

Ouvrages remarquables  
et évolution des pratiques

MONACO: Le Grimaldi Forum vs  
Testimonio II

# Contexte et description de chacun de ces deux chantiers

# Le Centre Culturel et des Expositions, ou « Grimaldi Forum »: déjà un lieu gagné sur la mer

## Un site gagné sur la mer

Un siècle d'aménagements:

- ▶ Début années 60: Forme actuelle de la Plage du Larvotto et terre-plein du Portier avec le Hall du Centenaire
- ▶ Années 90: Création du Forum Grimaldi
- ▶ 2025: Extension de l'Anse du Portier avec « Mareterra »

## Les intervenants

- ▶ OA: Etat de Monaco
- ▶ Architecte: NOTARI-GENIN
- ▶ MOe structure: Coyne & Bellier
- ▶ Entreprise : Soletanche Sam (hommage à Joseph Lavisson et merci à François Louvel!)

À l'origine, il n'y avait que la mer et une petite formation rocheuse à l'emplacement du Grimaldi Forum.



© Grimaldi Forum Monaco – Le chantier monumental du Grimaldi Forum

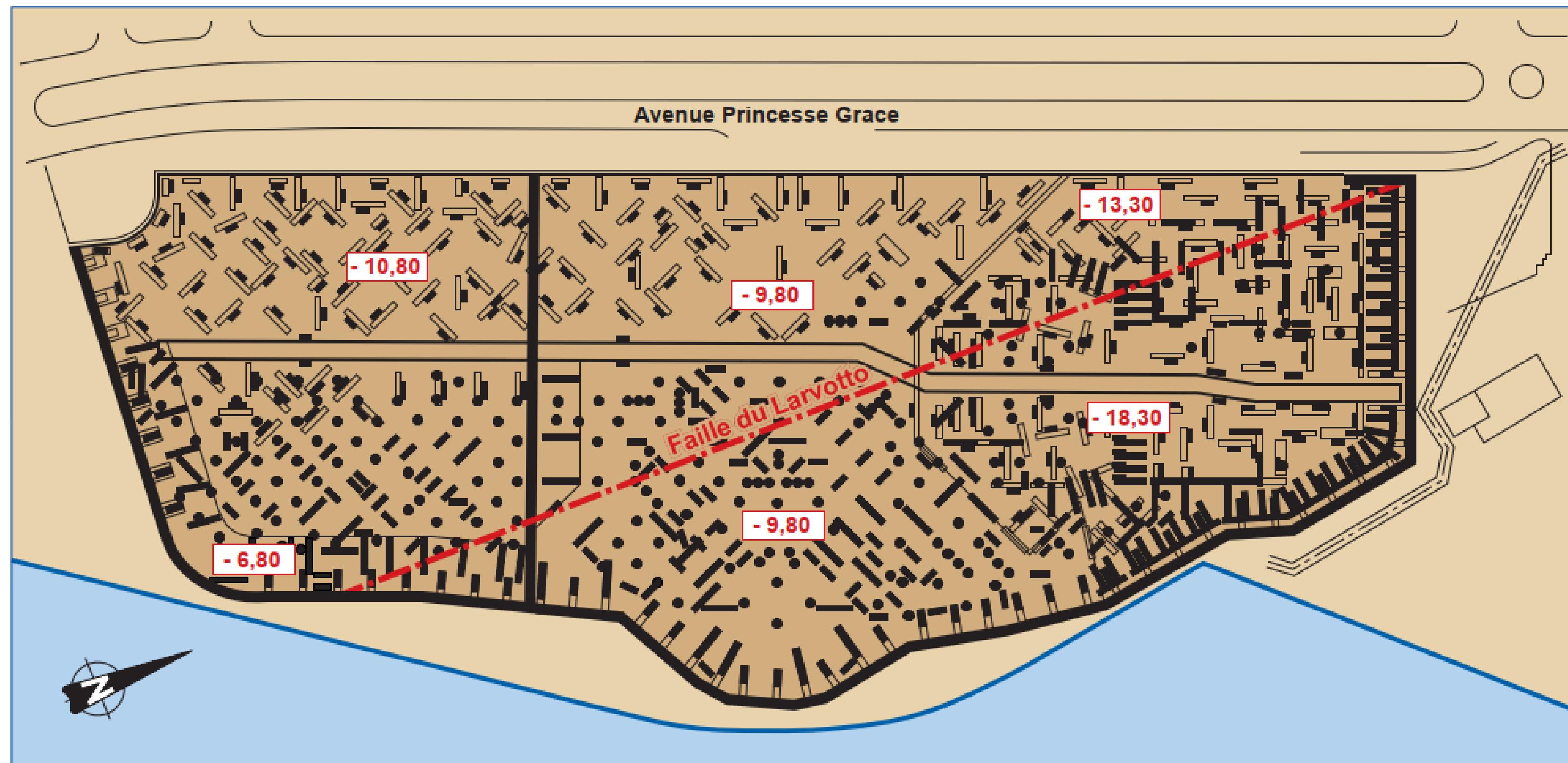
# Le Centre Culturel et des Expositions, ou « Grimaldi Forum »: Vue en plan

## Situation

- ▶ Sud et Ouest; parking du Portier et du Centre
- ▶ Nord: Plage du Larvotto
- ▶ Est: Digue

## Géologie

- ▶ Remblais, Sables
- ▶ Substratum Jurassique (Ouest) et MC (Est) séparé par la **faille du Larvotto**
- ▶ Substratum plonge vers la mer

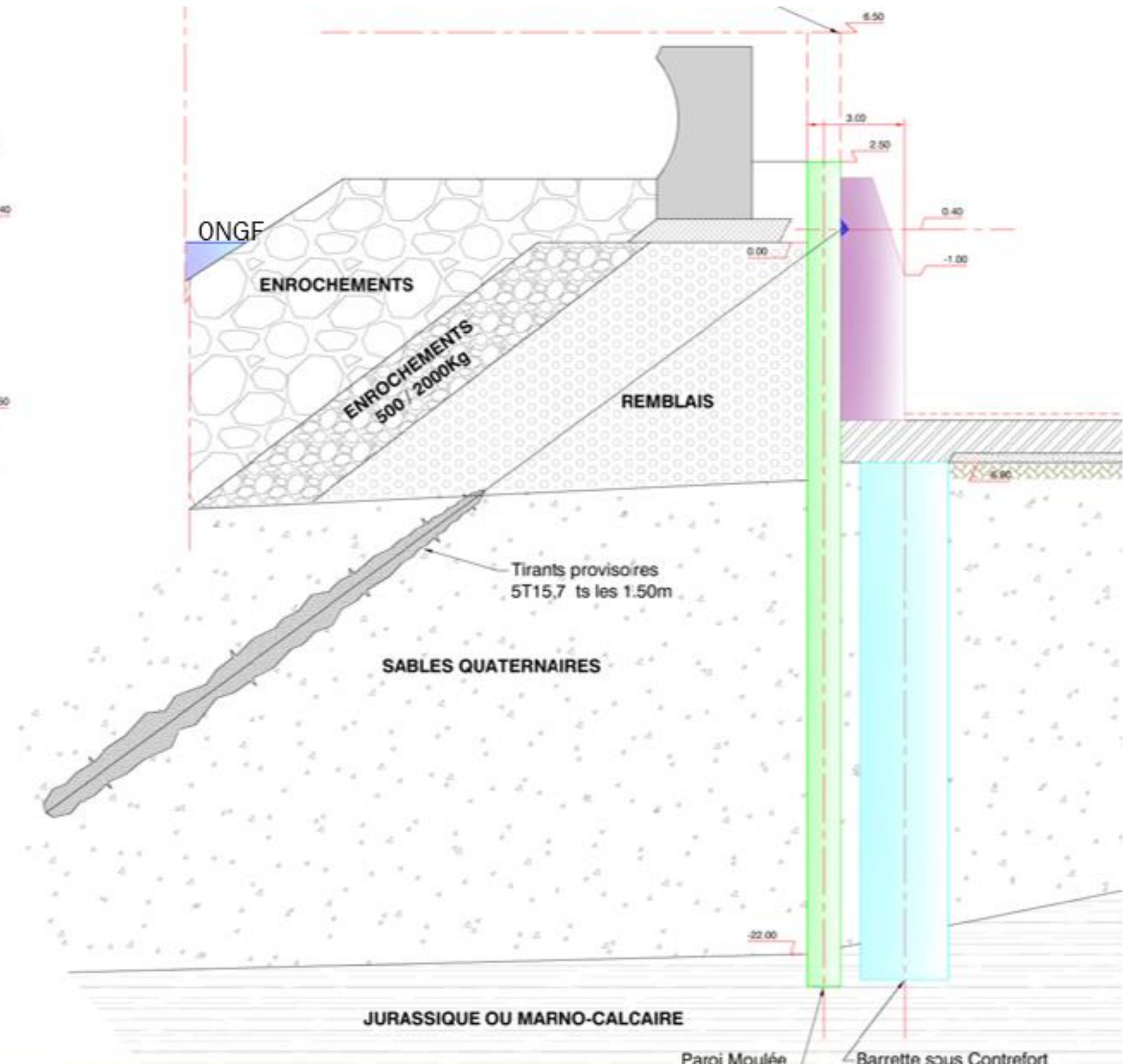
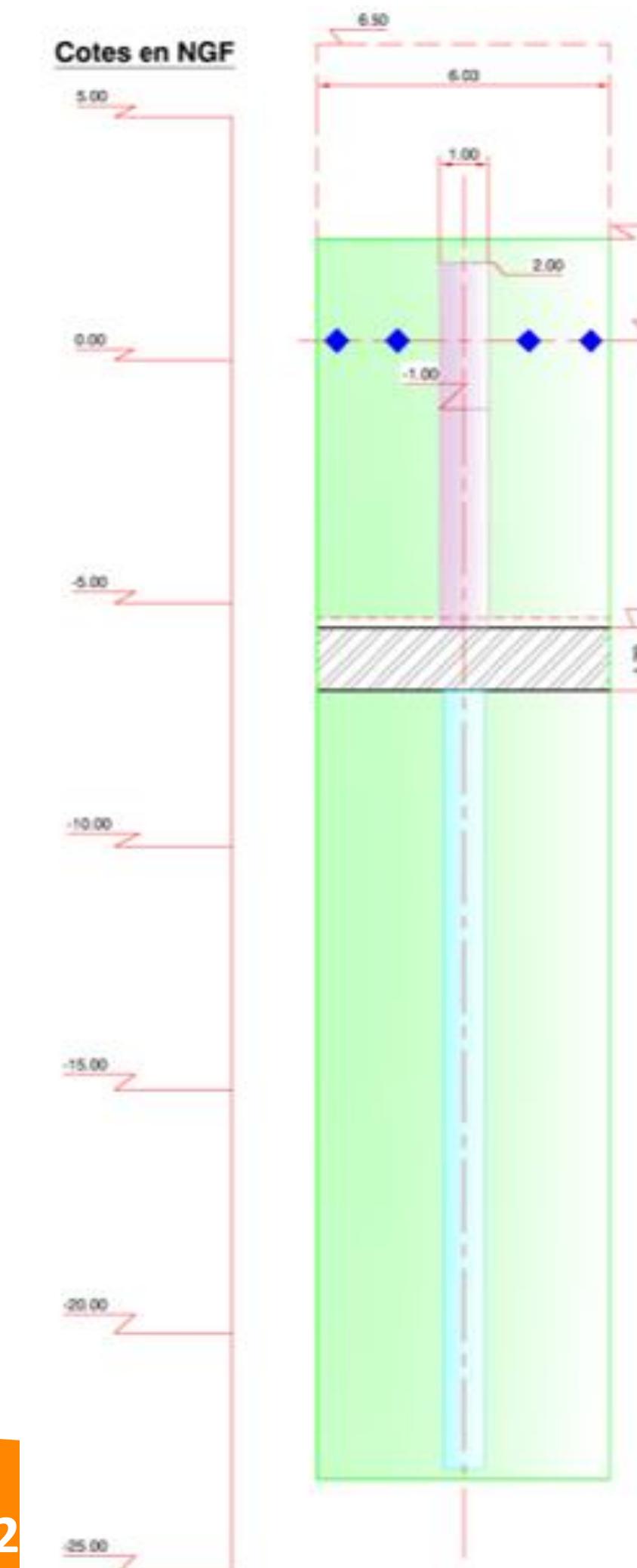


Vue en plan des différents niveaux des fonds de fouille

# Le Centre Culturel et des Expositions, ou « Grimaldi Forum »: Coupe générale

## La conception initiale

- ▶ Fouille d'environ 10 m de profondeur à-côté de la mer
- ▶ Paroi moulée tirantée en phase de travaux (tirants provisoires)
- ▶ Fond injecté (définitif)
- ▶ Phase service: contreforts en GC + radier + barrette à l'aplomb des contreforts
- ▶ Radier drainant



## Une enceinte auto-stable

- ▶ Interdiction que le radier s'appuie vers le côté du parking existant, yc sous séisme
- ▶ Barrettes et bêches intérieures
- ▶ La structure GC intérieure est déconnectée du soutènement

# Testimonio II, un projet immobilier exceptionnel dans un grand versant

## Un projet immobilier

- ▶ Logements privés et domaniaux
- ▶ Parkings (13 niveaux)
- ▶ École internationale
- ▶ Deux tours de grande hauteur

## Dans le versant

- ▶ Entre bld d'Italie et l'avenue Princesse Grace
- ▶ En passant par le bld du Larvotto
- ▶ Soit plus de 40 m

## Les intervenants

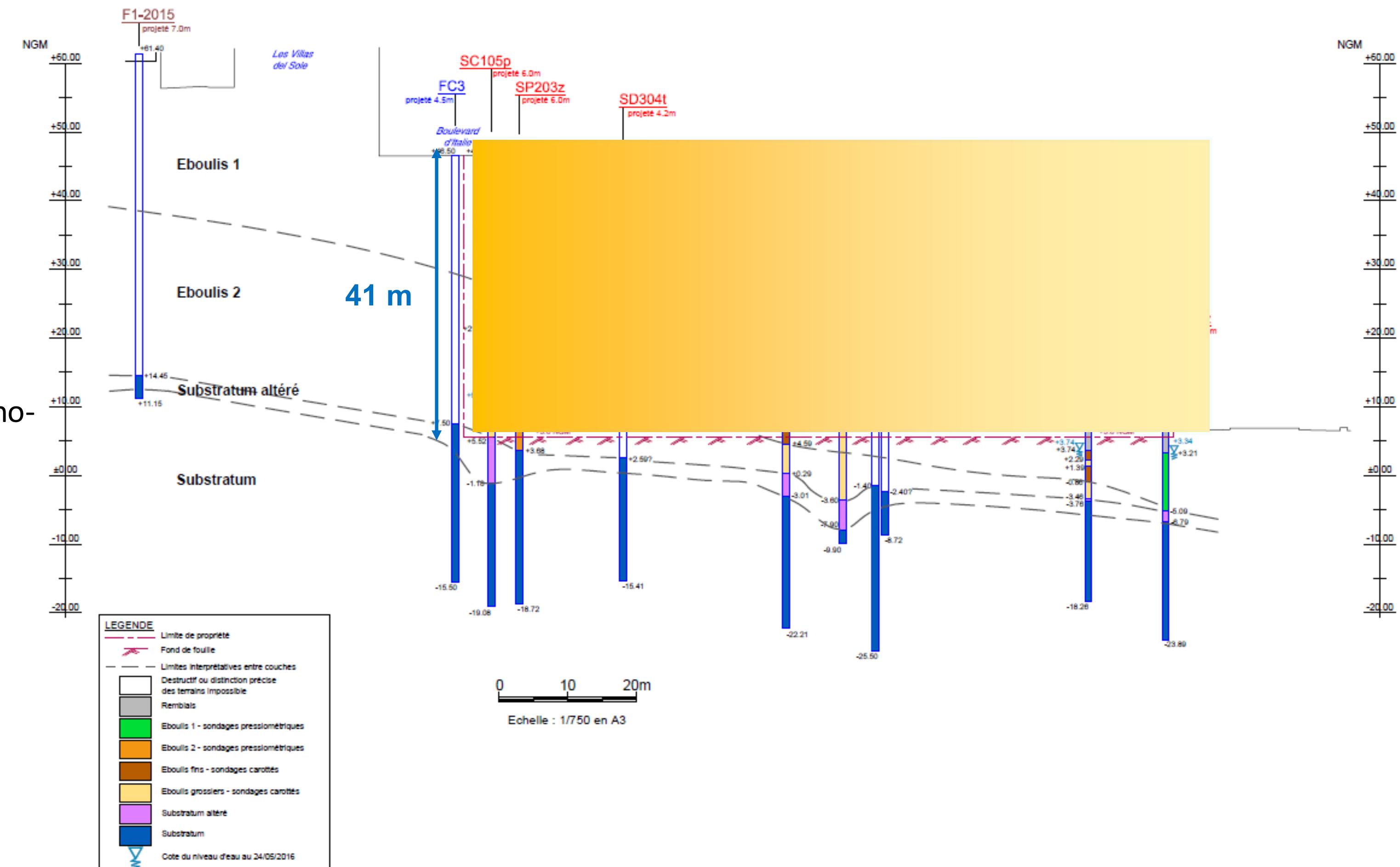
- ▶ OA: Marzocco / Vinci Immobilier
- ▶ Architecte: Arquitectonica / Giraldi
- ▶ MOe structure: Tractebel
- ▶ Entreprises : Vinci / Soletanche Sam / Caroli



# Testimonio II, un projet immobilier exceptionnel dans un grand versant

## Géologie

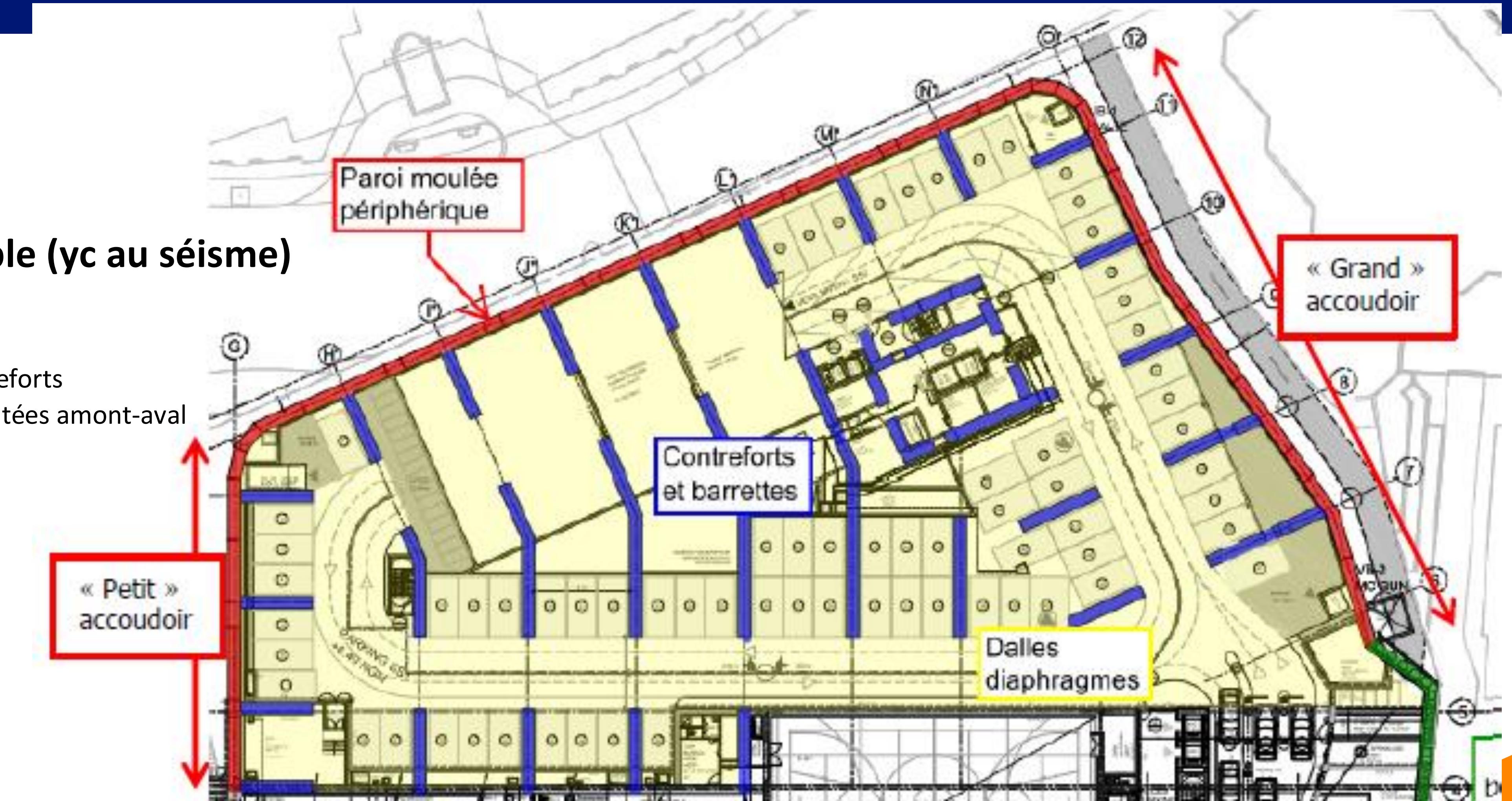
- ▶ Éboulis principalement
- ▶ Anrage fondations dans le substratum marno-calcaire



# Testimonio II: Structure en U auto-stable

## Grand socle auto-stable (yc au séisme)

- Aucun tirant
- Enceinte en paroi et contreforts
- Barrettes intérieures orientées amont-aval

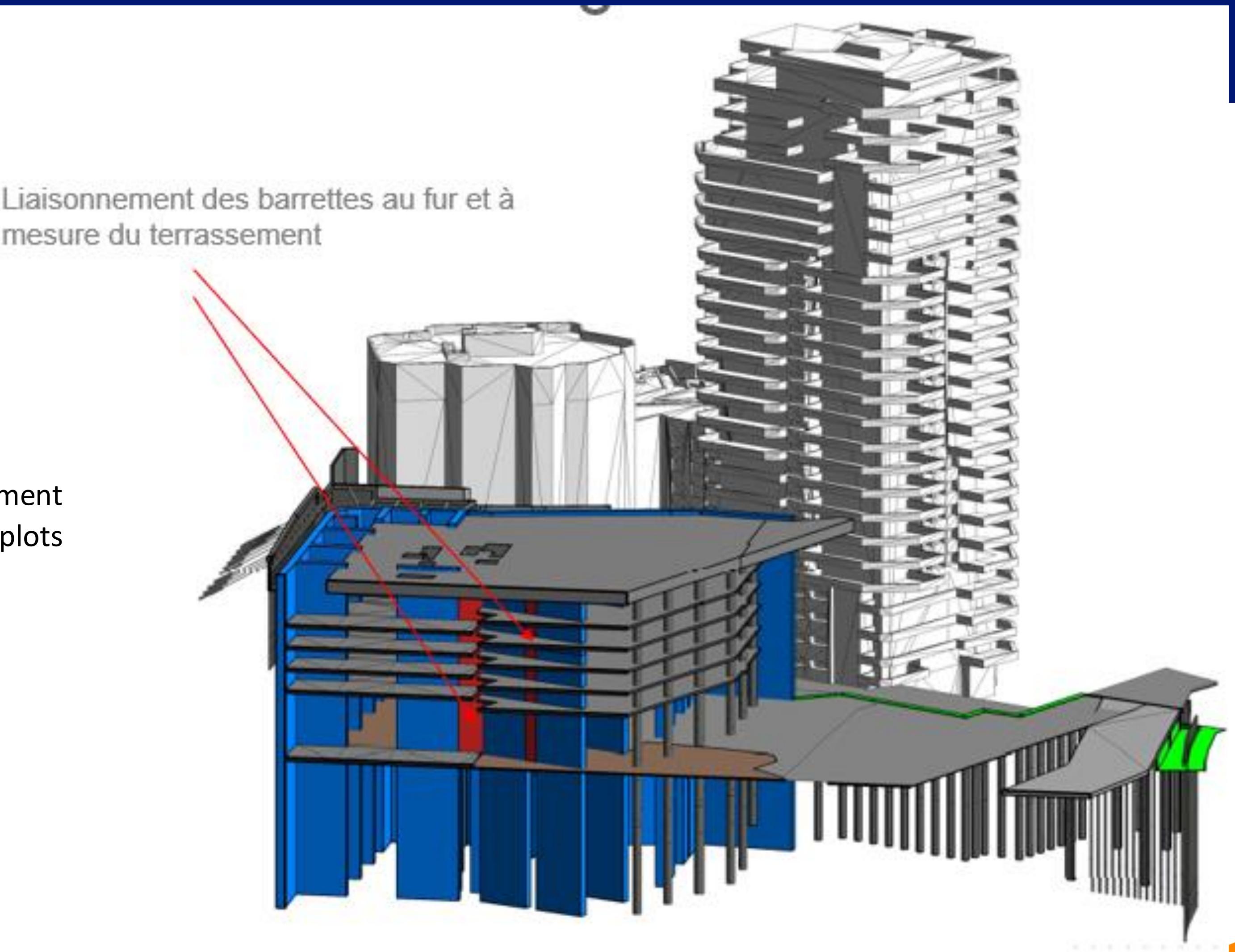


# Testimonio II: Structure en U auto-stable

## Liaisonnement des barrettes

- ▶ Excavation en taupe
- ▶ Rigidification progressive de la boîte par liaisonnement horizontal des éléments résistants intérieurs (barrettes) -> plots de clavage
- ▶ Dans un même panneau de paroi, les cages sont liaisonnées

Importance du phasage



# Testimonio II: Liaisonnement des cages



# Les études et méthodes de dimensionnement

# Grimaldi Forum : Une structure complexe calculée avec des moyens simples

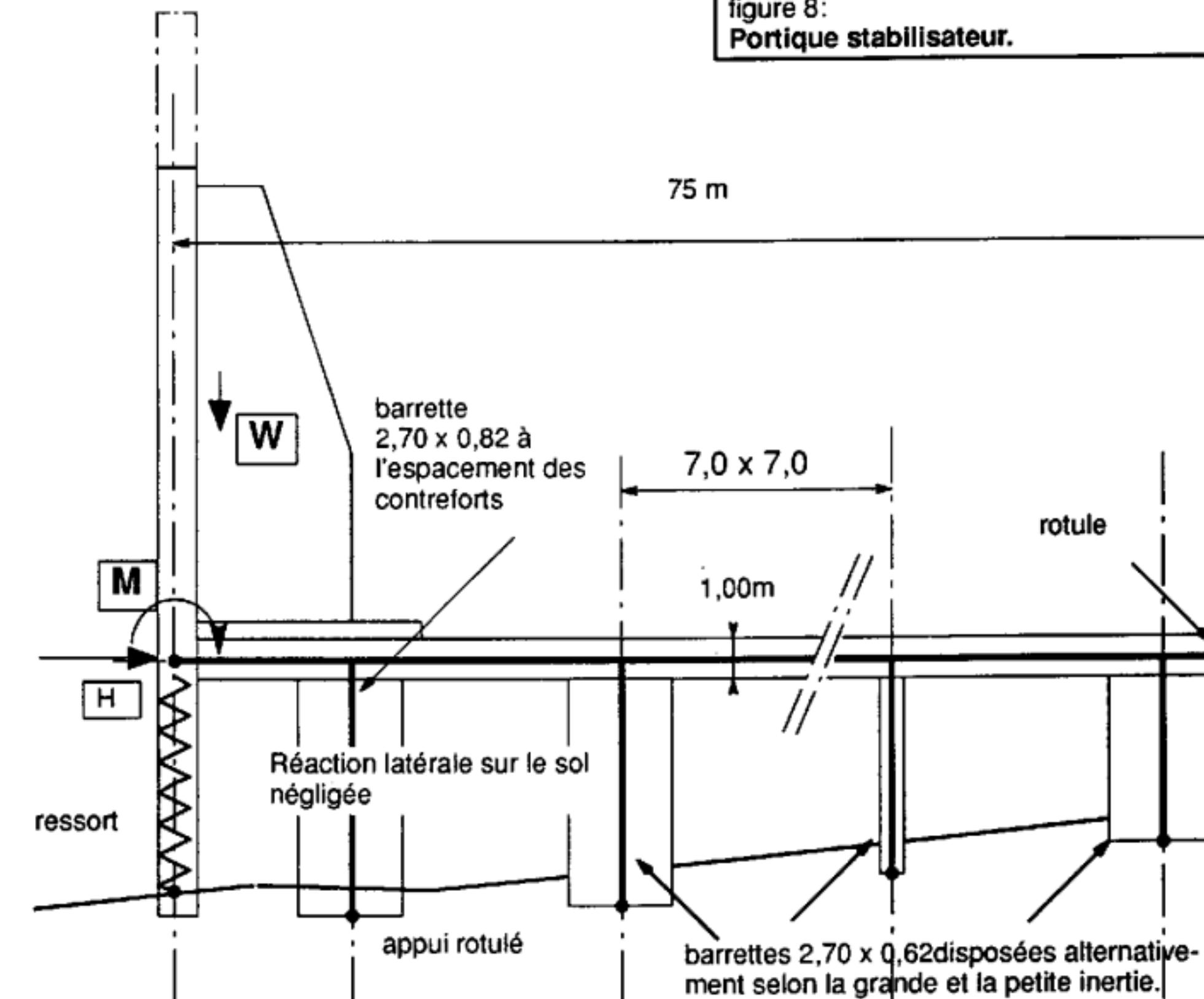
## Méthode au coefficient de réaction

- ▶ Écran de soutènement calculé avec modèle au coefficient réaction
- ▶ Modifications d'inertie correspondant au contrefort
- ▶ Appui radier modélisé par une matrice de rigidité

## Matrice de rigidité

- ▶ Modélisation en portique du radier et des barrettes
- ▶ Raideur en traction de la fiche de paroi
- ▶ Introduction de torseurs à la base des contreforts
- ▶ En adaptant le module de béton et les efforts d'origine à la situation (phase service normal ou séisme)

figure 8:  
Portique stabilisateur.



# Testimonio II: Des moyens de calcul adaptés aux enjeux

## Aspects géotechniques

- ▶ Évaluer les déplacements à l'arrière du socle
- ▶ Évaluer correctement la poussée à l'arrière (objectif de déplacement faible / masse de terres excavées) → poussée entre  $K_0$  et  $K_a$
- ▶ Raideur structure pas facile à appréhender



**Modèle 3D géotechnique phasé (BE Terrasol)**

## Aspects structure

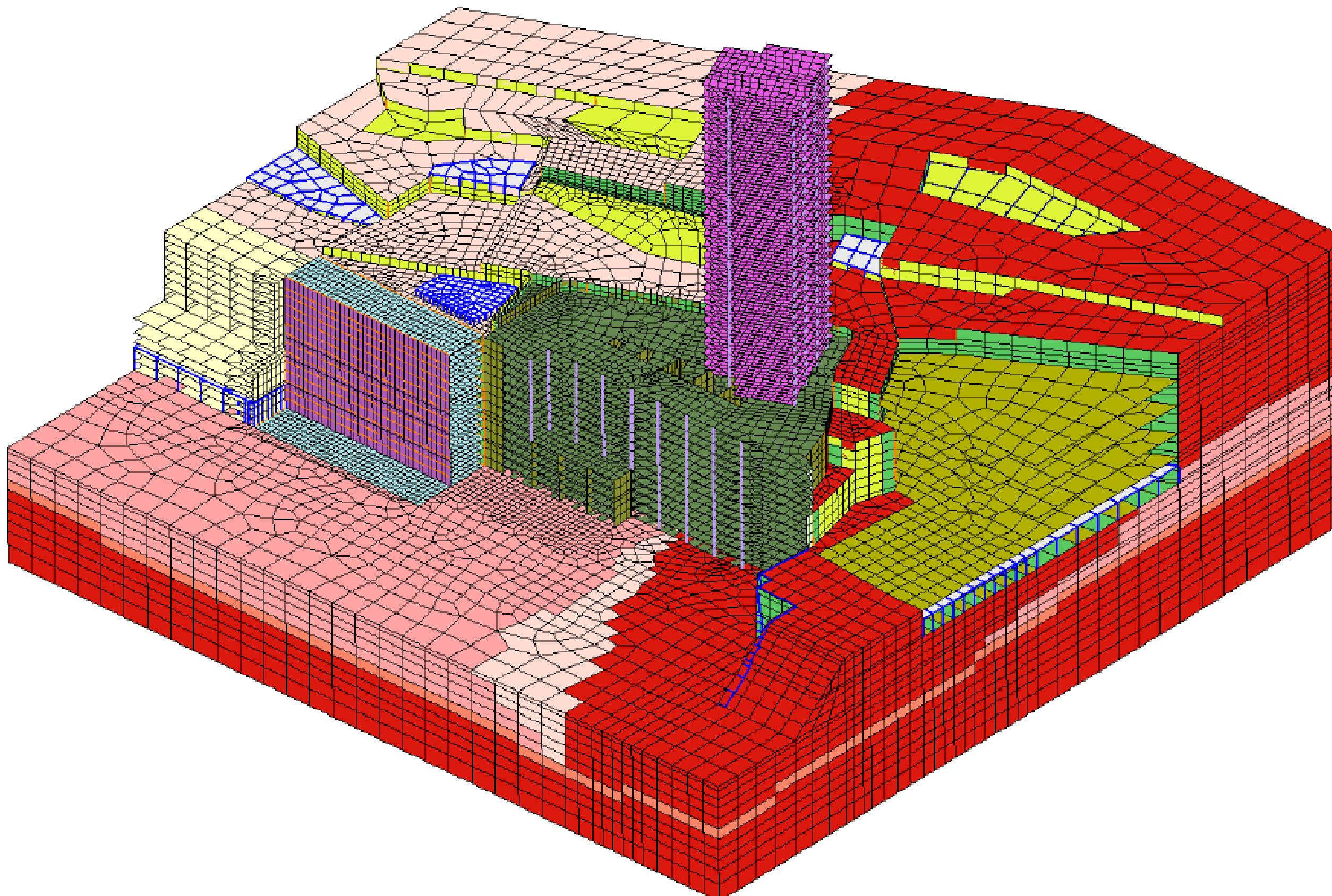
- ▶ Évaluer correctement les efforts dans les panneaux de paroi et barrettes
- ▶ Inertie amont-aval évolue en fonction du phasage, avec le coulage des dalles à l'avancement et le liaisonnement progressif des barrettes



**Modèle 3D structure phasé (BE SENG)**

- ▶ Raideur du sol prise en compte
- ▶ Applications des poussées tirées du modèle géotechnique
- ▶ Joints entre panneaux

# Testimonio II: Des moyens de calcul adaptés aux enjeux



## Exploitation des modèles (en particulier modèle structure)

- Avantage: grosse optimisation du ferraillage
- Inconvénient: quasiment 1 plan / panneau de paroi moulée ou de barrettes..., soit 99 plans de cages d'armatures

# Un point commun notable: Les modifications de projet en cours de chantier!

# Grimaldi Forum : Arrêt de chantier de 1 an et refonte des besoins du client et du ballet de Monaco

## Approfondissement des FF

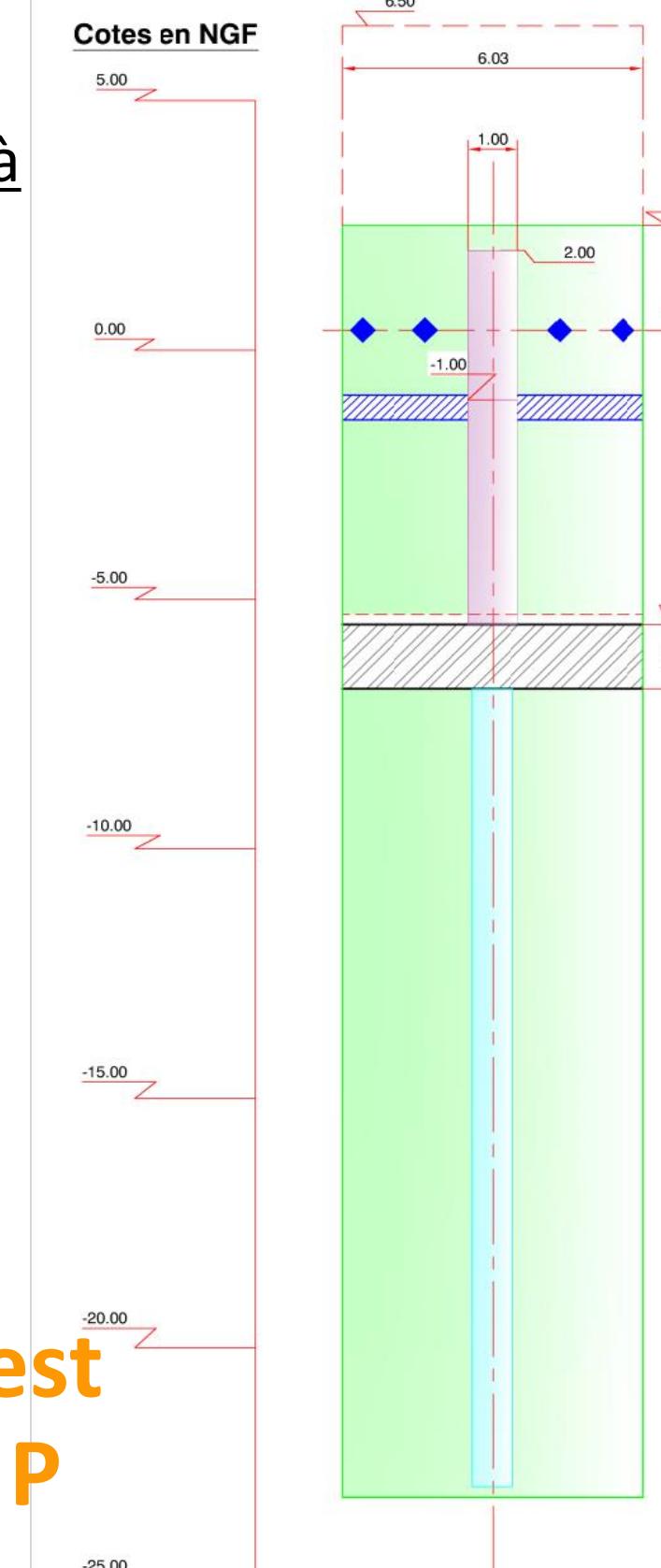
- 3 m au sud
- 9 m au Nord
- En essayant de maintenir les structures déjà construites

## Fonds injectés à refaire

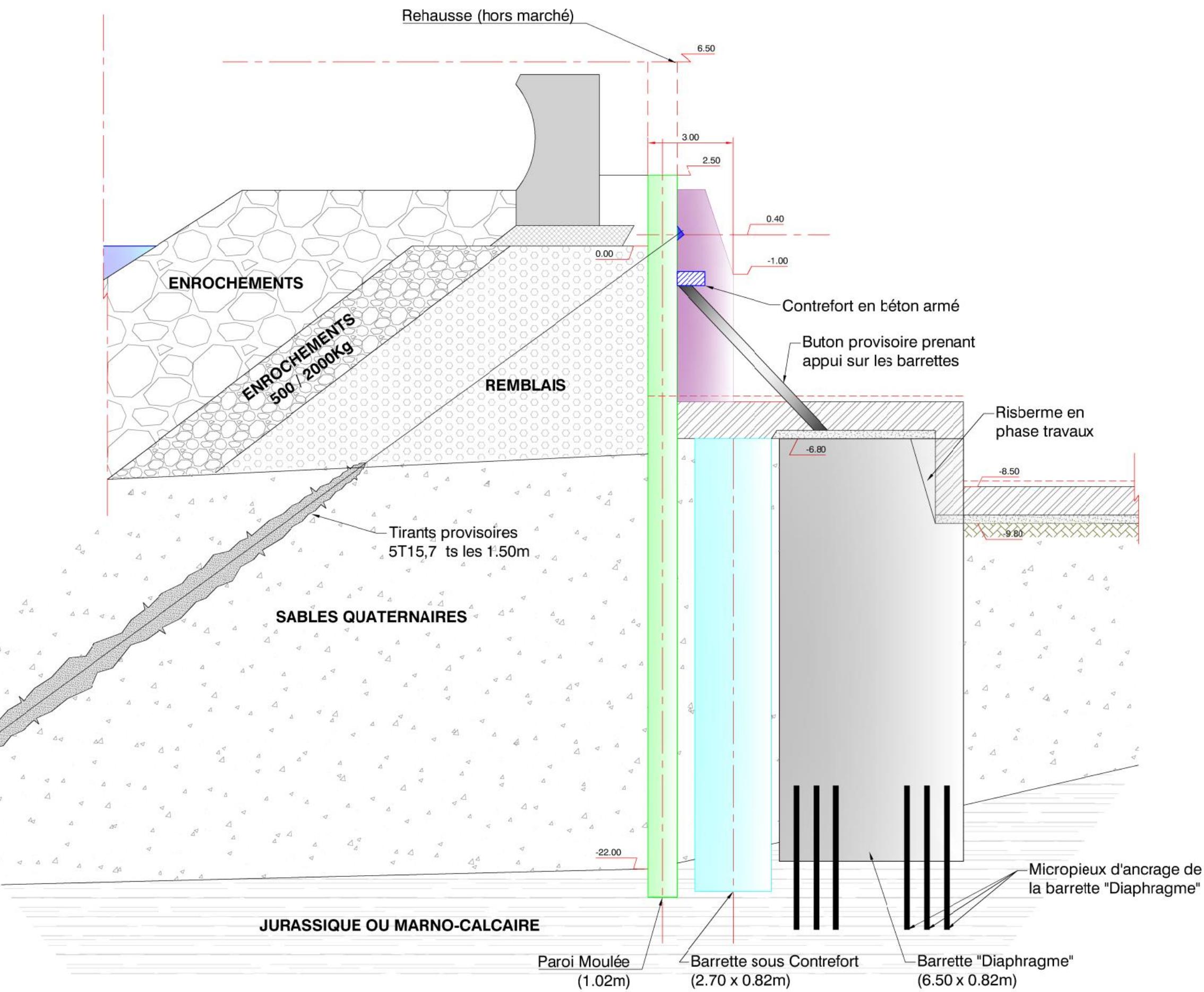
## Impact sur les tirants!

- Protection tirants provisoires inadaptée pour une longue durée d'utilisation...
- Doublement des tirants à certains endroits, ou ajout de bracons
- Nouveaux tirants sous sas

**Actuellement, l'usage à Monaco est de traiter tous les tirants en type P**



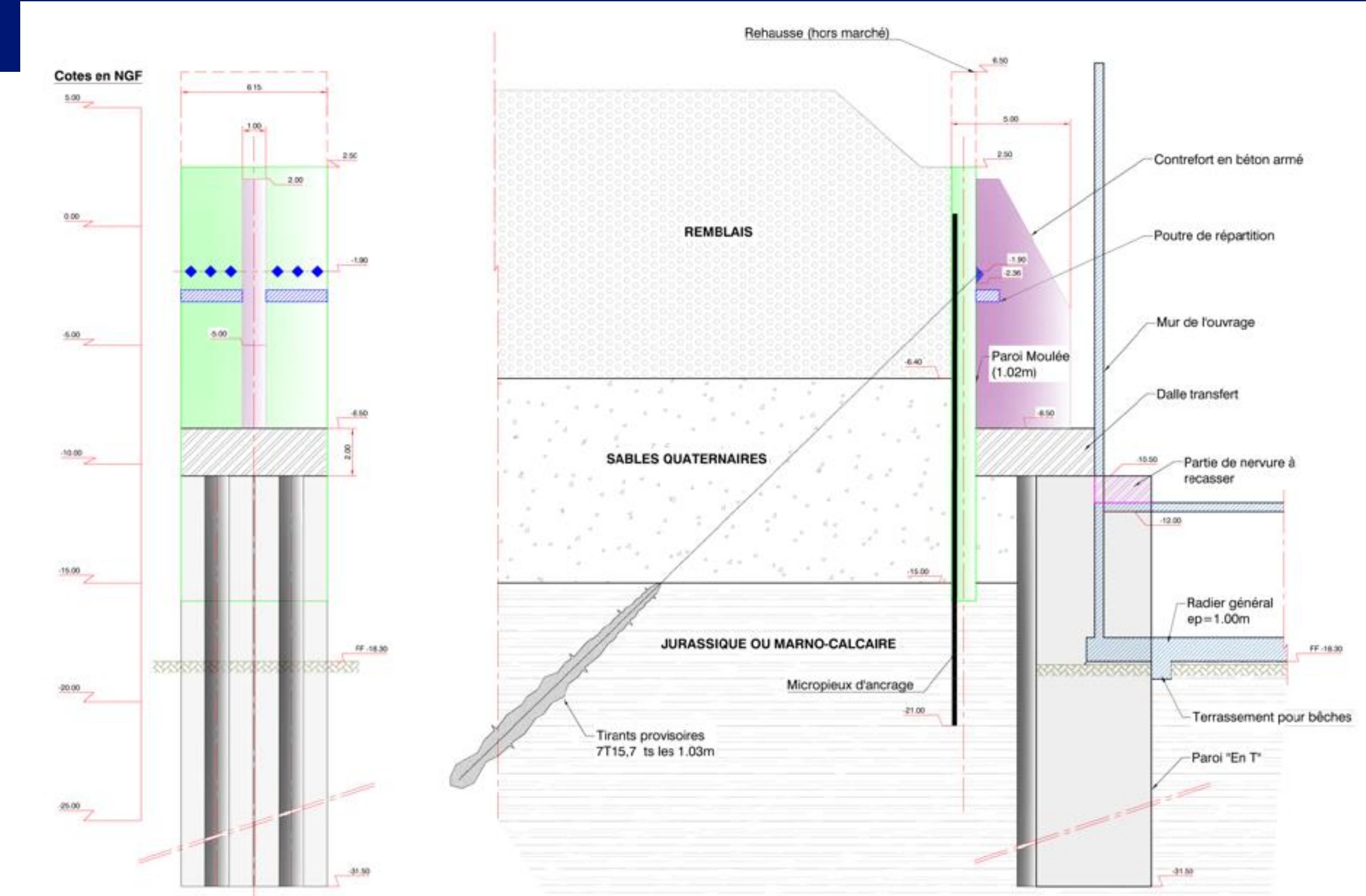
## VARIANTE PROJET FINAL



# Grimaldi Forum : Arrêt de chantier de 1 an et décision d'approfondissement des FF

## Zone Nord

- ▶ Parois en Té sous le niveau de FF initial
- ▶ 2 tés / contrefort, ancrés dans le substratum
- ▶ Armés par des HA56!



# Grimaldi Forum: Fouille Nord après approfondissement

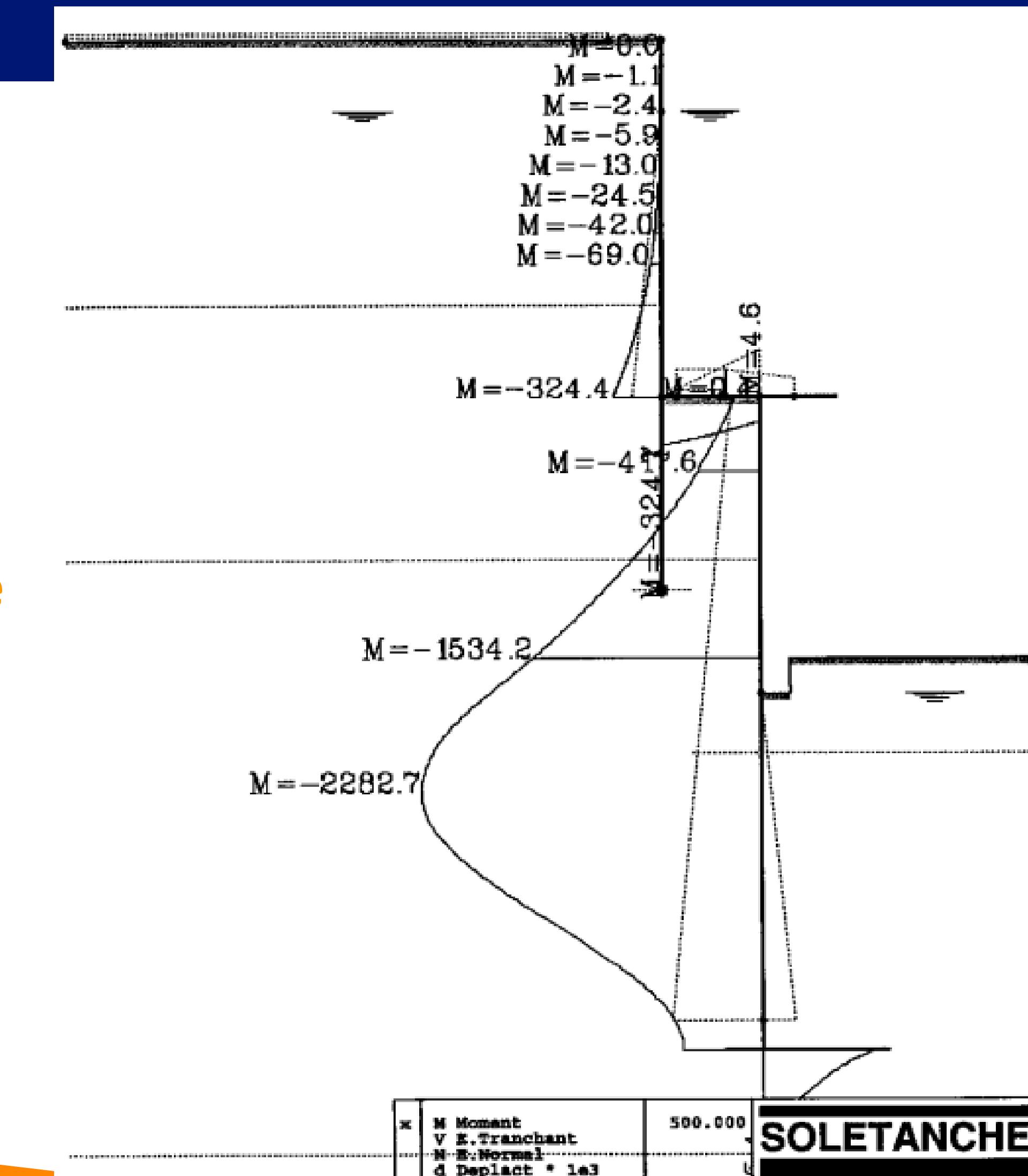


# Grimaldi Forum : modélisation de l'interaction entre paroi sup. et paroi inf. en Tés

## Développement de « PARIS »

- ▶ Coeff. de réaction
- ▶ Permet l'interaction entre élément poutres

→ Évite de passer par une matrice de rigidité



# Testimonio II: Pas de modification du FF! Mais une anticipation des terrassements aval

## Accélération planning: anticipation des terrassements aval

- ▶ Talus de grande ampleur
- ▶ Réduction de butée devant les barrettes, alors que l'infrastructure n'est pas complète



Analyses complémentaires



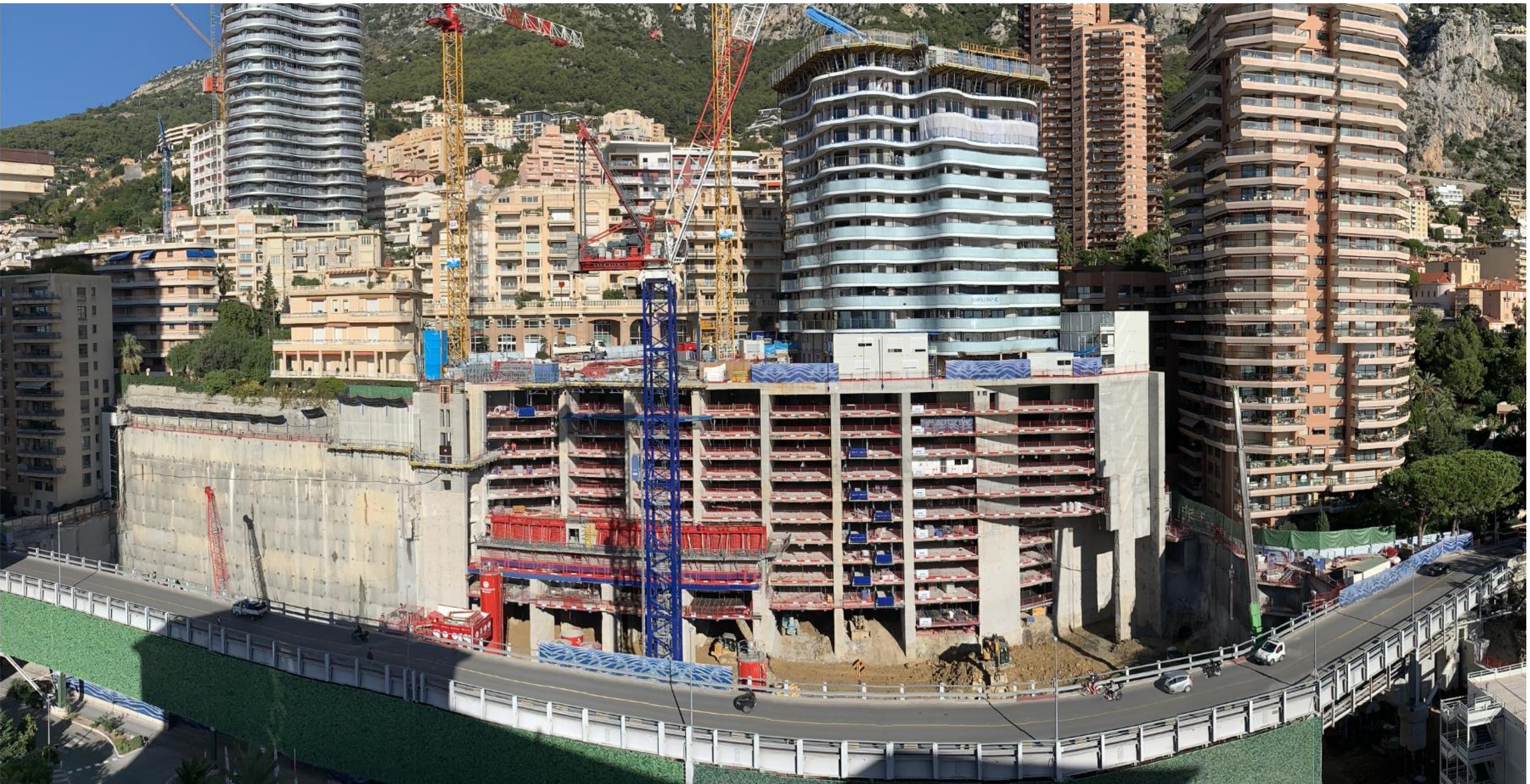
# Testimonio II: Rehausse de la Tour

## Cerise sur le gâteau : ajout de 5 + 5 étages à la Tour n°2

- ▶ 1<sup>ère</sup> modification de la DDC avant réalisation des barrettes: vérification des contraintes béton dans les barrettes et ajout d'acières comprimés (+ approfondissement barrette)
- ▶ 2<sup>ème</sup> modification de la DDC après réalisation des barrettes: ajout de micropieux localement depuis le FF + vérinage



# Testimonio II: Quelques photos



# Testimonio II: Quelques photos



SAINTE BARBE DES 4S – 04/12/2025  
OUVRAGES REMARQUABLES ET ÉVOLUTION DES PRATIQUES  
MONACO – LE GRIMALDI FORUM VS TESTIMONIO II

# Testimonio II: Quelques photos



SAINTE BARBE DES 4S – 04/12/2025  
OUVRAGES REMARQUABLES ET ÉVOLUTION DES PRATIQUES  
MONACO – LE GRIMALDI FORUM VS TESTIMONIO II

# Conclusion

# Deux ouvrages complexes où les problématiques géotechniques et structurelles sont imbriquées

## Imbrications fortes entre les problématiques géotechniques et structurelles

- ▶ Ouvrages de soutènements en appui sur des réseaux de barrettes et contreforts
- ▶ Importance du phasage de réalisation de la structure GC

## Des outils qui ont évolué

- ▶ Feuilles de calcul Excel sur le Grimaldi Forum, et logiciel au coeff. de réaction autorisant l'interaction entre poutres
- ▶ Modèles EF 3D géotechnique et structure sur Testimonio II, avec fortes optimisations de ferraillage à la clé

*Mais ce n'est pas la sophistication des outils qui rend possible la complexité des ouvrages , c'est bien l'audace et l'imagination des ingénieurs !*

## Et des projets qui réservent des surprises

- ▶ Modification des conceptions et phasages au fil de l'eau
- ▶ Et tous les aléas chantier dont je n'ai pas parlé...

*On peut exécuter tout ce qui se propose  
Surtout si le chemin est long du projet à la chose  
(Molière revu et corrigé par un ingénieur des 4S)*