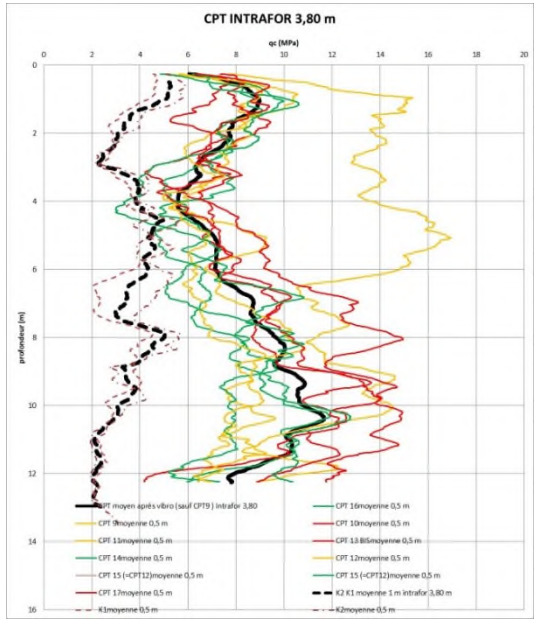
- avant vibrocompactage;
- Après vibrocompactage, pour chaque maille de traitement.

Prise en compte de l'énergie mise en oeuvre

4 mailles testées

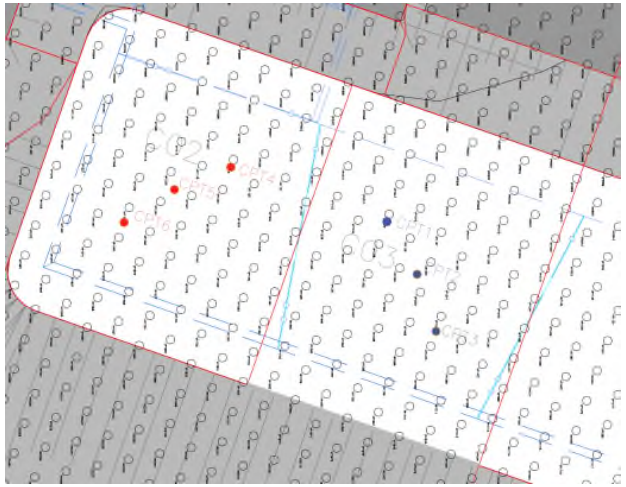


Reconnaissances

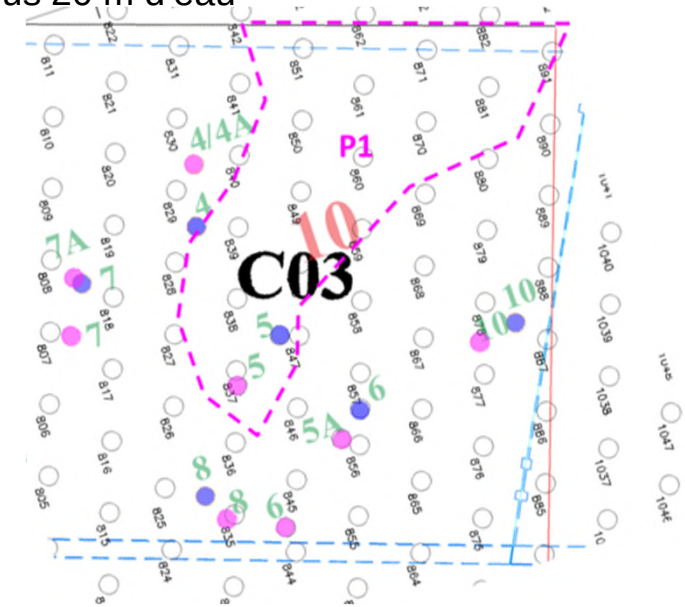


Conception vibrocompactage

Réalisation d'une planche de convenance sur site (C02 et C03)

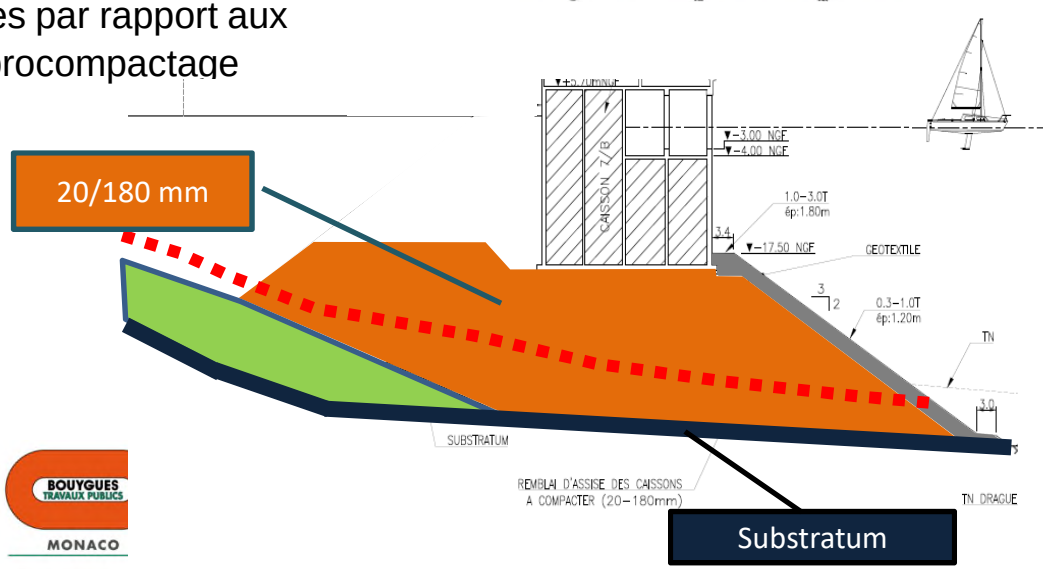


Épaisseur >25 m de matériaux, sous 20 m d'eau



CPT avant vibro
CPT après vibro

Difficulté: maitriser l'implantation des sondages par rapport aux points de vibrocompactage

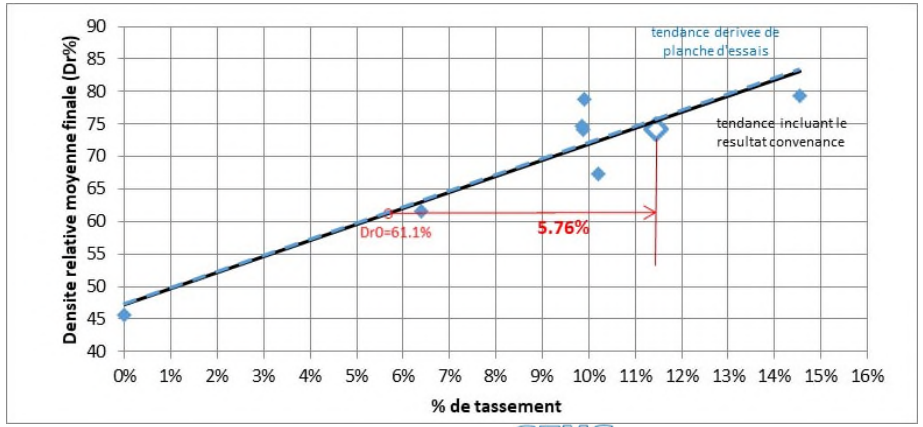


Objectif de fiabiliser :

- Les méthodes et moyens utilisés;
- Les paramètres de vibrocompactage:
  - Maillage ;
  - Temps de passe ;
  - Critère d'ampérage.
- Le tassement post-traitement;
- Profondeur max: 55 m (épaisseur de matériaux jusqu'à 34m).

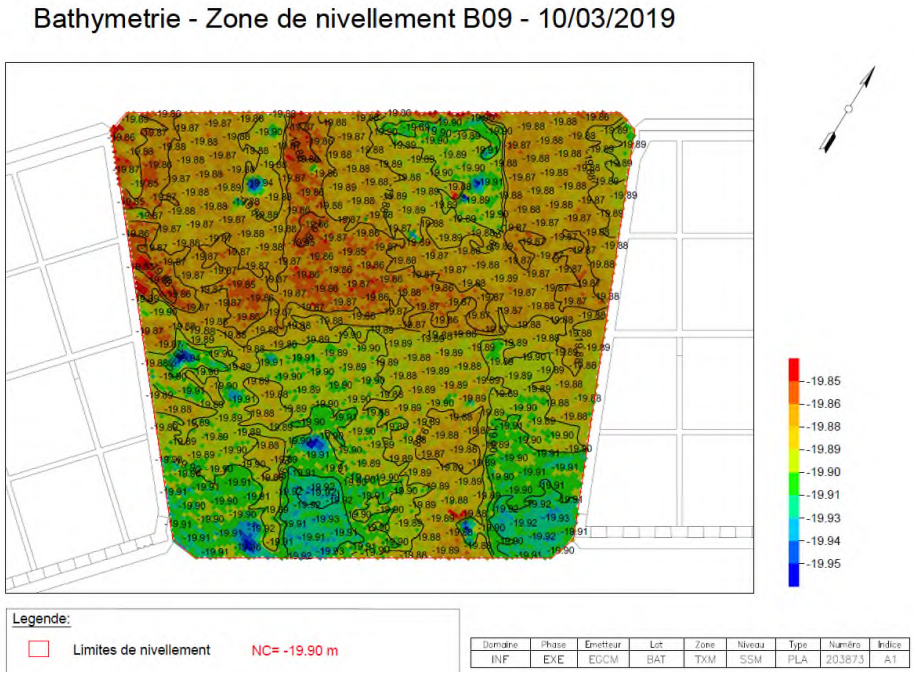
Vérifier :

- L'atteinte des performances des matériaux;
- Les profils d'assises théoriques avant et après traitement;
- Le nivellement des assises;
- Les densités relatives initiale et finales.

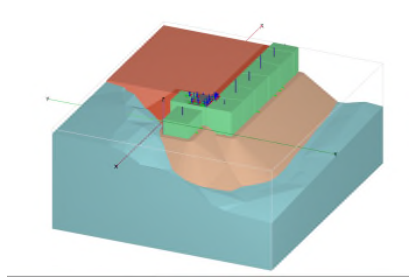


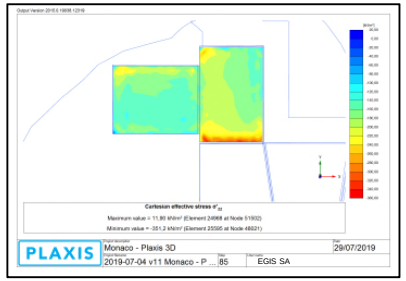
Conception du plan de consigne de pose des caissons

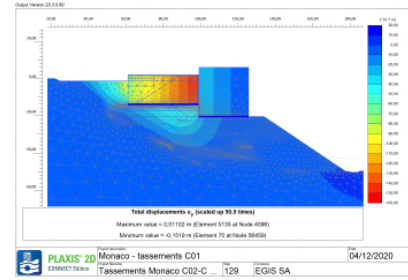
1. Vibrocompaction

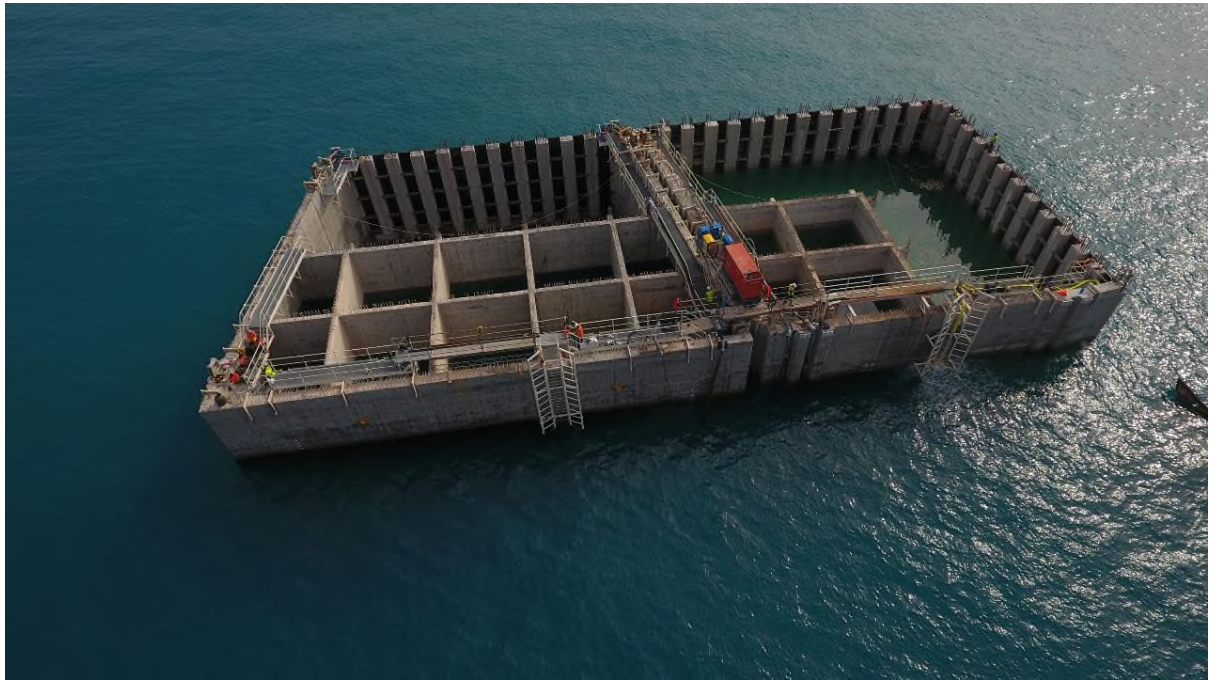


2. Couche de réglage granulaire ➔ caler l’altimétrie des caissons, cote déterminée sur la base de calculs aux éléments finis (Plaxis 2Det 3D)





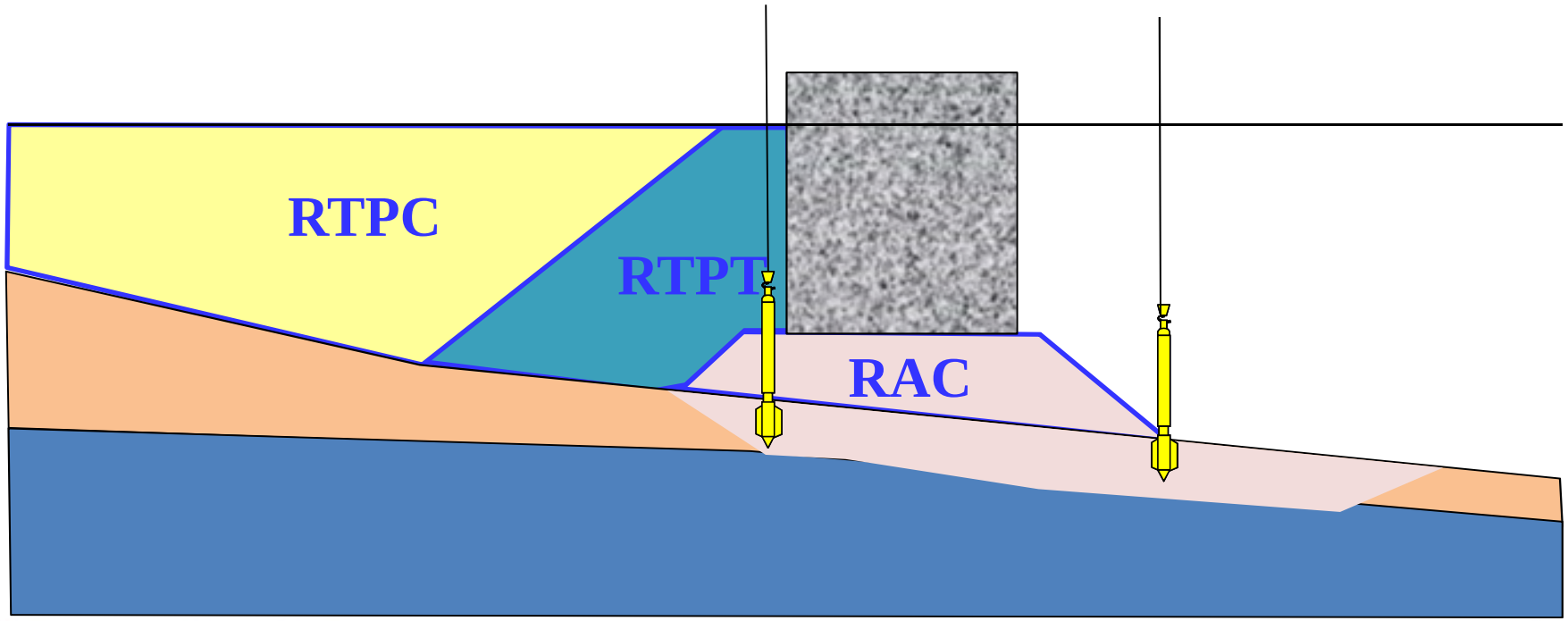




ANSE DU PORTIER PRINCIPAUTÉ DE MONACO
BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS MONACO
Shared innovation
INFRASTRUCTURE MARITIME
egis
menard

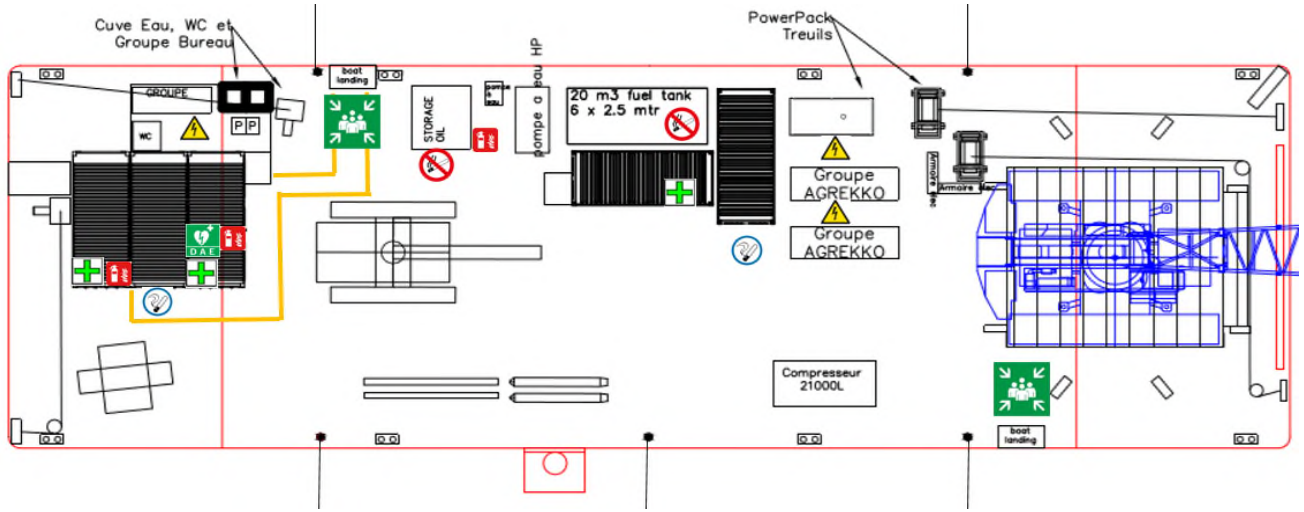
La réalisation des assises des caissons

- Mise en place d'un **remblai d'assise** en grave calcaire **20-180mm** de façon gravitaire
- Densification des remblais d'assise des caissons (RAC) ainsi qu'une partie des remblais du terre-plein technique (RTPT) par **travaux maritimes de vibrocompactage**;



Les moyens utilisés - C10 à C17

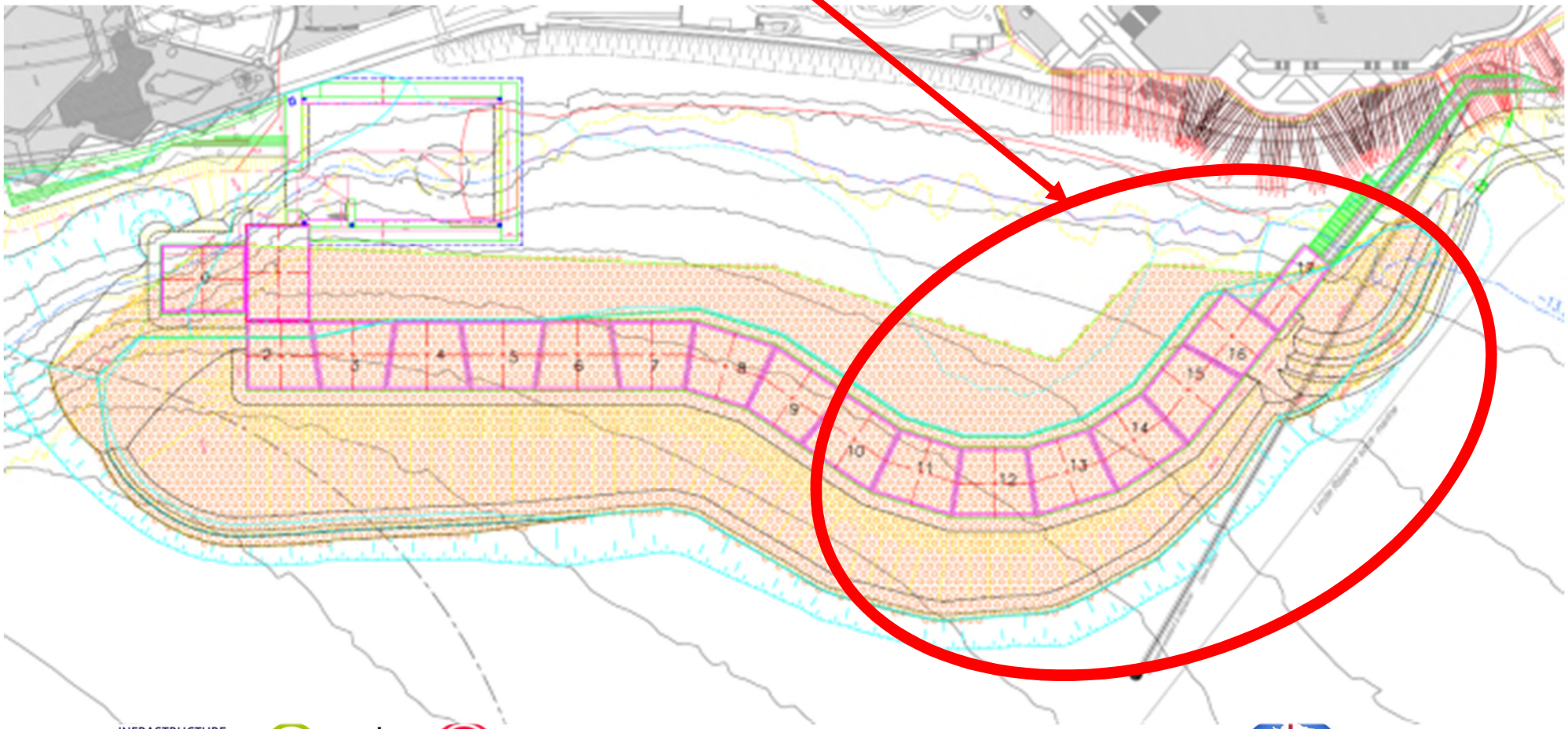
- 1 barge principale (55m x 17m x 3,6m);
- 1 multicat;
- 1 grue Kobelco CKE 2750G (Longueur de flèche = 48.8m);
- 1 grue de manutention télescopique 40T - G2;
- 1 antenne GPS;
- 3 vibreurs V48.



Réalisation de la Vibrocompaction du RAC

Désignation	C10 à C16	
Volume de Traitement	162133	m³
Aire de Traitement	13198	m²
Nombre de Points	1 120	
Longueur de Traitement	315 158	ml

Profondeur max: 25m



Principe & Méthodologie d'exécution

Principe: Compactage en profondeur par la pénétration d'aiguilles vibrantes.

3 phases:

- **Position**

- **Fonçage**

  Vibreur mis sous tension;

  Aiguille mise en position;

  Fonçage sous son propre poids;

  Vitesse de descente contrôlée par l'opérateur;

  Fonçage arrêté à l'altimétrie de l'arase inférieure.

- **Compactage**

  Réalisé en remontant progressivement l'aiguille vibrante par passes successives.

  Critère de compaction :

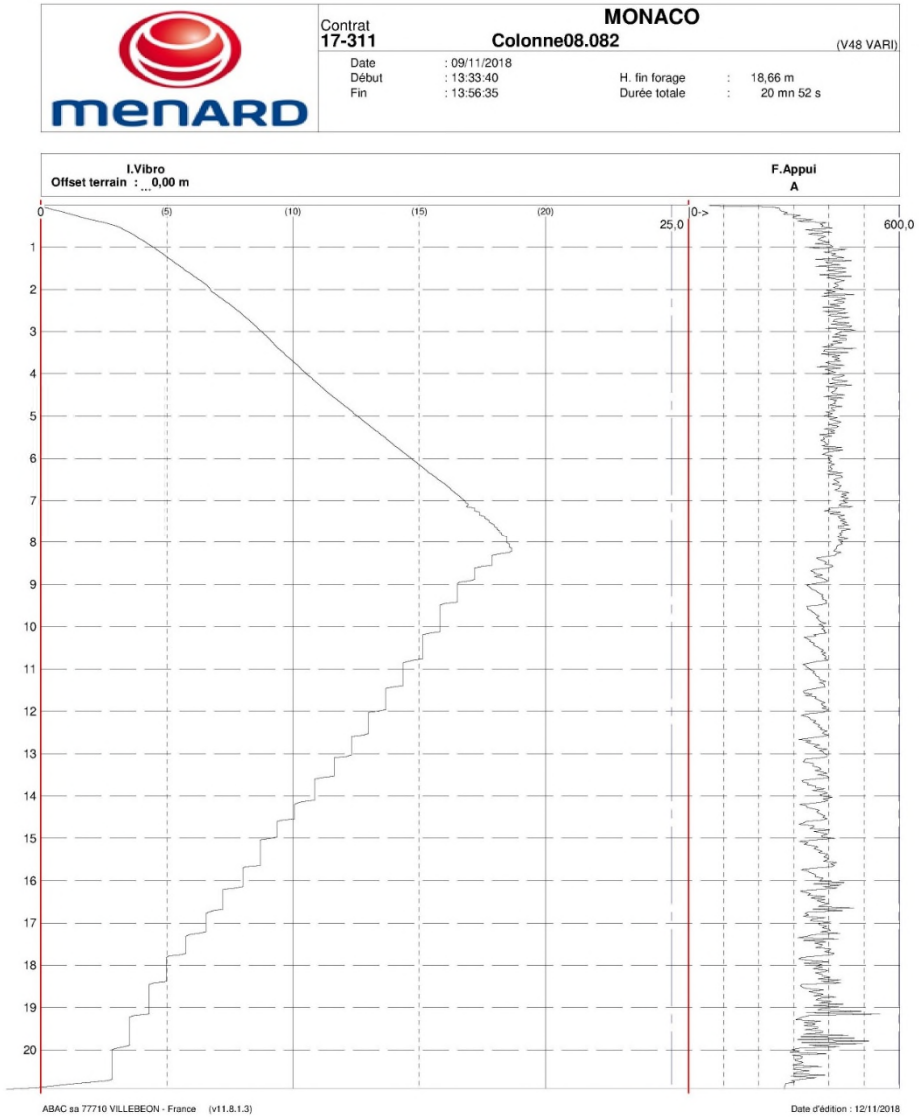
  - temps de station : 30 à 40s suivant la profondeur ;

  ou

  - Ampérage du vibreur (290A) atteint avant la fin du temps de station.

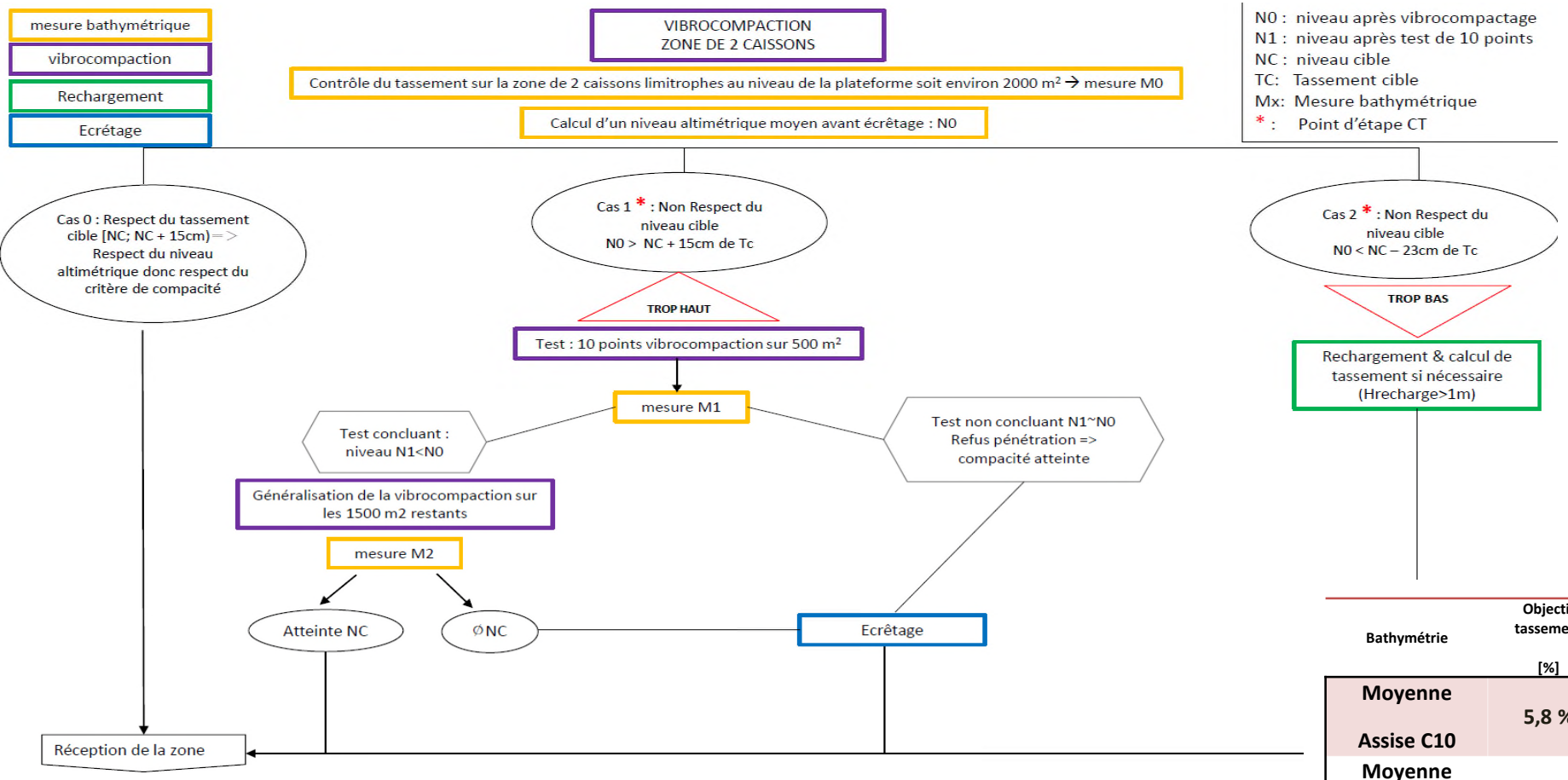
  Remontée de l'aiguille par passe (70cm).

- **Point de traitement suivant**



Réception des travaux

Calcul du niveau altimétrique post-compaction moyen qui sera comparé au niveau cible à atteindre sur environ 2000 m² soit 2 caissons:



Bathymétrie	Objectif tassement [%]	Tolérance haute [%]	Tolérance basse [%]	Tassement réel [%]	Conformité	Validation E_m=17,5 MPa
Moyenne Assise C10	**5,8 %**	4,64 %	7,54 %	**7.10*%**	**Oui**	Oui
Moyenne Assise C11	**5,8 %**	4,64 %	7,54 %	**6,40*%**	**Oui**	Oui

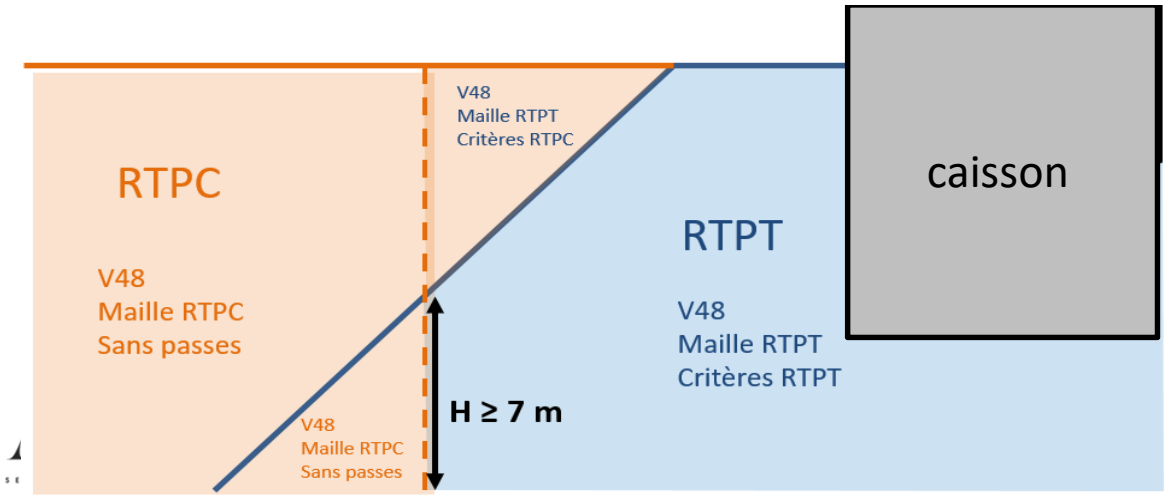
Les travaux de vibrocompaction - onshore

- Objectif: **Densifier, Améliorer** RTPT et RTPC.
- **L'objectif** étant de respecter des compacités (résistance de points Qc) minimales)

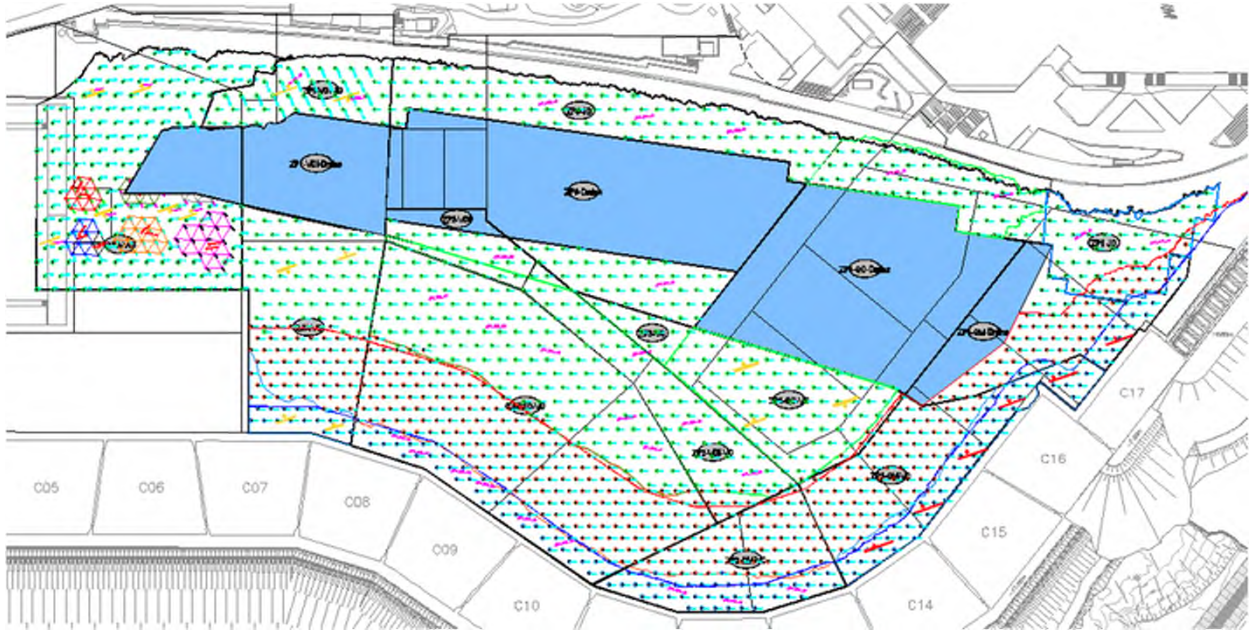
- **2 phases**
  - Planche d'essai – Terrestre (tests des Mailles et méthodologie)
  - Travaux de vibro-compactage

RTPT : Maille triangulaire 3,80 m

RTPC : Maille triangulaire 4,50 m

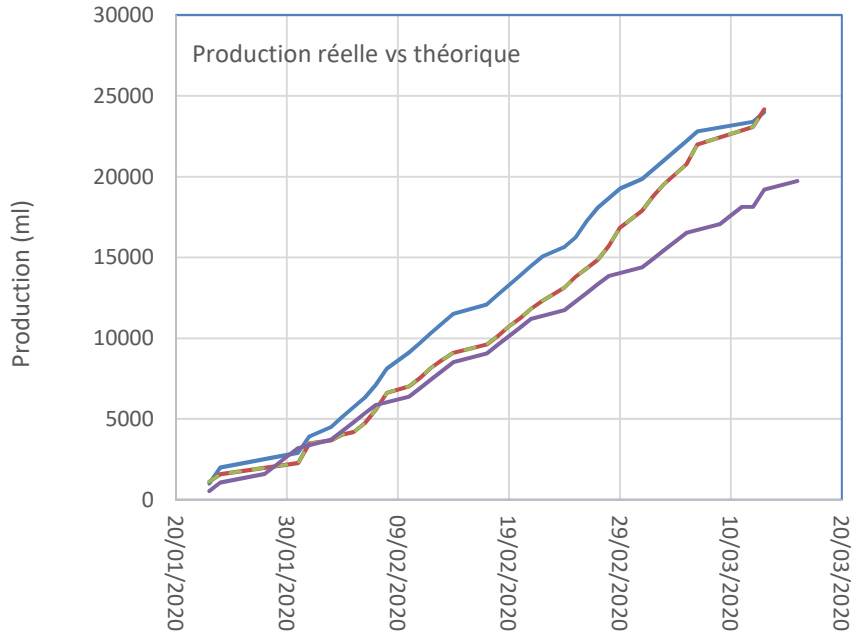


	Aire de traitement (m²)	Nombre de points réalisé (u)	Linéaire réel (ml)
Total	21 007	1 506	26 183,79



Les moyens utilisés

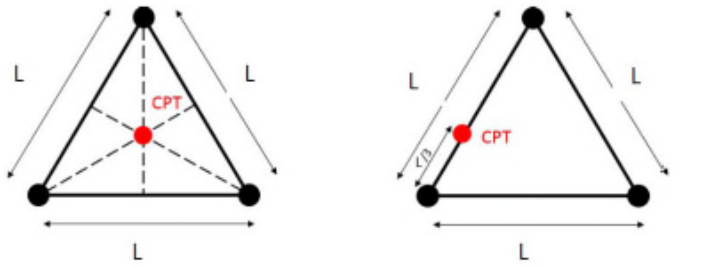
- 1 grue à flèche treillis Hitachi SUMITOMO SCX2800;
- 1 enregistreur de paramètres spécifique aux travaux de vibrocompaction;
- 1 vibreur type V48 + 1 vibreur supplémentaire;
- 1 groupe électrogène;
- 1 compresseur;
- 1 pompe de lançage à eau haute pression.



Critères de réception

- Réception par superficie de 1000 m² avec la réalisation de CPT (2 CPTs) sur la hauteur de traitement. La réception des travaux de vibrocompaction se fera par :

  - 1 CPT en centre de maille / 500m²,
  - 1 CPT en tiers de maille / 500m².



  – Critère zone RTPC

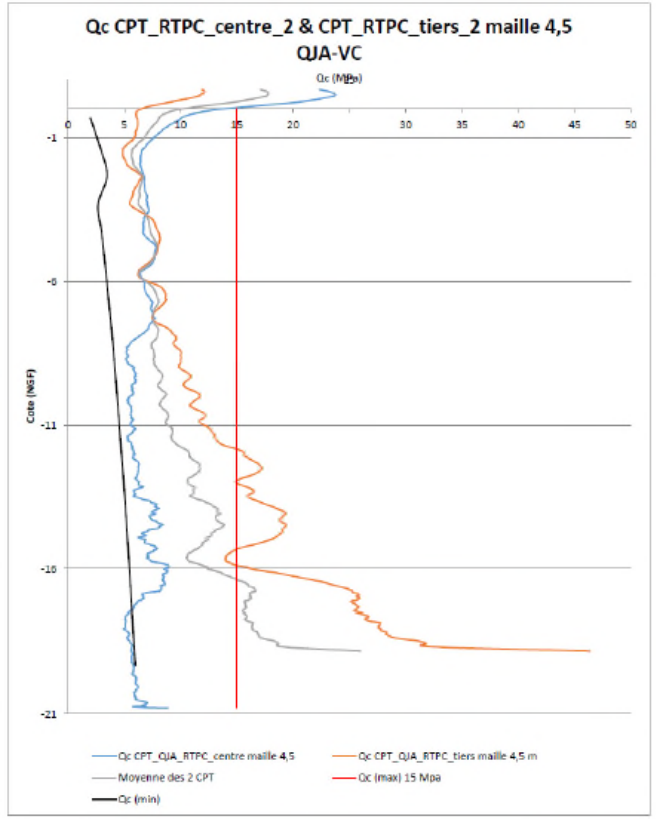
- Traitement réalisé avec un maillage triangulaire de 4,50m
- Un critère minimum et maximum sont à respecter

  – Critère zone RTPT

- Traitement réalisé avec un maillage triangulaire de 3,80m
- Un critère minimum est à respecter

Réception

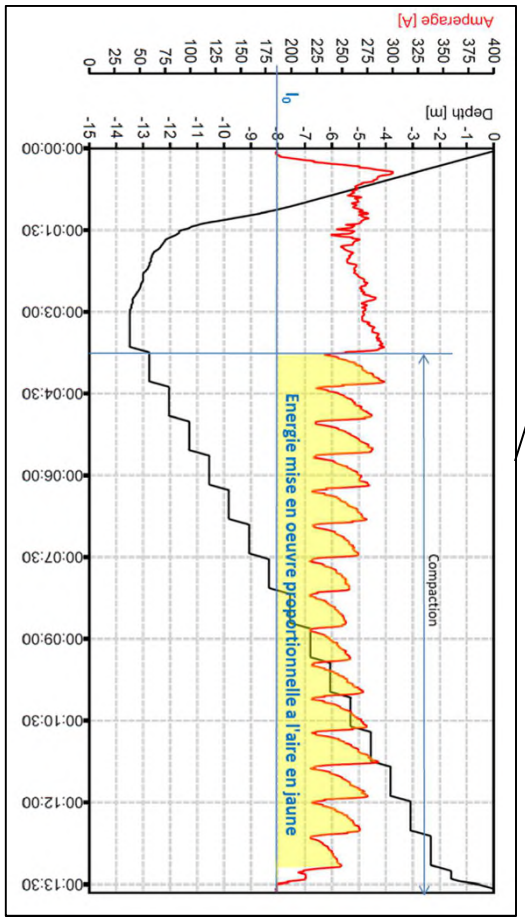
	Position	Z haut CPT (NGF)	Z bas CPT (NGF)	Z fin de VC (NGF)	Linéaire CPT (ml)	Remarques
CPT_QJA_centre_1	Centre de maille	1,67	-15,98	-18,41	17,65	Refus prématuré à -15,98 NGF
CPT_QJA_tiers_1	1/3 de maille	1,76	-19,84	-20,01	21,60	Profondeur de VC atteinte
CPT_QJA_centre_2	Centre de maille	0,70	-20,80	-19,93	21,50	Profondeur de VC atteinte
CPT_QJA_tiers_2	1/3 de maille	0,90	-18,82	-20,13	19,72	Refus prématuré à -18,82 NGF

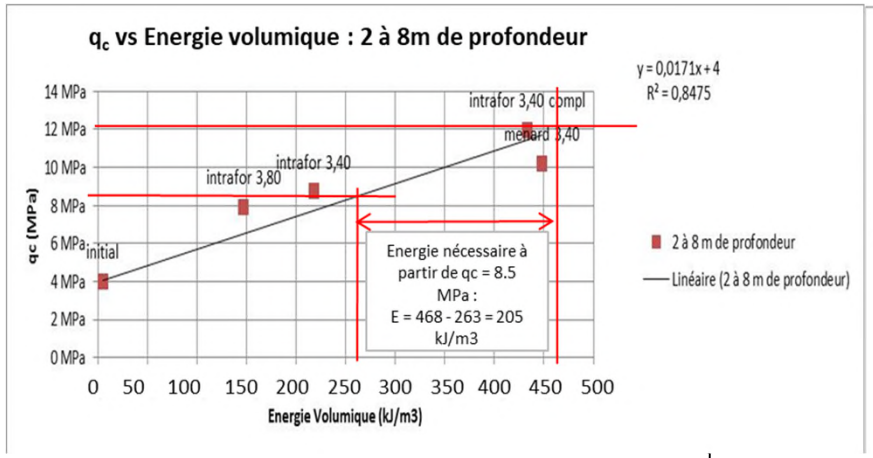


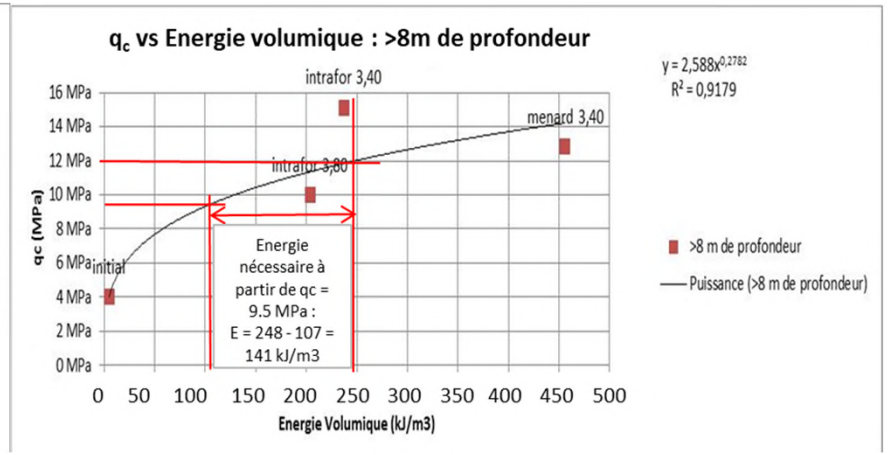
$q_{cunique} = 9{,}66\ MPa < q_{c,max}$

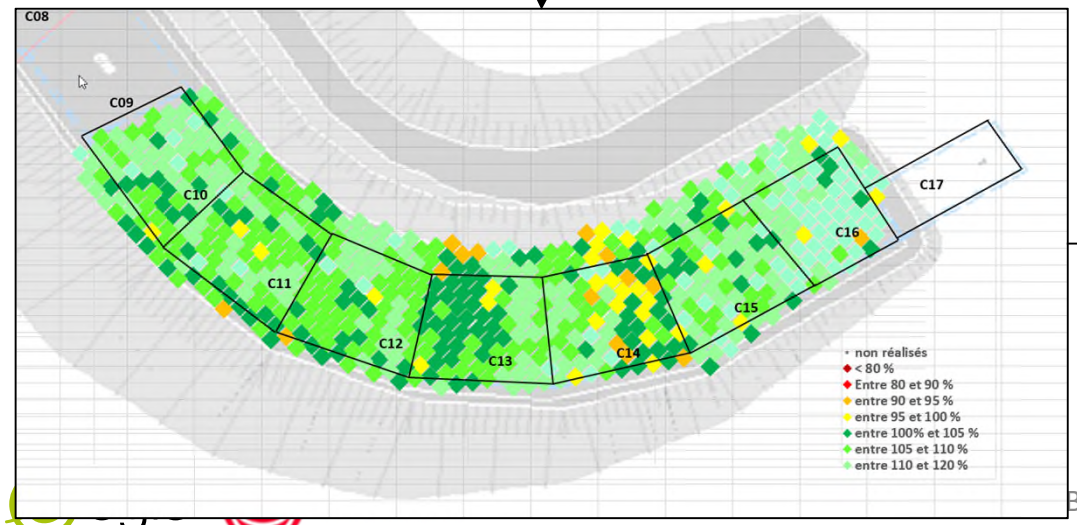
Contrôle des travaux (MOE)

Contrôle des paramètres de vibro-compaction ➔ **analyse énergétique**





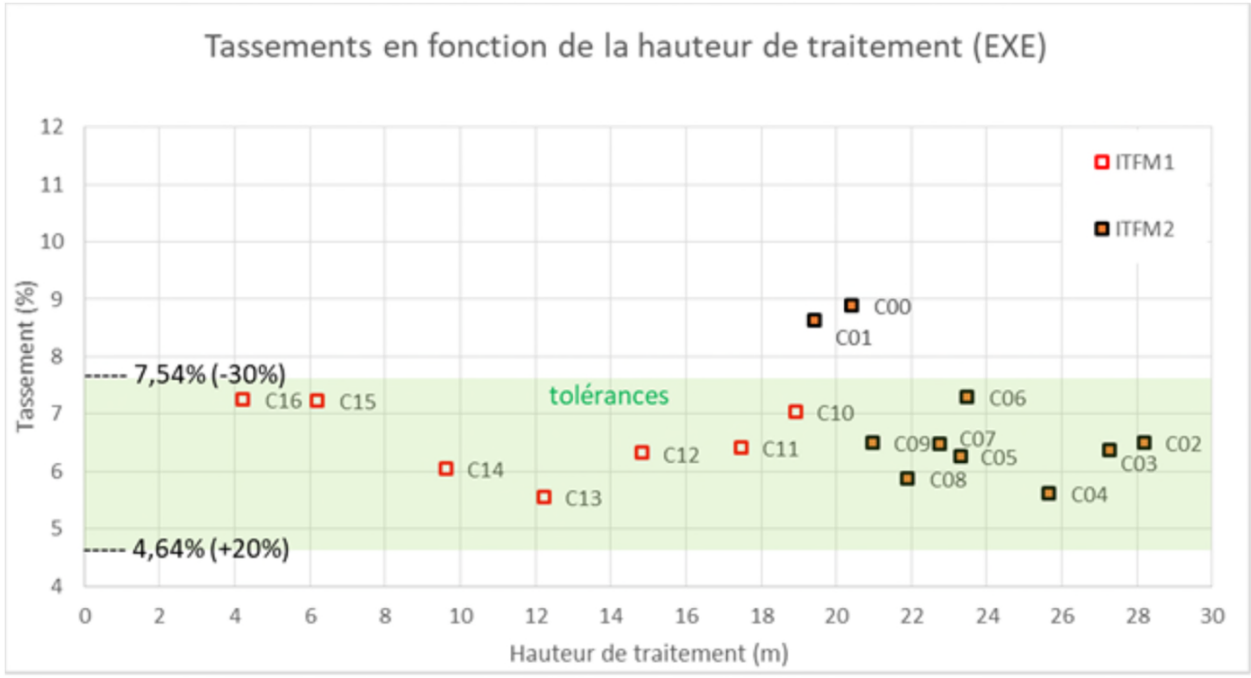




Objectif final :
Em ≥ 17,5 MPa

Contrôle des travaux (MOE)

Réception de l'assise des caissons



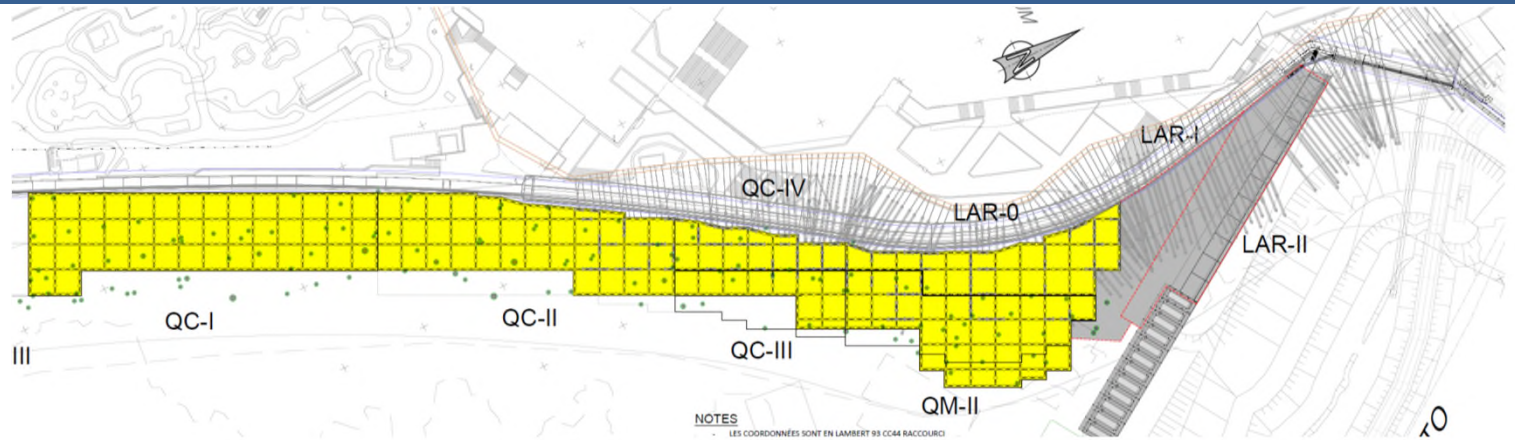
TRAVAUX DE JET GROUTING

Conception
Travaux
Contrôles

04.

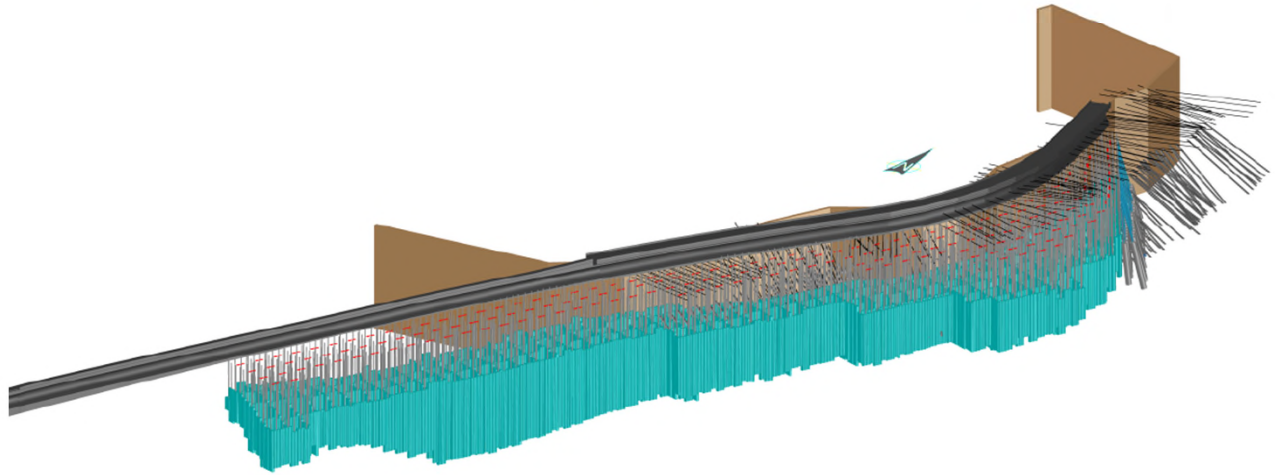
Objectifs du traitement par jet grouting

- Garantir une plate-forme non liquéfiable;
- Maitriser les tassements.



Contrainte:

- Zone de traitement systématique, située dans la zone de présence d'enrochements de la digue existante



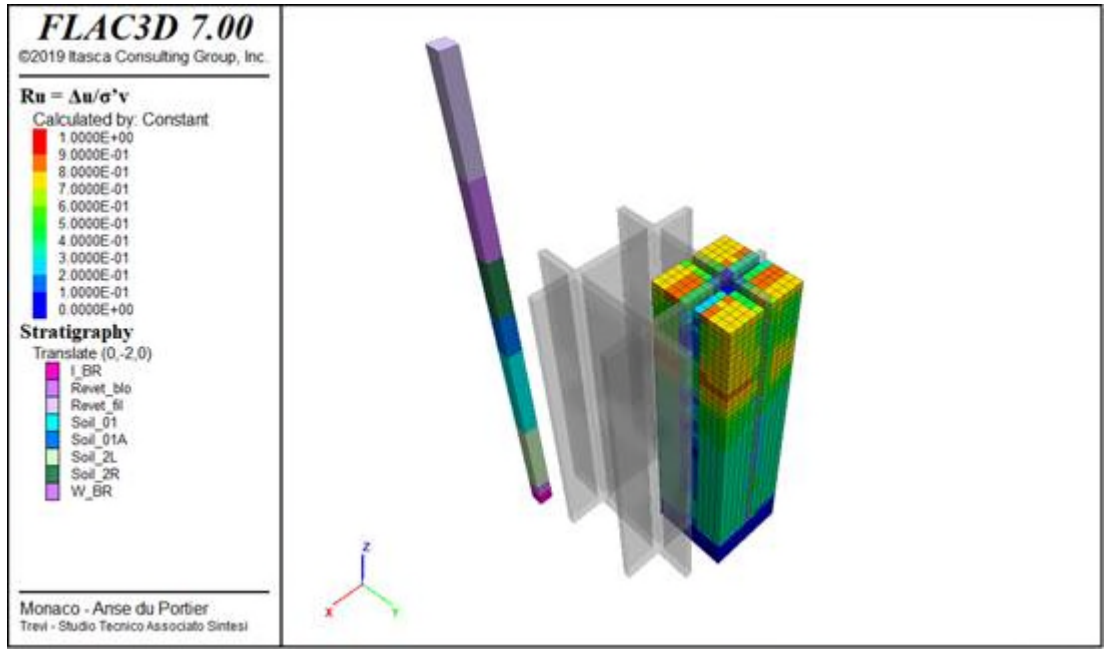
Travaux et études d'exécutions réalisés par TREVI

Synthèse du dimensionnement

- Caractéristiques des sols à partir de CPT (+ essais laboratoire + corrélations issues de la littérature + vérifications in-situ (cross-hole)…)
- Méthodes « simples » non adaptées au projet d'exécution ➔ Calculs dynamiques non linéaires (modèles de sol HSS , UBC Sand)
- Objectifs :

  → Ru = $\frac{u}{\sigma'} < 0{,}6$

  coefficient de sécurité sur la liquéfaction respecté

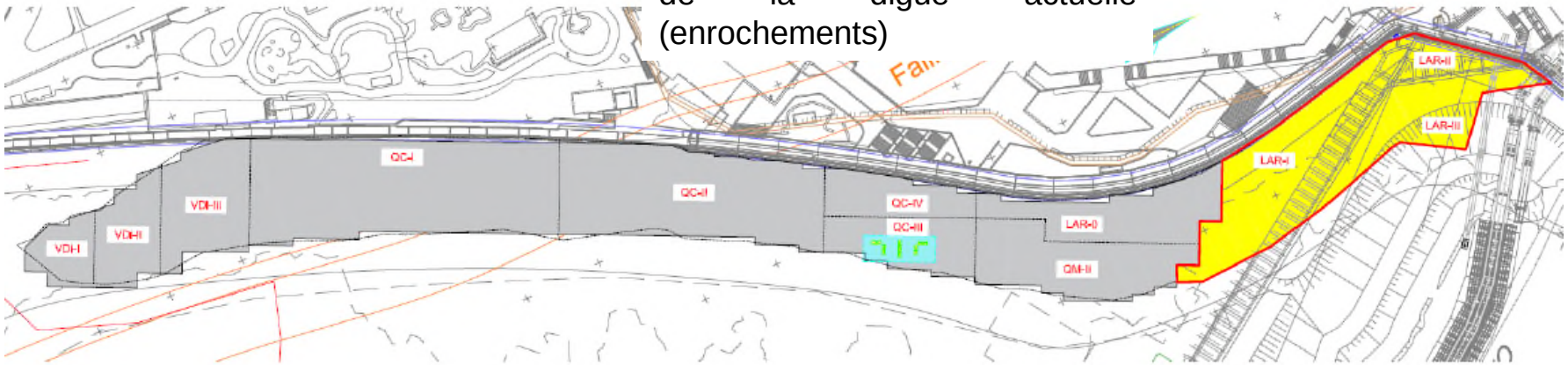


- Calculs réalisés avec le logiciel FLAC3D:
- Sur des cellules unique (Pour toutes les Sections Typiques et pour tous les Accélérogrammes)
- Analyse de modèles raffinés (maillage dense + ouvertures dans les cellules)
- Analyse de modèles complexes (coupe transversale avec substratum incliné)

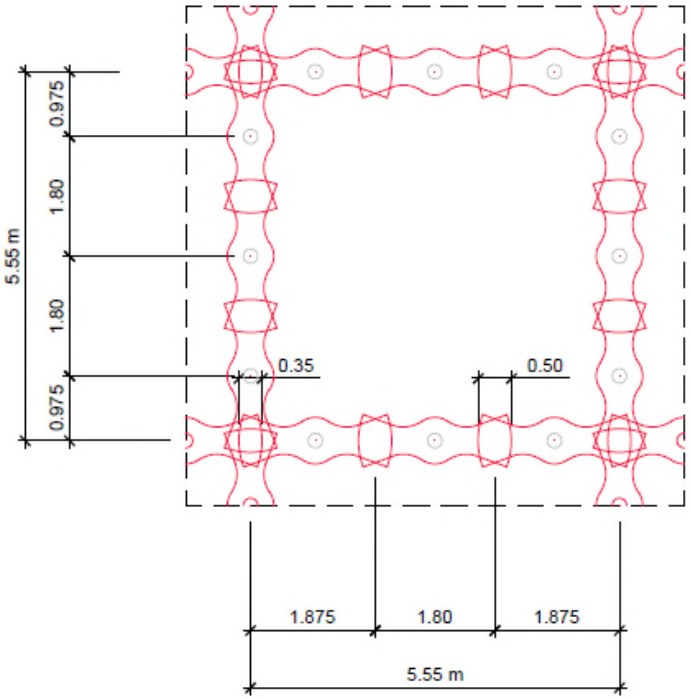
Spécificité

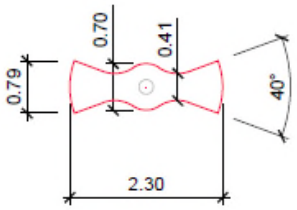
- Double fluide coulis / air. Energie spécifique 35MJ/m
- Jet elliptique
- Création de casiers sur toute la hauteur des sédiments

Zone concernée = emplacement de la digue actuelle (enrochements)



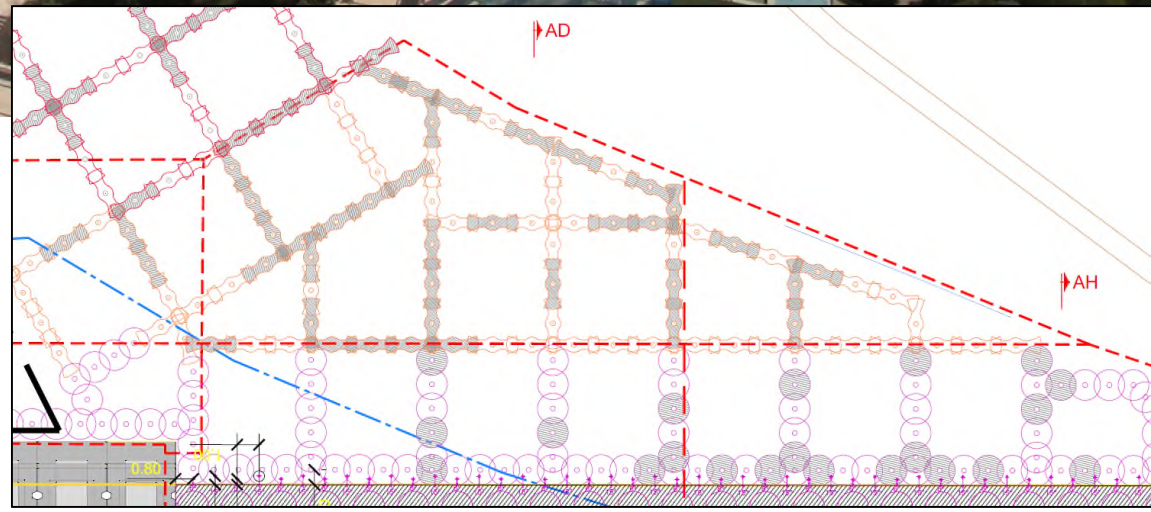
Focus jet elliptique





Travaux de Jet Grouting

Mono fluide (circulaire) à proximité des talus



ANSE DU PORTIER
PRINCIPAUTÉ DE MONACO

BOUYGUES TRAVAUX PUBLICS
MONACO

Shared innovation

Monaco
INFRASTRUCTURE
MARITIME

egis

menard

Réalisation d'une planche d'essai

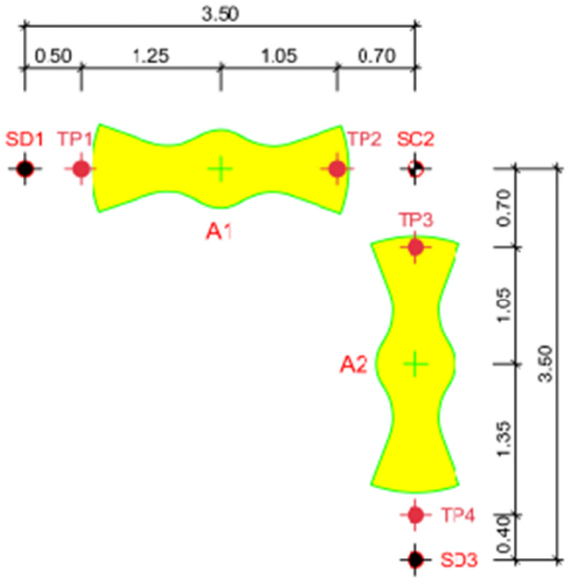
Objectif = vérifier diamètre et résistance à la compression

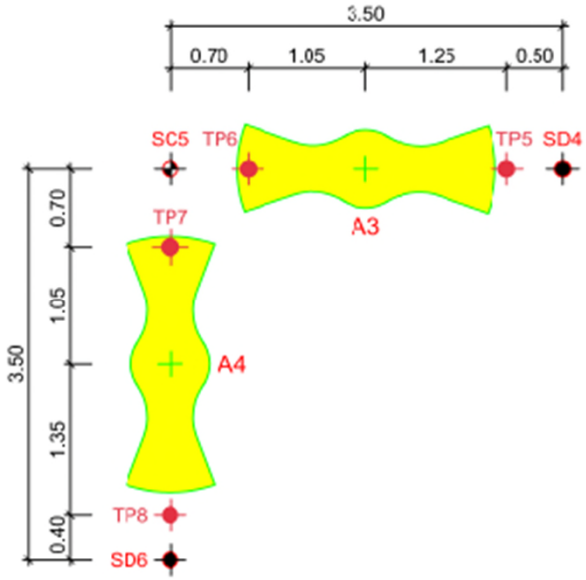
Vérification du diamètre :

- Tiges peintes (intérieur et extérieur de la colonne)
- Sondages carottés
- Cross-hole sismique

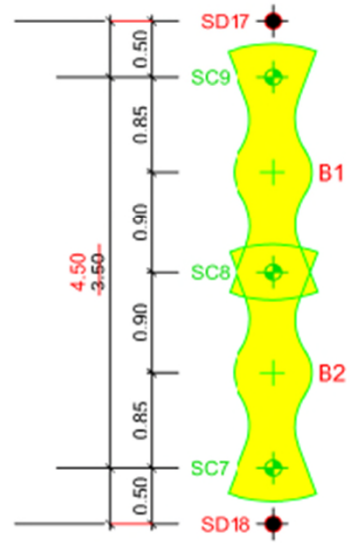
Résistance à la compression

PHASE 1





PHASE 2

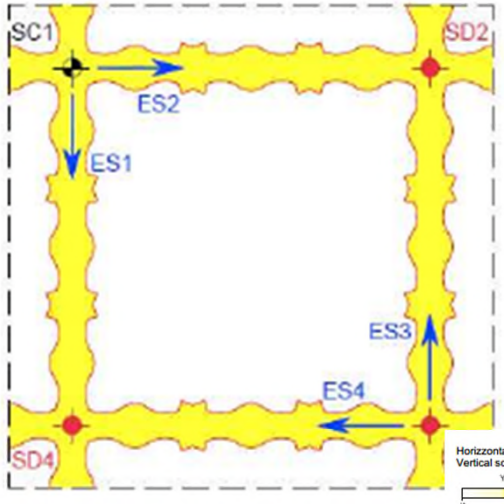


TP7

TP8

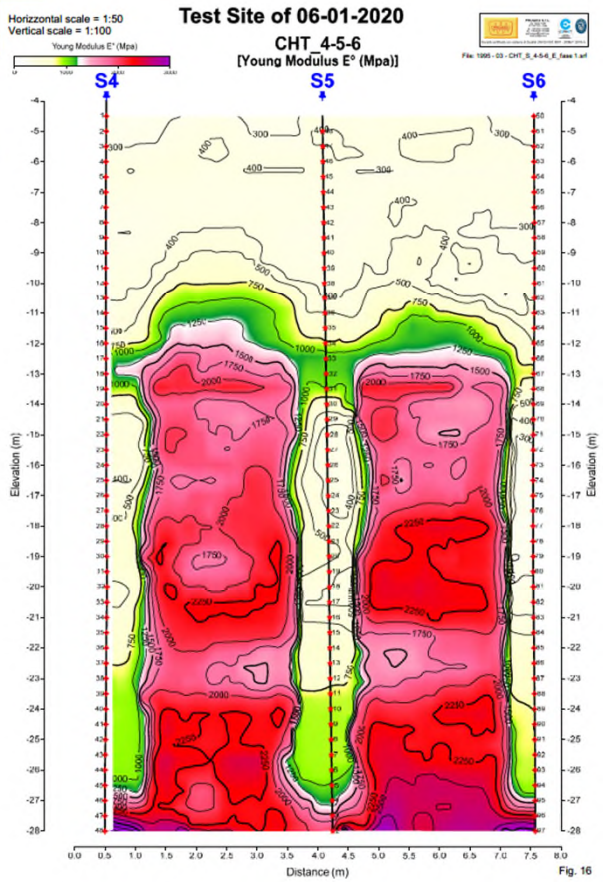
Contrôles des travaux de jet grouting.

Contrôles renforcés en production
- Rhéologie du coulis
- Implantation et inclinaison du forage
- Paramètres de forage
- Paramètres d'injection
- Orientation des buses avant et après jet

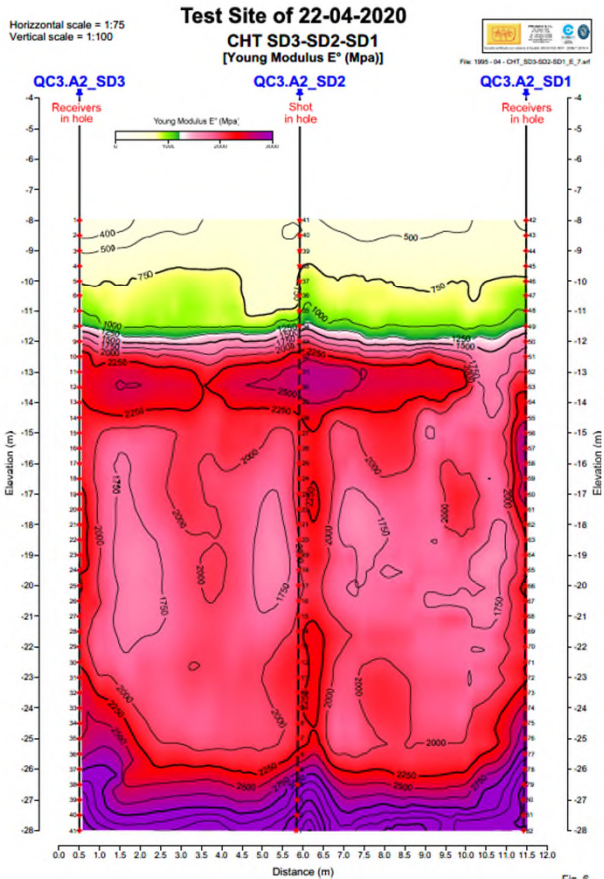


Contrôles après production :
- Sondages carottés
- Résistance à la compression
- Cross-hole

Validation diamètre, planche d'essai



Validation continuité voiles, production



LES DRAINS SISMIQUES

Conception
Travaux
Contrôles

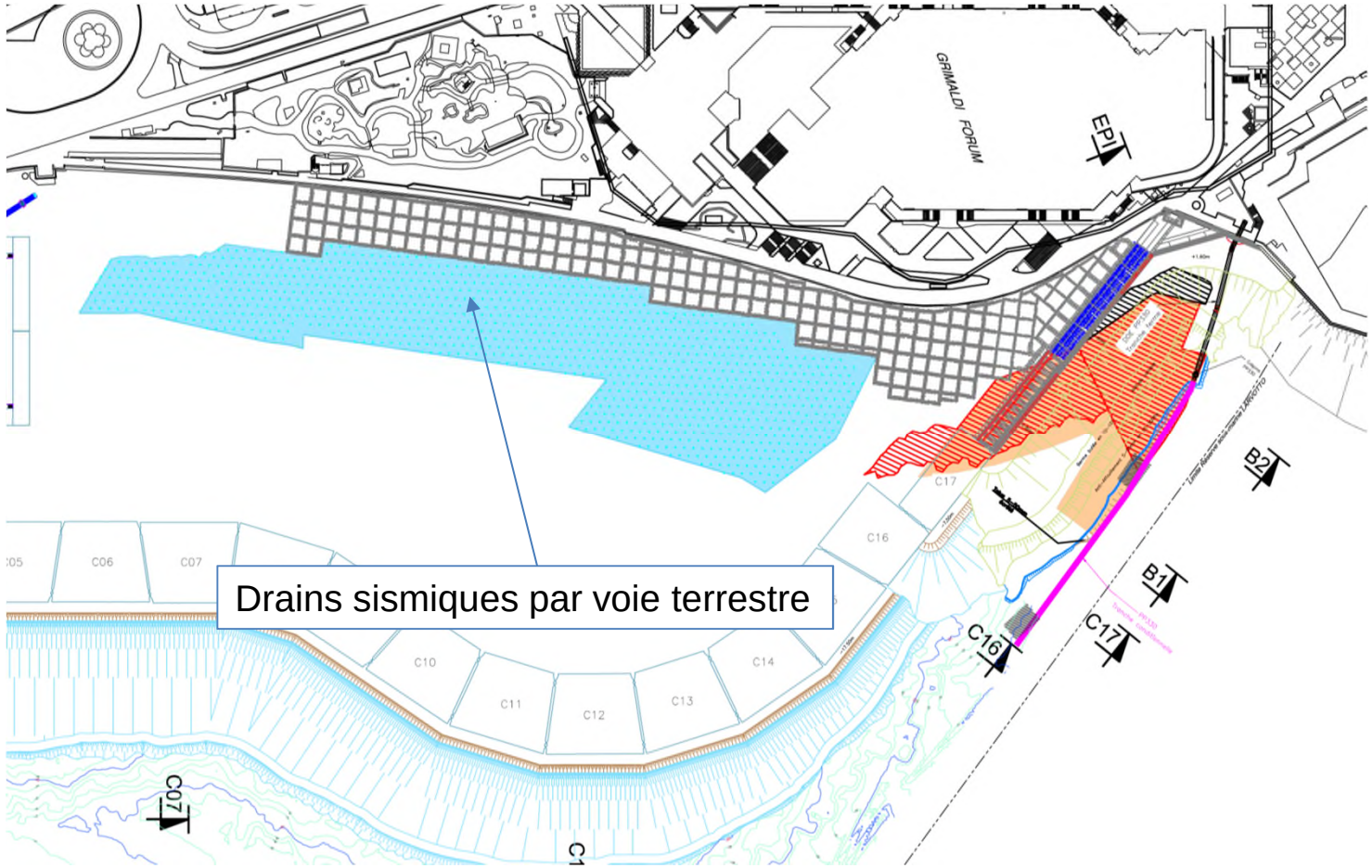
05.

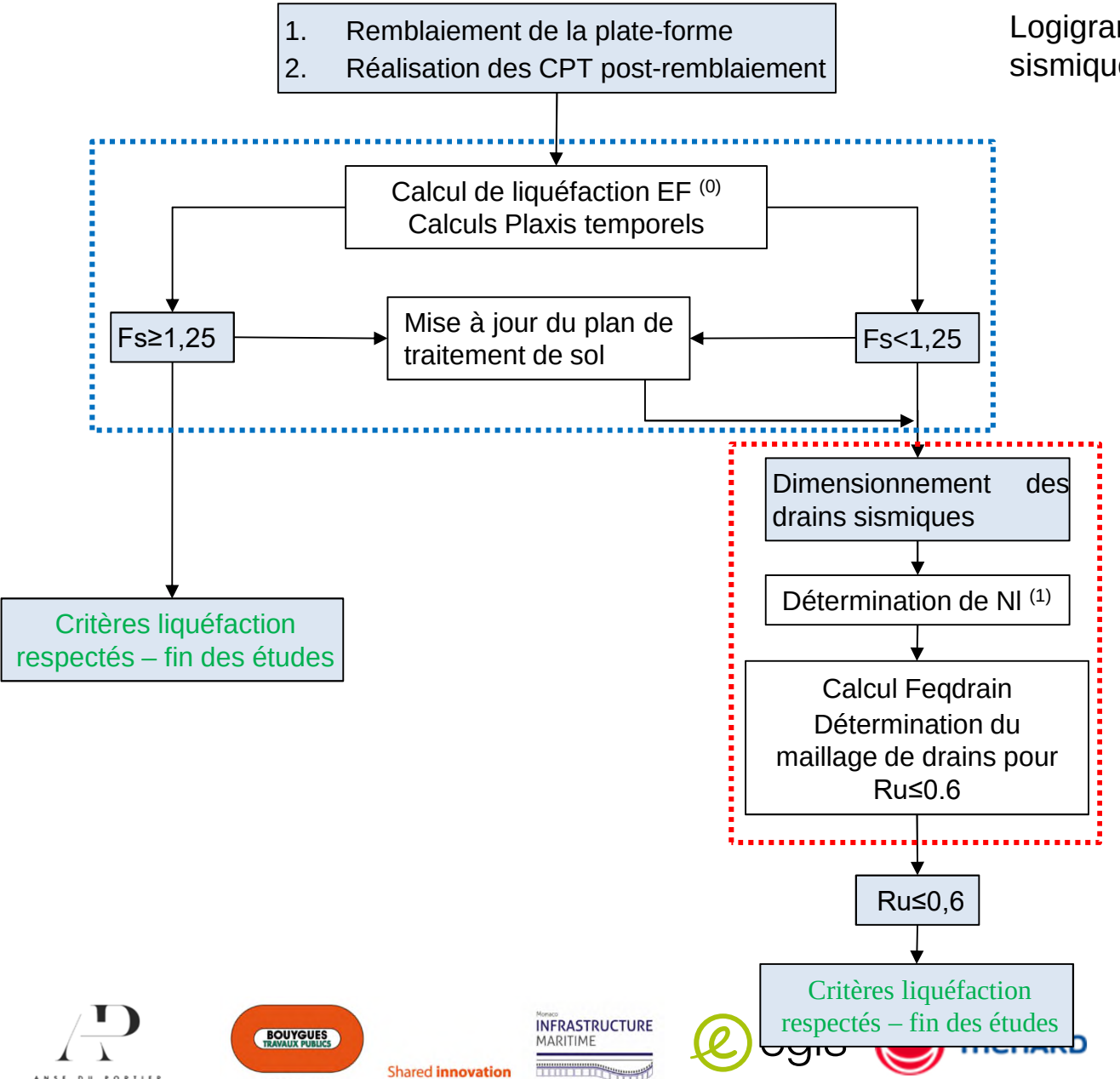
Objectifs du traitement par drains sismiques

- Respect des critères en termes de liquéfaction;
- Maitriser les tassements.

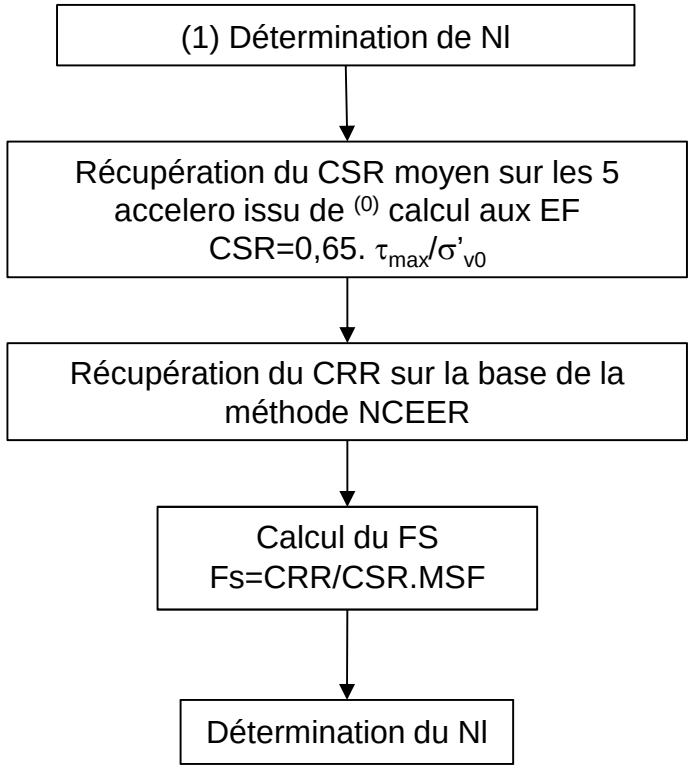
Contrainte:

- 50 CPT à analyser dans des calculs dynamiques;
- Planning de libération des emprises.





Logigramme des études pour la localisation des traitements de sol par drains sismiques et le dimensionnement des drains (maille, profondeur)

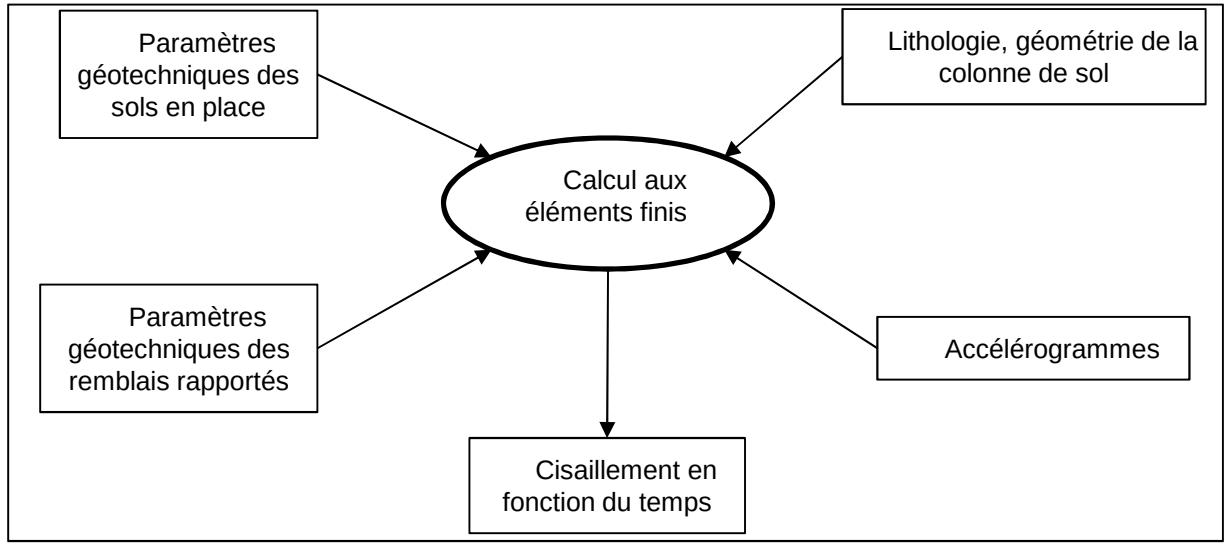


$$\frac{N_l}{N_{eq}} = f(FS)$$

Accélérogrammes du projet

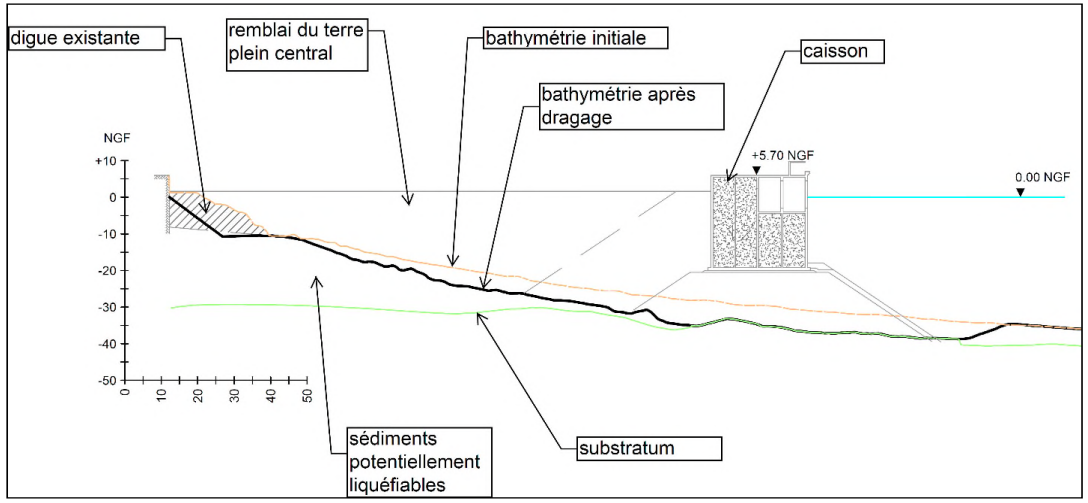
➔Pris en compte directement pour les calculs aux éléments finis PLAXIS

➔Permettent de déterminer les paramètres du séisme pour les calculs FEQDRAIN (durée et nombre de cycles équivalents du séisme)



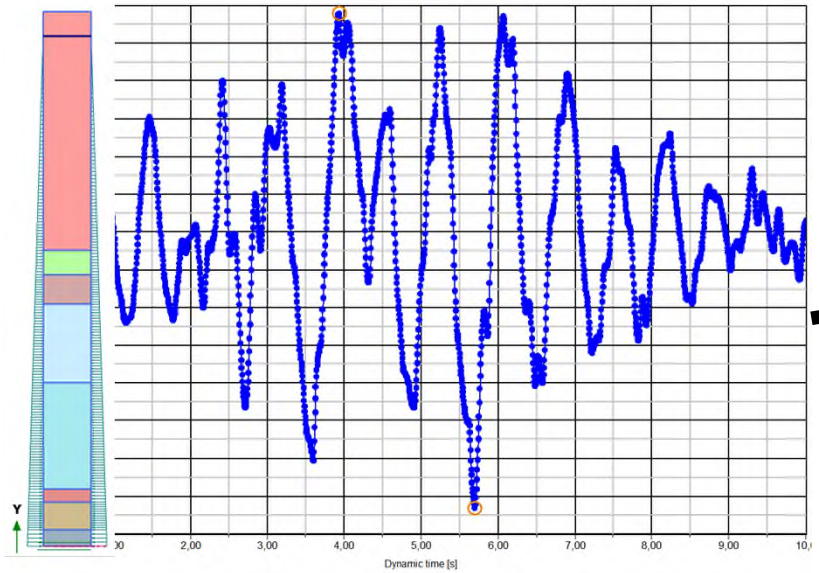
CSR retenu pour le calcul de Fs :

$$CSR = Moyenne(CSR_{acc2} CSR_{acc3} CSR_{acc4} CSR_{acc5} CSR_{acc6})$$

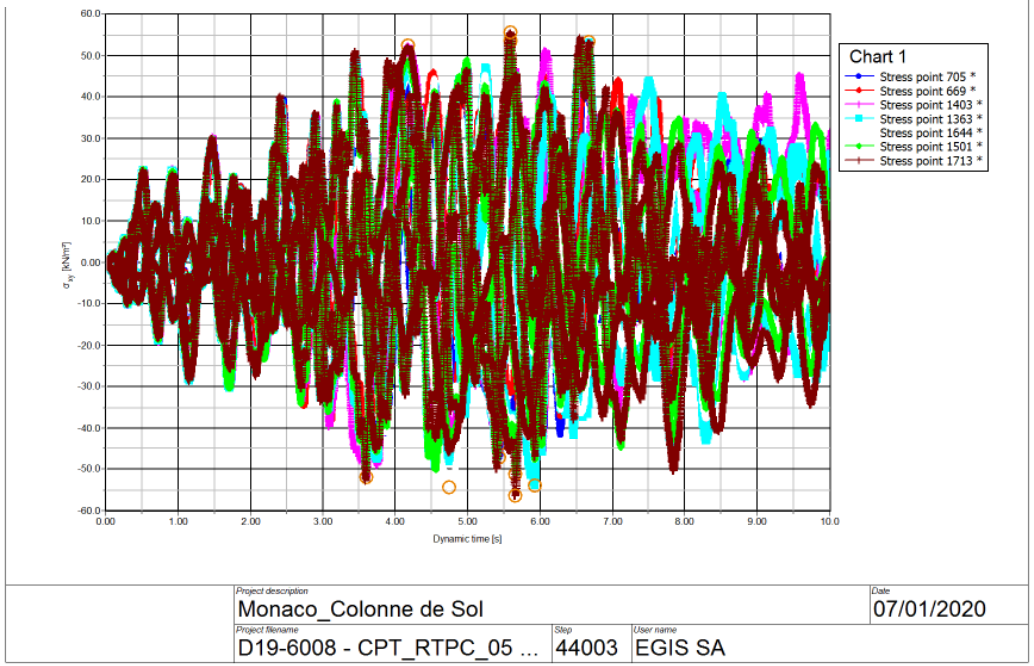


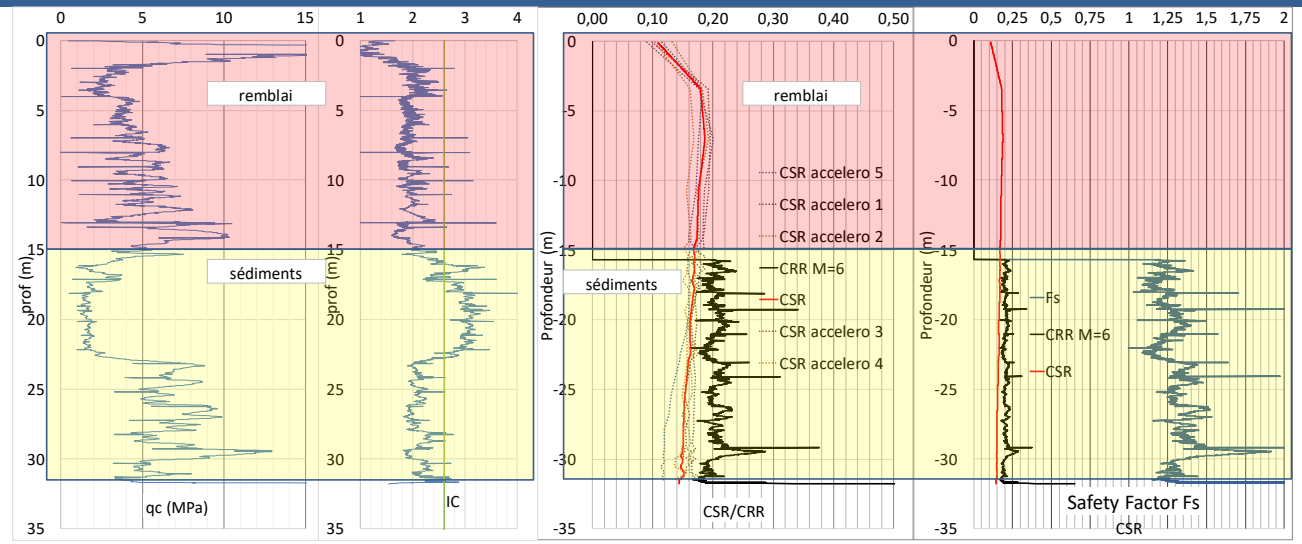
Conception des drains sismiques

F



Cisaillement en fonction du temps, calcul de colonne de sol



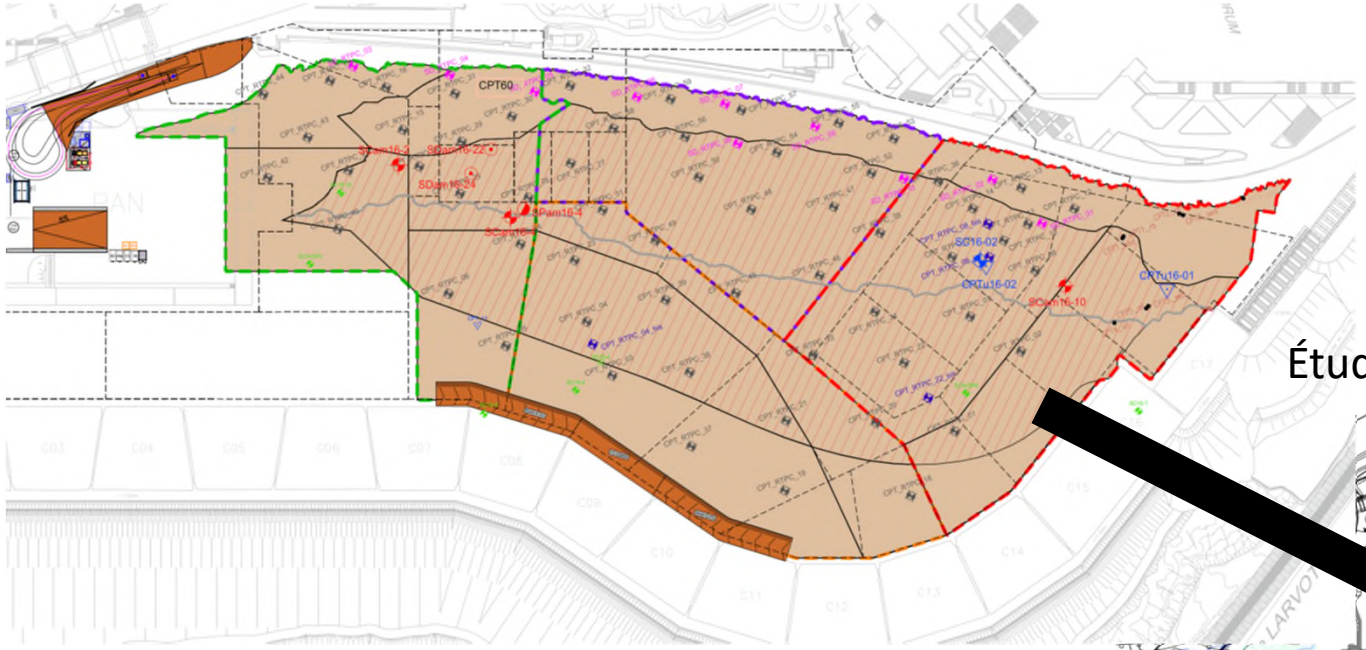


Coefficient de sécurité vis-à-vis de la liquéfaction

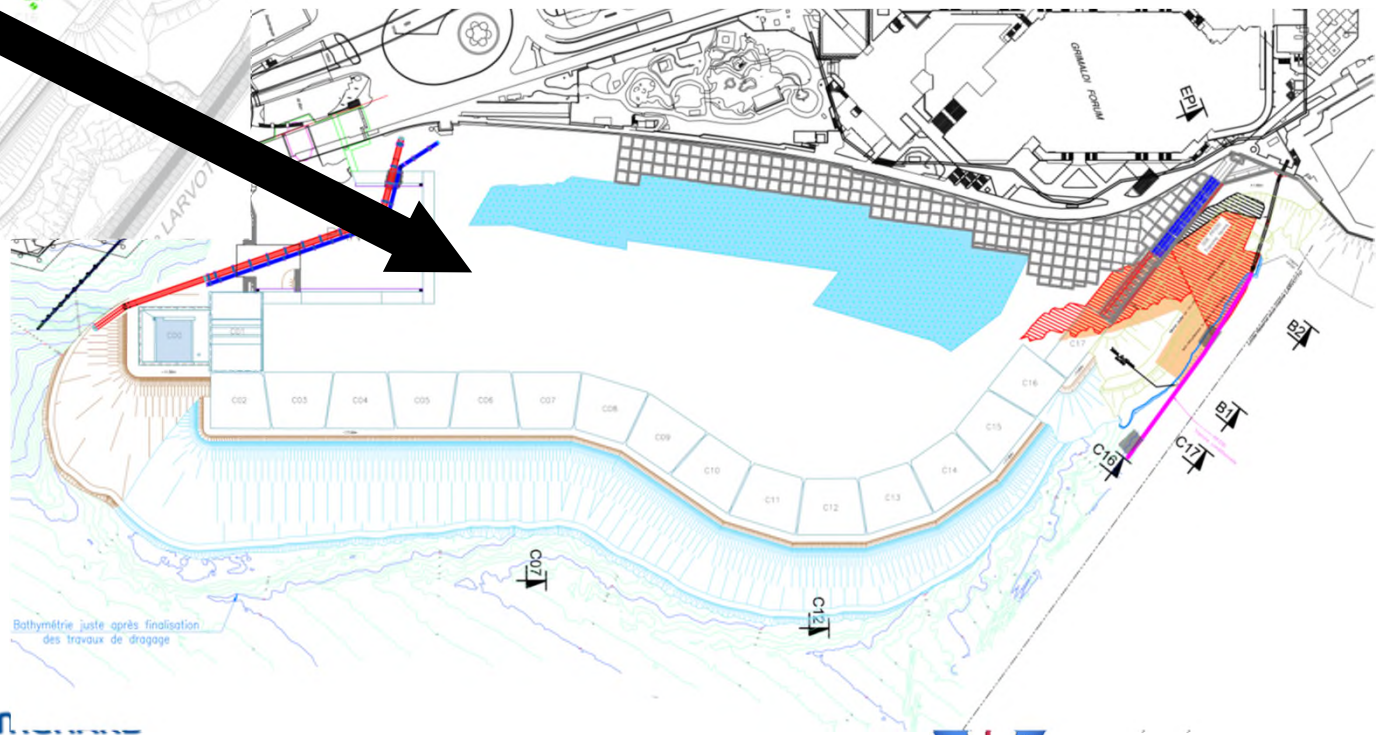
➔coefficient de sécurité dans les sédiments

➔Détermination de Nl pour le dimensionnement des drains

Plus de 50 CPTu réalisés et analysés dans les calculs dynamiques

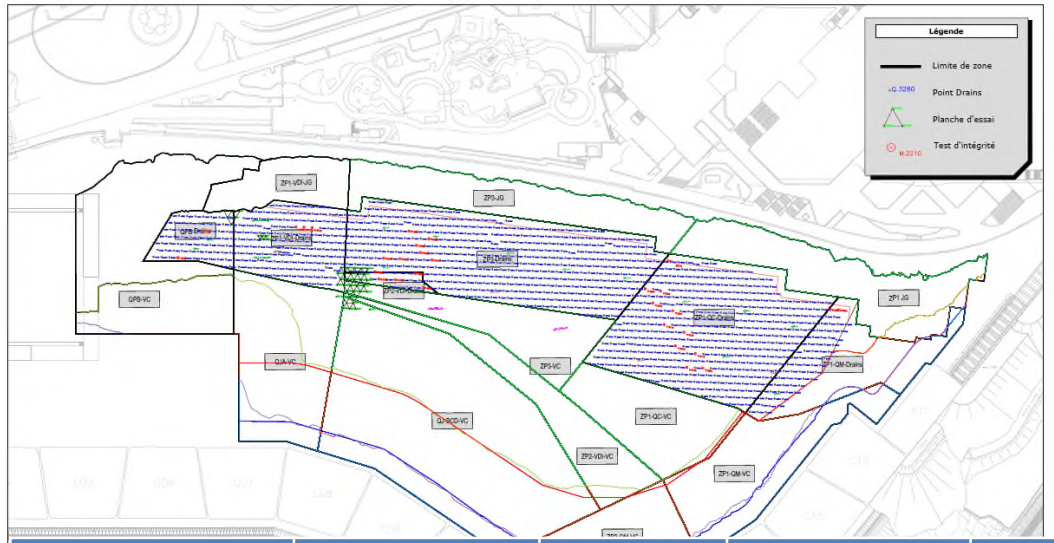


Études détaillées d'exécution

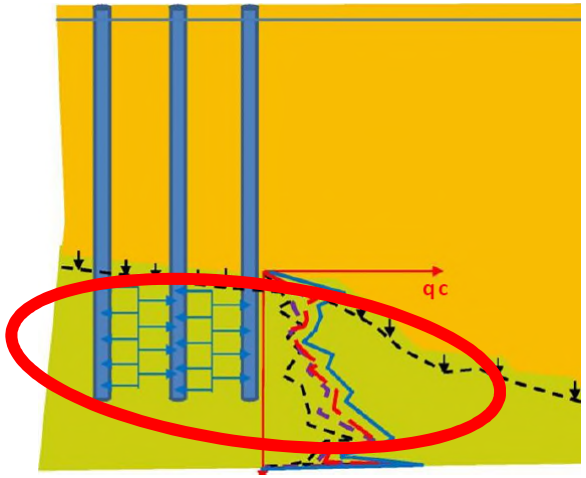


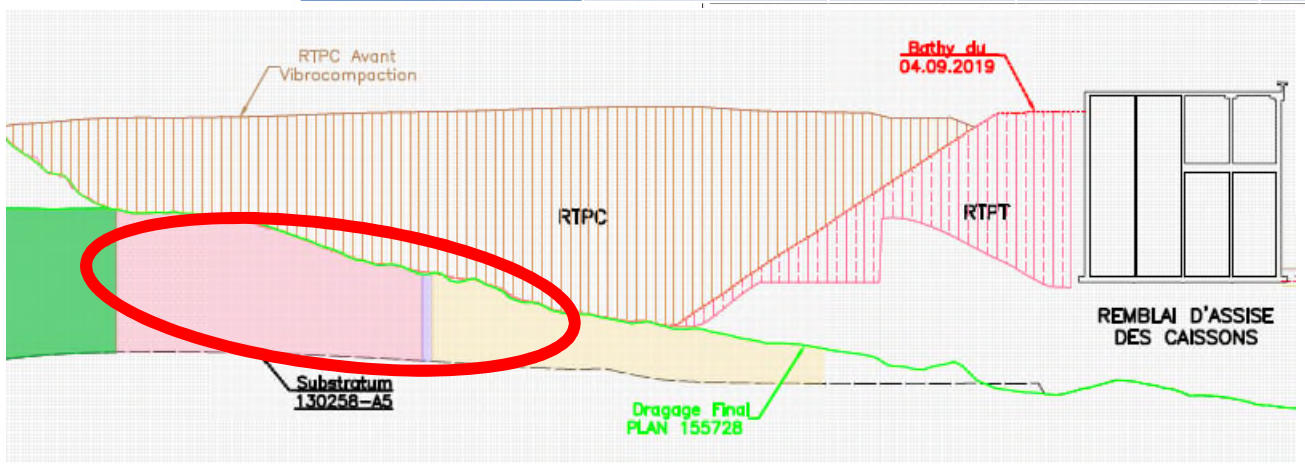
Réalisation des drains verticaux

- **Objectif**: traitement des **sédiments** non purgés sous le RTPC vis-à-vis du **risque de liquéfaction : Ru ≤ 0,6**
- **3 phases**
  - Planche d'essai – (test des Mailles et méthodologie)
  - Avis de chantier par Socotec
  - Travaux d'installations des Drains sismiques

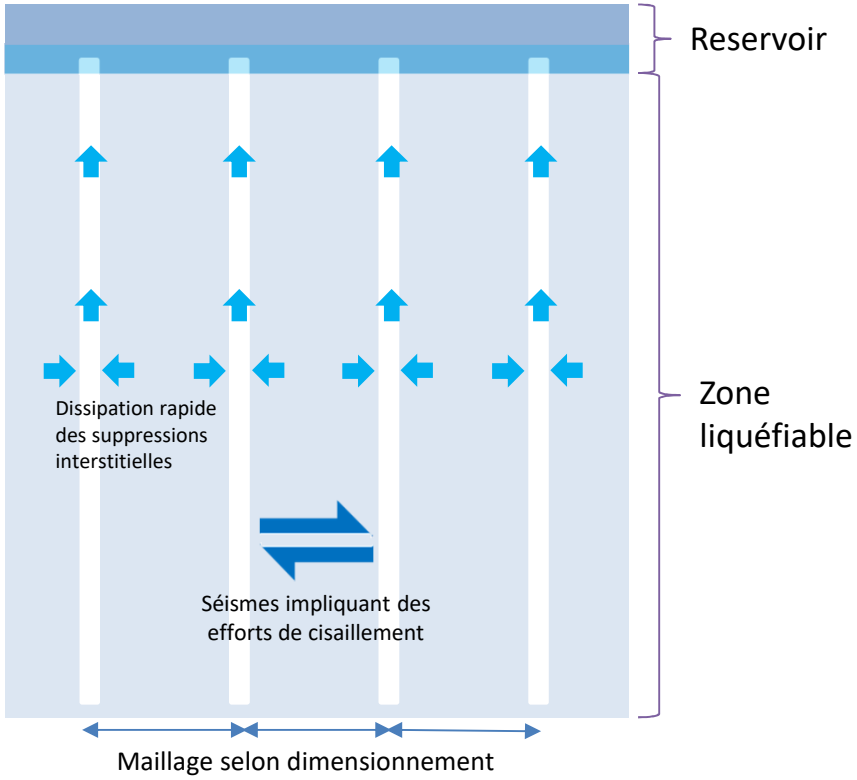


	Aire de traitement réalisées (m²)	Nombre de drains réalisés	Nombre de test d'intégrité	Longueur de fonçage réelle (ml)
Total	9 047,34	1 109	29	30 607,76





Principe des drains sismiques

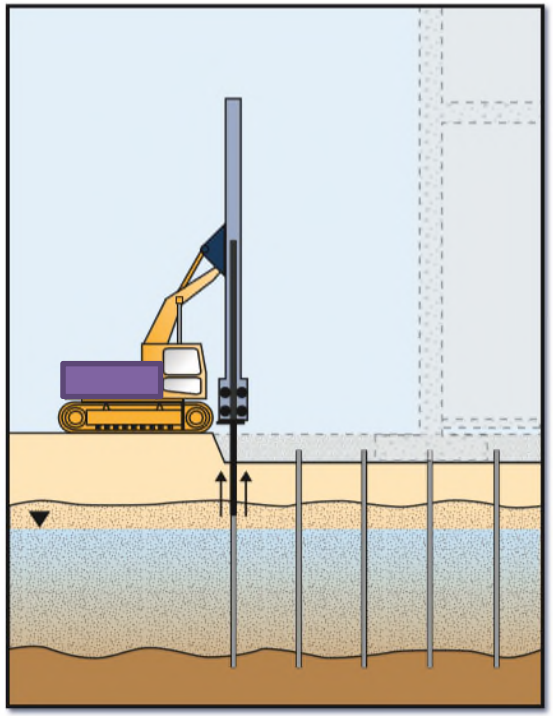


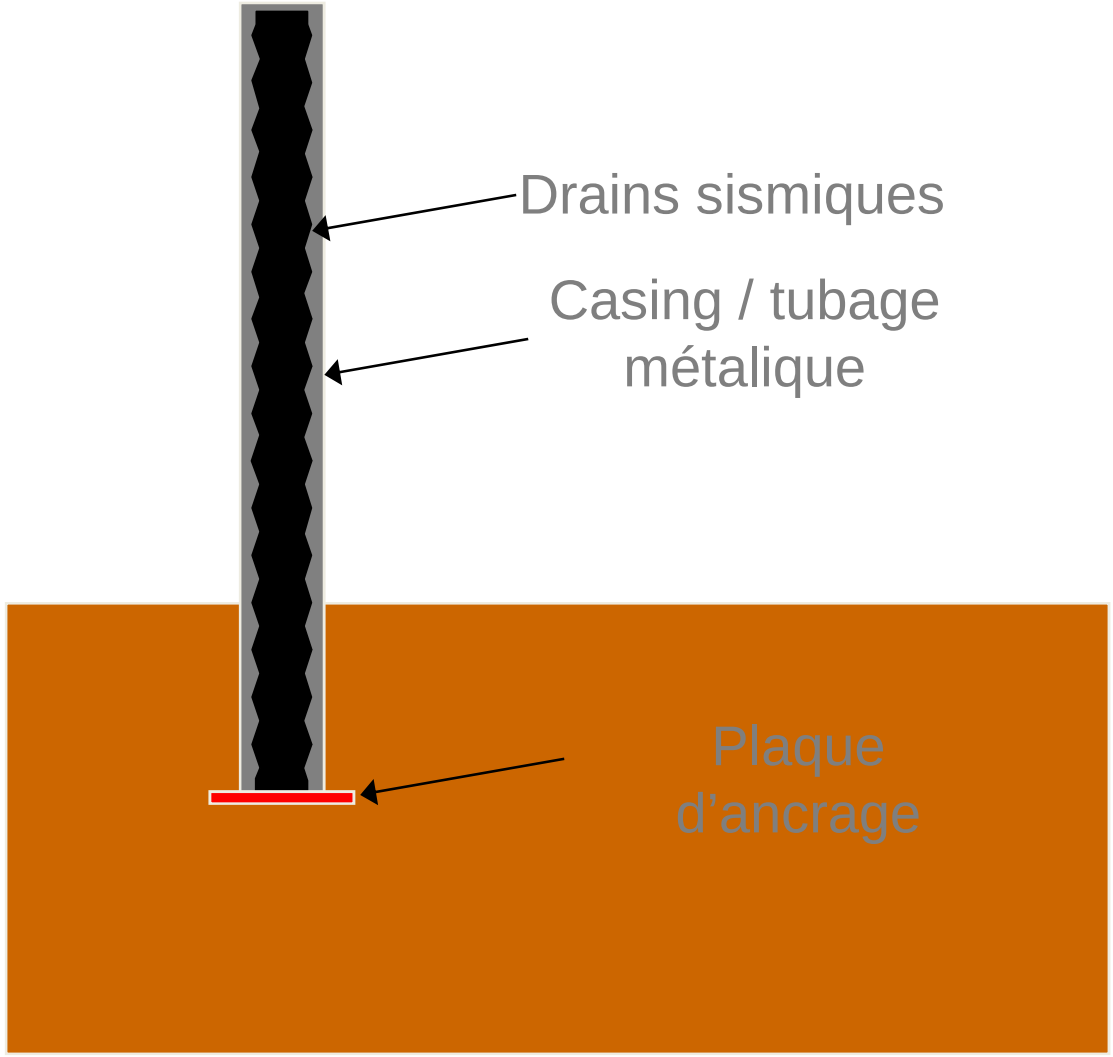
- Diminuer rapidement l'augmentation de pression interstitielle lors d'un séisme → offrir une capacité de décharge suffisante pour atténuer la liquéfaction
- Drains typiquement mis en place sur une maille triangulaire de l'ordre de 1,5m à 3m de coté (fonction du diamètre des drains, de la magnitude du séisme, de la perméabilité et de la compressibilité du sol, etc.)
- Les diamètres des drains sont généralement compris entre 5 et 15 cm.

Nota: Première mise en œuvre en Europe

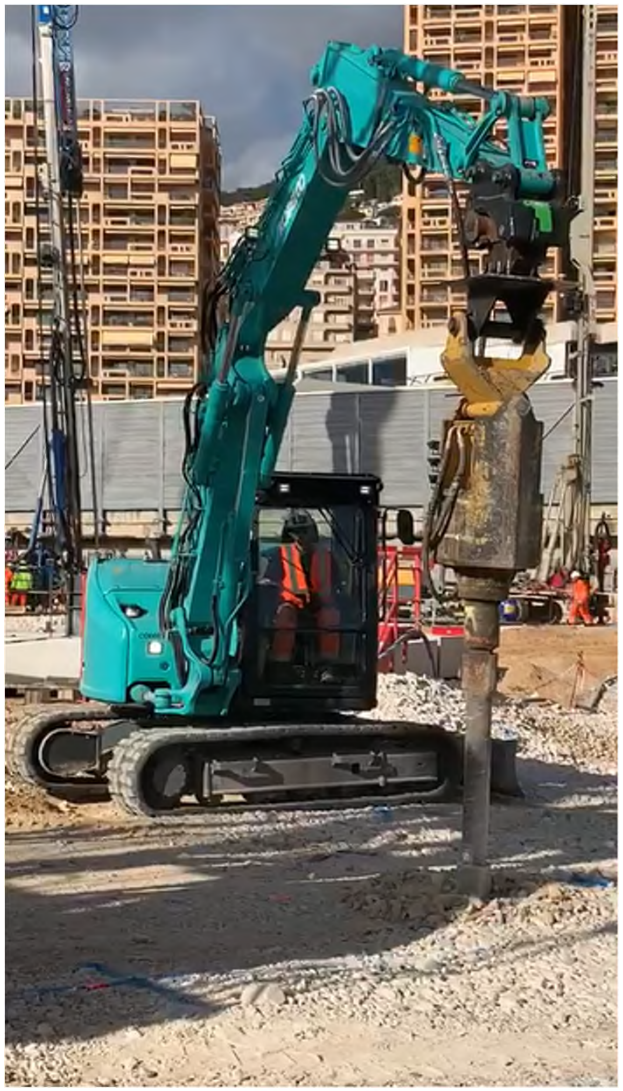
Les moyens mis en œuvre

Schéma de principe : Installation des drains sismiques





Réalisation des drains sismiques

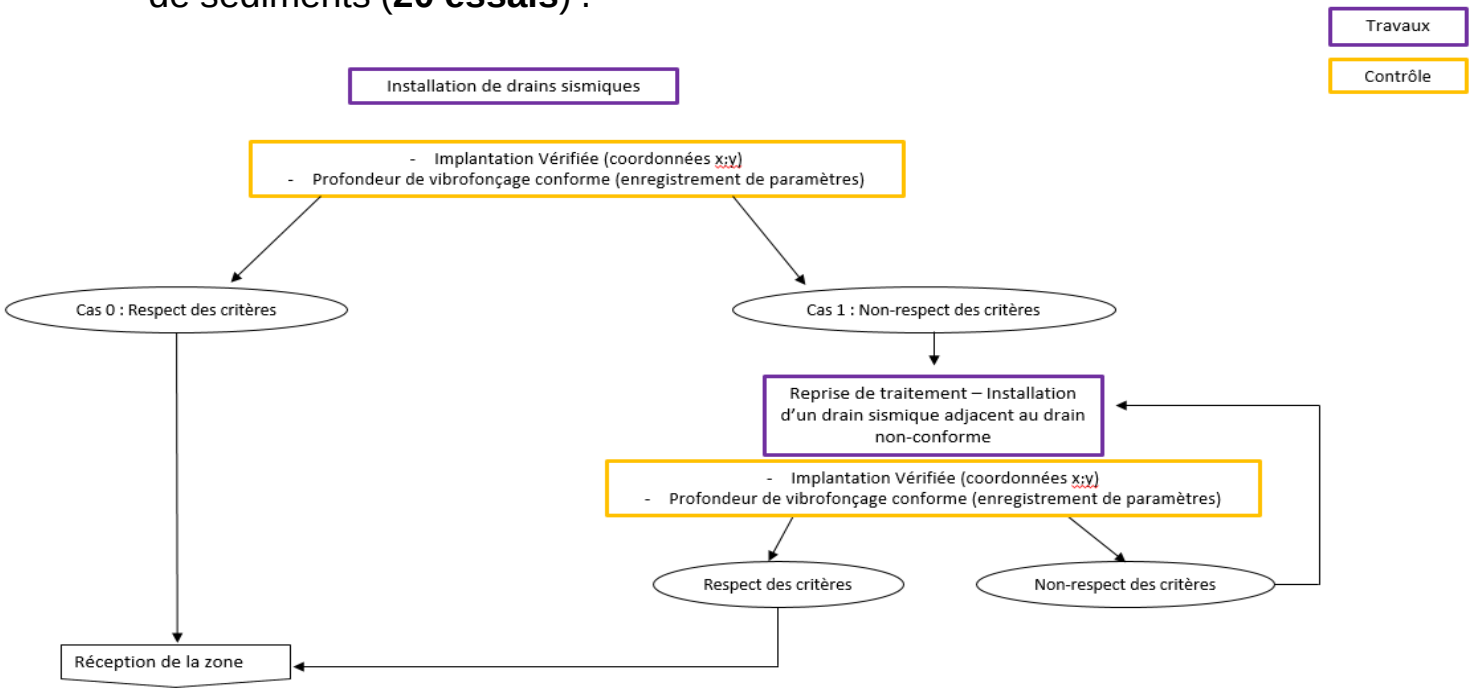


6 étapes :

- Implantation
- Pré-Forage
- Insertion des Drains sismiques
- Positionnement
- Fonçage
- Mise en place du drain

Validation et critères de réception

- La réception des drains sismiques est faite en **4 étapes** :
  - Coordonnées d'implantation (x ; y) conforme au plan d'implantation;
  - Les drains ont été vibrofoncés jusqu'à la côte théorique ou au refus;
  - Intégrité des drains sismiques (1 test/ 40 drains environ) – Vérification de la longueur et intégrité (non écrasement) des drains (**28 tests**);
  - Tous les 2500m², un CPT est prolongé jusqu'au substratum pour effectuer des essais de dissipation tous les 2m dans la couche de sédiments (**20 essais**) .



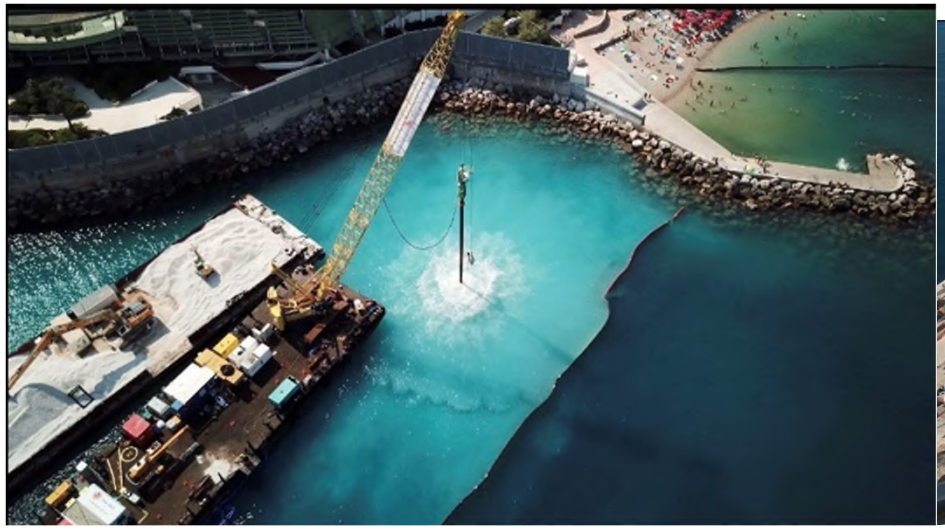
CONCLUSION / QUESTIONS

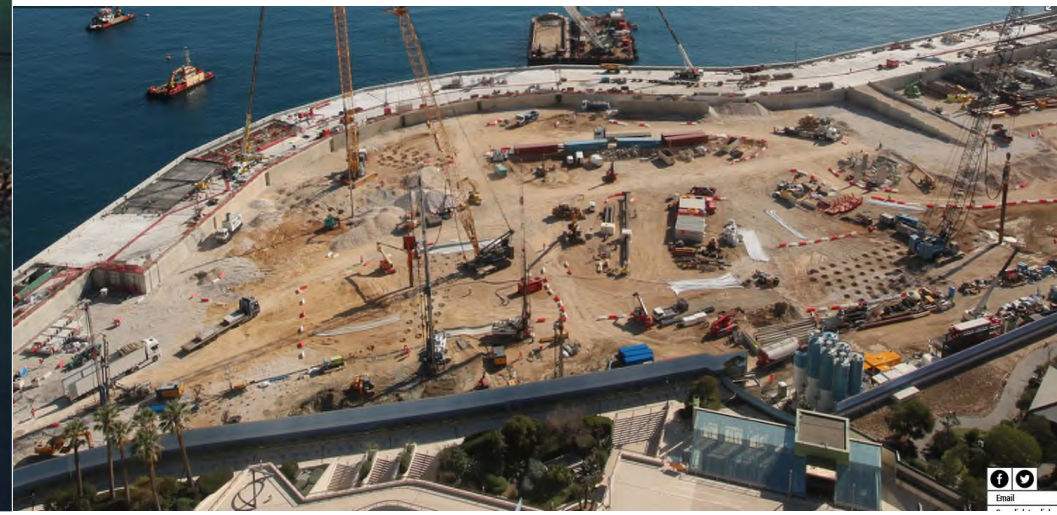
06.

Conclusion

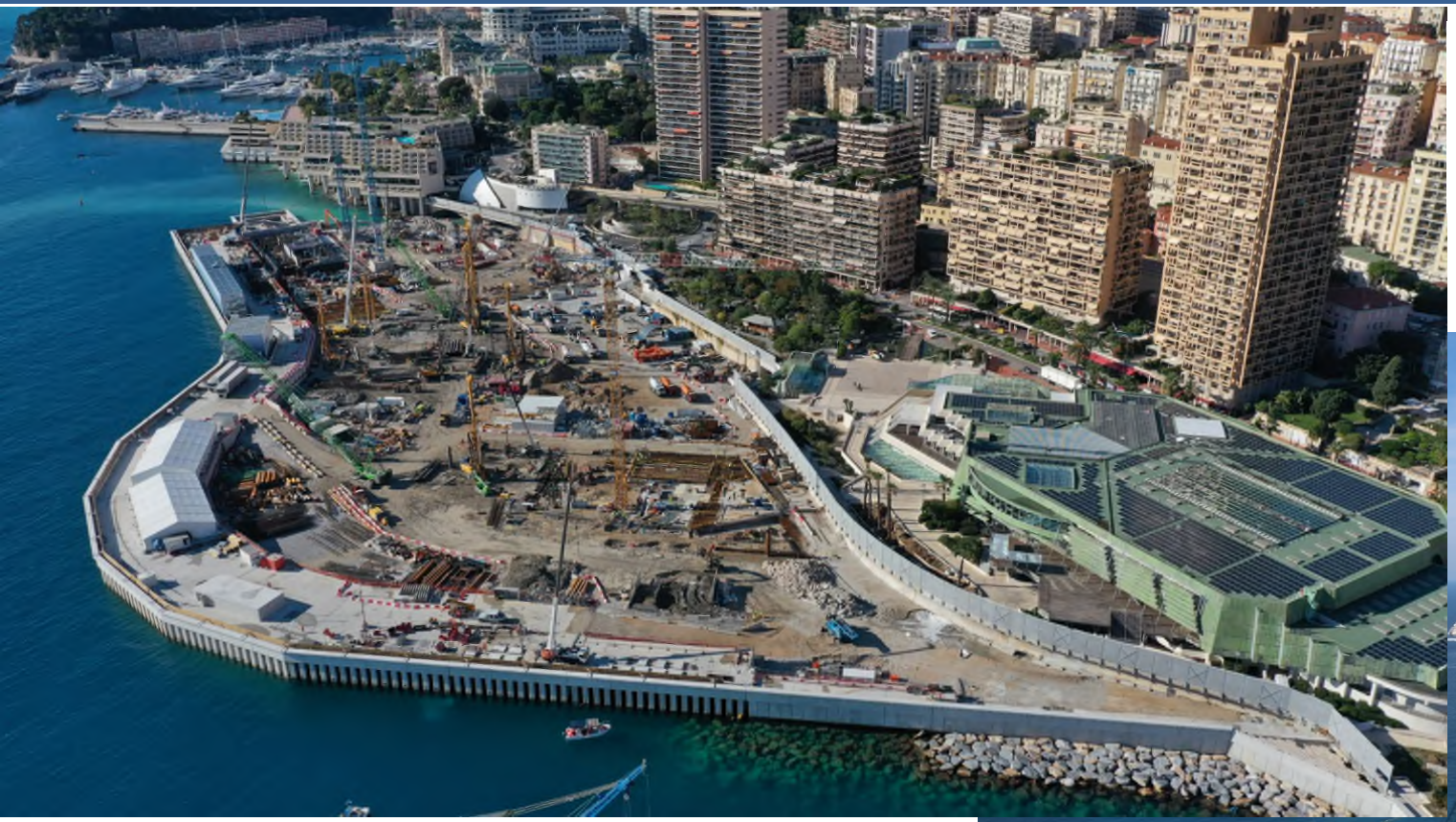
L'extension en mer de l'anse du portier à Monaco

- Un projet ambitieux
- Un projet innovant
- Un projet collaboratif avec un engagement très fort de tous les acteurs
- Le respect des attentes du client en termes de résultats et de planning





Questions



Contacts:
Thibaut Perini (Bouygues) - t.perini@bouygues-construction.com
Fabien Borsellino (Egis) – fabien.borsellino@egis.fr
Maelle Jourdren (Menard) - maelle.jourdren@menard-mail.com