

# Quelques phénomènes d'altération à travers le monde et leurs conséquences sur les dispositions constructives

L. Delhaye, BESIX Group



## Introduction

# Altération (sens large) :

Modifications des propriétés physico-chimiques que peuvent subir une roche, sous l'effet d'agents atmosphériques ou des eaux de surface ou thermales.

*XIVe siècle. Emprunté du bas latin alterare, « changer, empirer, altérer ». I. Rendre autre.*

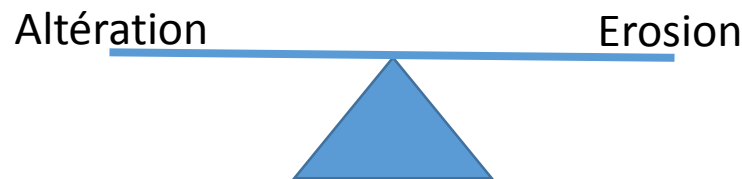
*1. Modifier dans sa nature, dans sa constitution, etc. (Dictio. De l'Académie Française)*

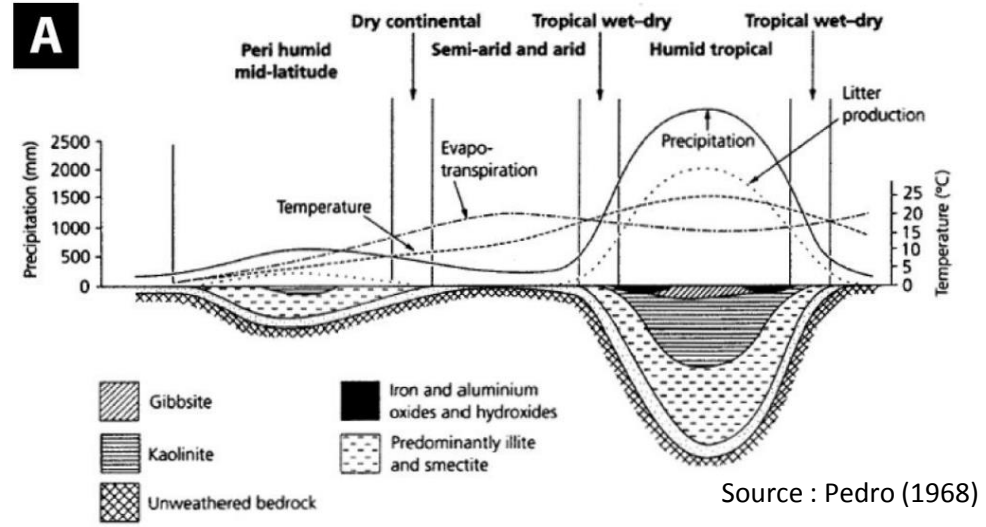
### **Altération s.s.**

- Modifications d'ordre chimique et conséquences au niveau minéralogique
- Phénomène supergène : en surface ou faible profondeur. Faible température (<50°C)
- Phénomènes hydrothermaux : Haute température (50<x<400°C) et source en profondeur
- Phénomène principaux : hydrolyse, dissolution, Précipitation, hydratation-déshydratation

### **Erosion (ou « altération mécanique »)**

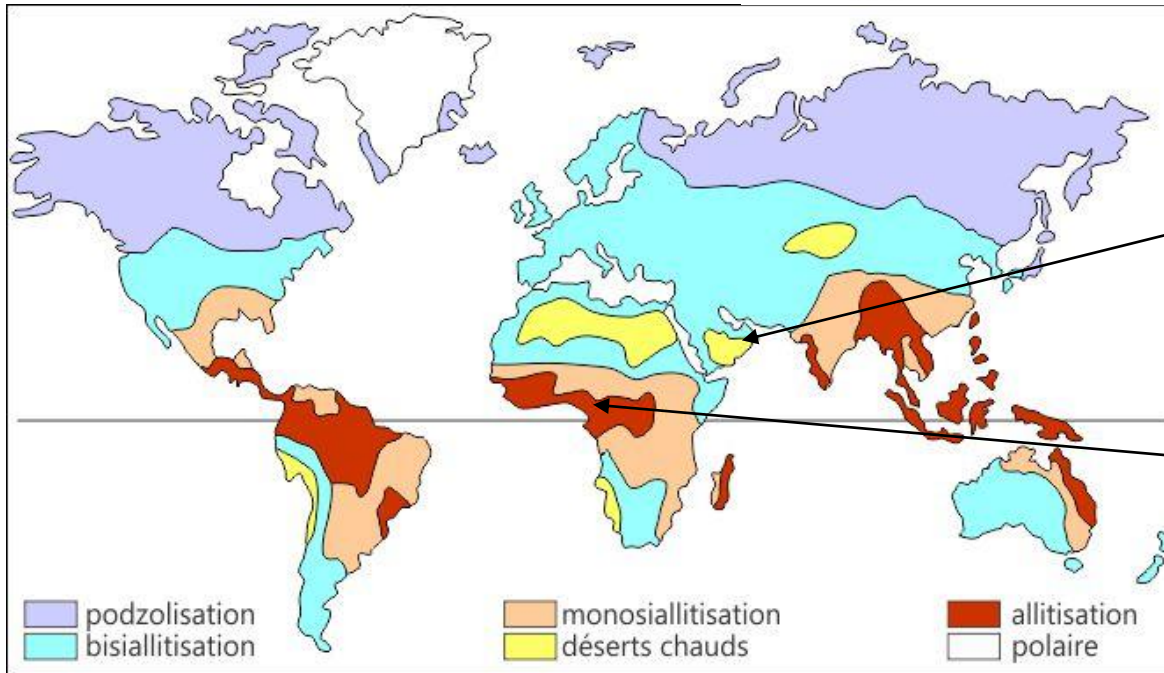
- Modifications d'ordre physique
- Division en fragments/grains plus petits
- Fissuration
- Agents principaux : Eau, température, Vent





Source : Pedro (1968)

## Distribution géographique



1. Climat Aride/environnement marin :  
Cas de Duqm
2. Climat Tropical :  
Cas de Nachtigal  
Cas de la Mé  
Cas de Bioko

## Plan de l'exposé

- 1. Phénomènes d'altération en milieu aride :
  - *Port de Duqm (Sultanat d'Oman).*
  
- 2. Phénomènes d'altération en milieu tropical :
  - *2.1. Barrage et centrale hydroélectrique de Nachtigal (Cameroun) ;*
  - *2.2. Station de traitement d'eau de la Mé (Côte d'Ivoire) ;*
  - *2.3. Les 3 ponts de Riaba-Bioko (Guinée Equatoriale).*



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)

- Nouveau pôle économique au Moyen-Orient ;
- Terminal LNG ;
- Construction d'un mur de quai (1000m) et de deux jetées (400m) ;
- Construction à sec, après mise en place d'un bund de sable dragué et mise à sec du fond marin par rabattement ;



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman) Stratigraphie



GROUND UNITS	AVG THICKNESS [M]	DESCRIPTION
Unit 1	2.4	Clean to silty <b>SAND</b> .
Unit 2	[4.9] <sup>2</sup>	Very weak to weak <b>CALCARENITE</b> material. <u>Locally</u> encountered. Porous, fragmented. Fractures are partly open. Age : Tertiary
Unit 3	9	Light grey to light brown <b>CALCISILTITE</b> , fissured. Very weak to extremely weak. Sometimes the material is made of hard <b>CLAY</b> more than a weak rock. The layer is also named <b>CLAYSTONE</b> by Fugro. That layer is interpolated to old sabkha deposits. Specifically because of the gypsum dentelles that are observed. The fractures of the unit are mostly filled with gypsum. Age : Tertiary
Unit 4	24.6	<b>MUDSTONE</b> . Dark grey to black, thinly laminated. Horizontal to sub-horizontal. The layer is the substratum of the area and is the bearing unit for the quay wall and the jetties. In the jetty area, the layer includes many intercalations of limestone (0.2 to 0.6m lenses). Very weak (mudstone) to medium strong (limestone lenses). Age : Tertiary
Unit 5	4	<b>LIMESTONE</b> . Mostly occurs in the mudstone as lenses. In few locations as QW-BH10 the limestone is described in place of the mudstone, and indicates a better cementation of the material. Weak to Medium strong. Age : Tertiary



# 1. Roche évolutive en Climat Aride

## Port de Duqm (Sultanat d'Oman)

### Substrat rocheux de faible résistance



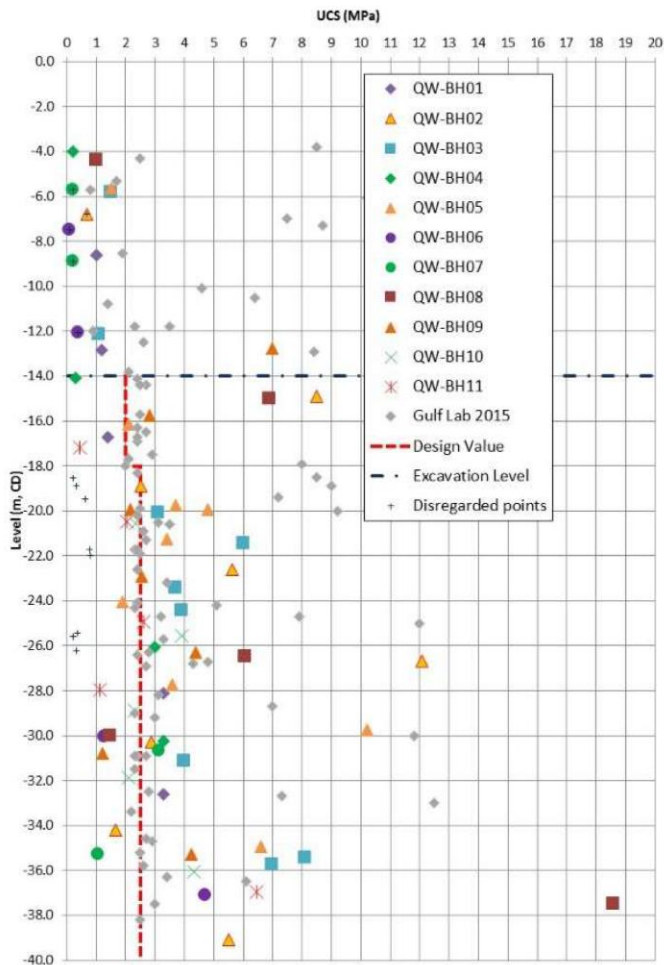
- Dépôts grisâtres argileux tertiaires horizontaux ;
- Finement laminés ;
- Intercalations de lentilles calcaire (20 à 50cm) ;



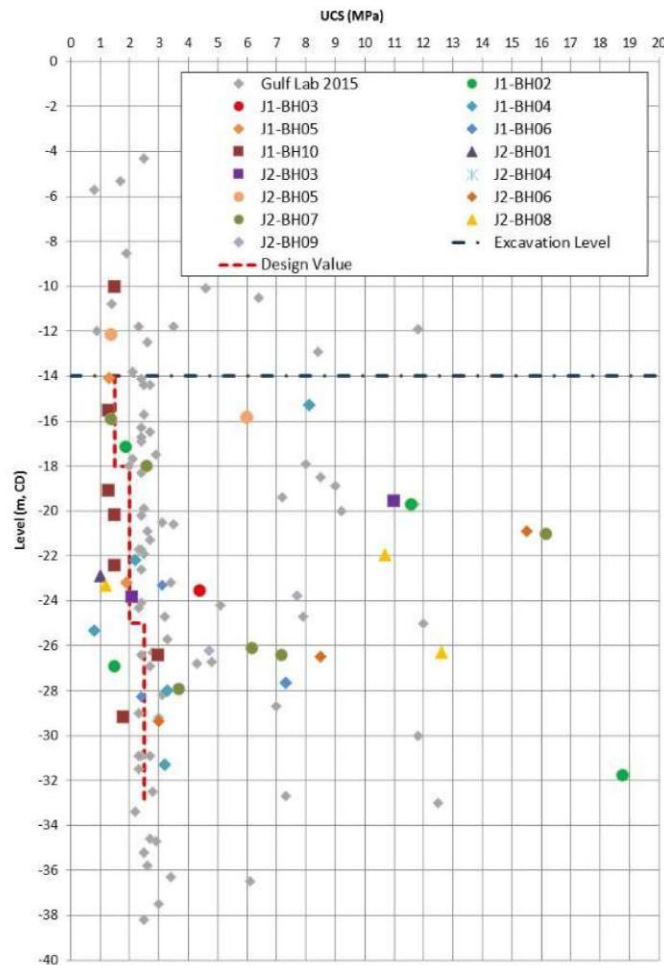
UNIT	LITHOLOGY	LEVEL [m, CD]	RQD [%]	BULK DENSITY [T/m <sup>3</sup> ]	Cu, UU [kPa]	UCS [MPa]	Em [MPa]	GSI	m <sub>i</sub>
3-4	Calcilsite- Mudstone	-14 to -18	60	1.90	1200	2.0	100	30	9
4-5	Mudstone- Limestone	-18 to -28	80	1.90	1500	2.5	100	40	9

# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman) Profil UCS

Quaywall : UCS vs Level

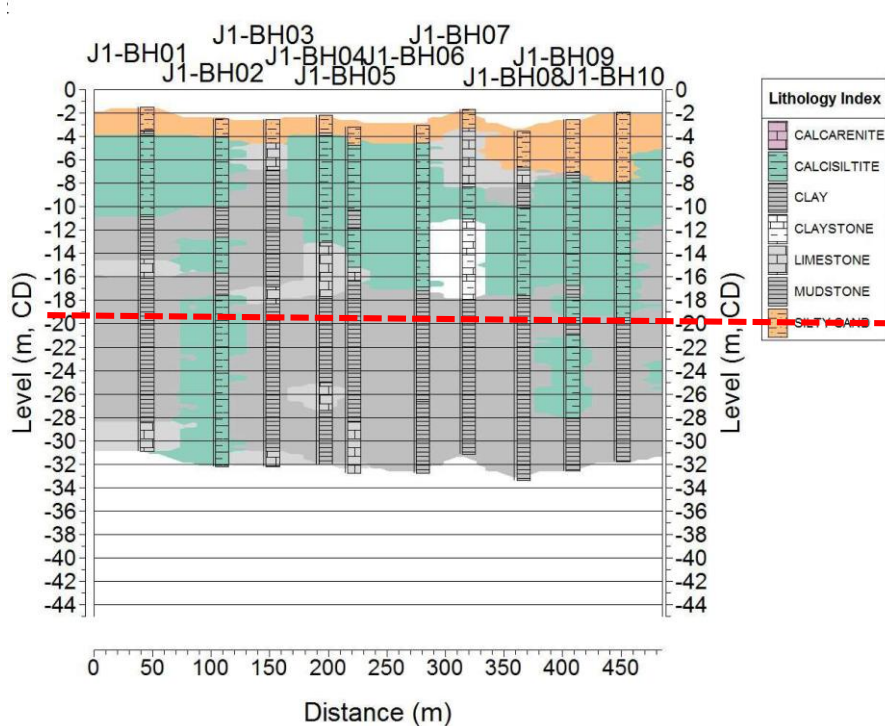


Jetty : UCS vs Level

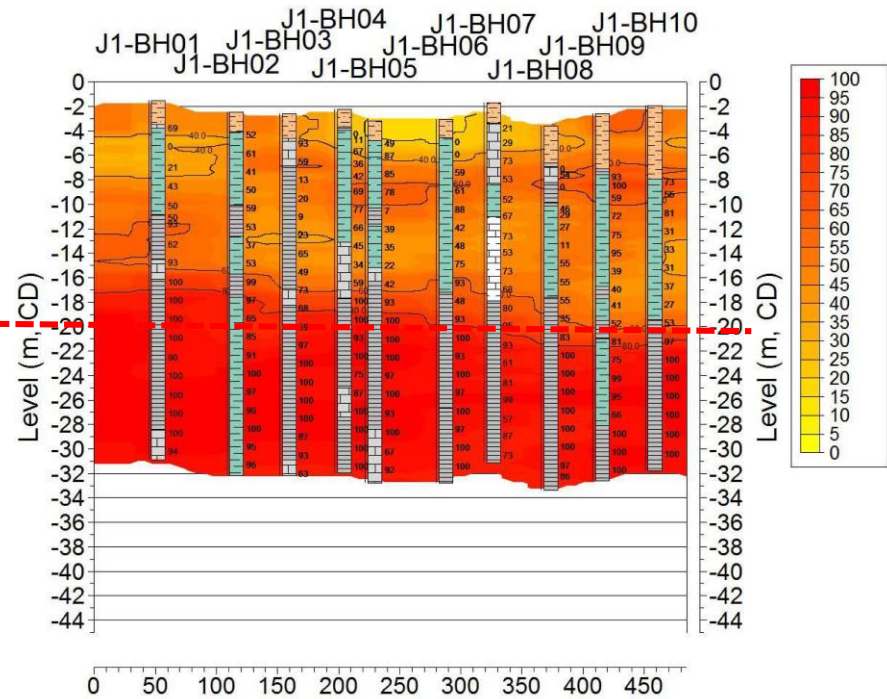




# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman) Homogénéité du support rocheux



Lithologie



RQD

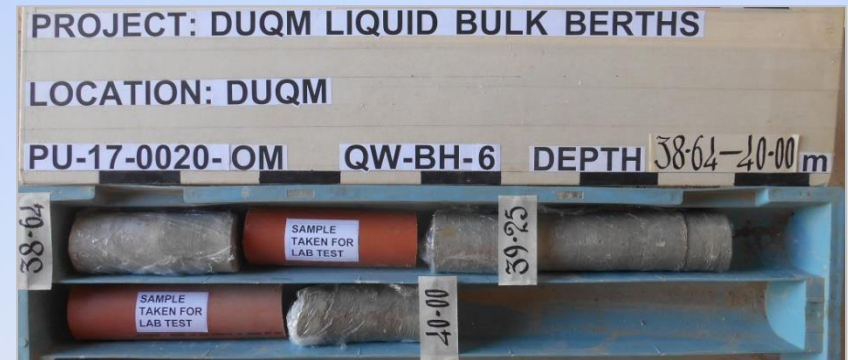


# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman) Philosophie du dimensionnement



Block wall (Gravity wall) :  
Design based on Mohr-Coulomb  
Conversion of UCS into  $c$ ,  $\Phi$  (Hoek-Brown)

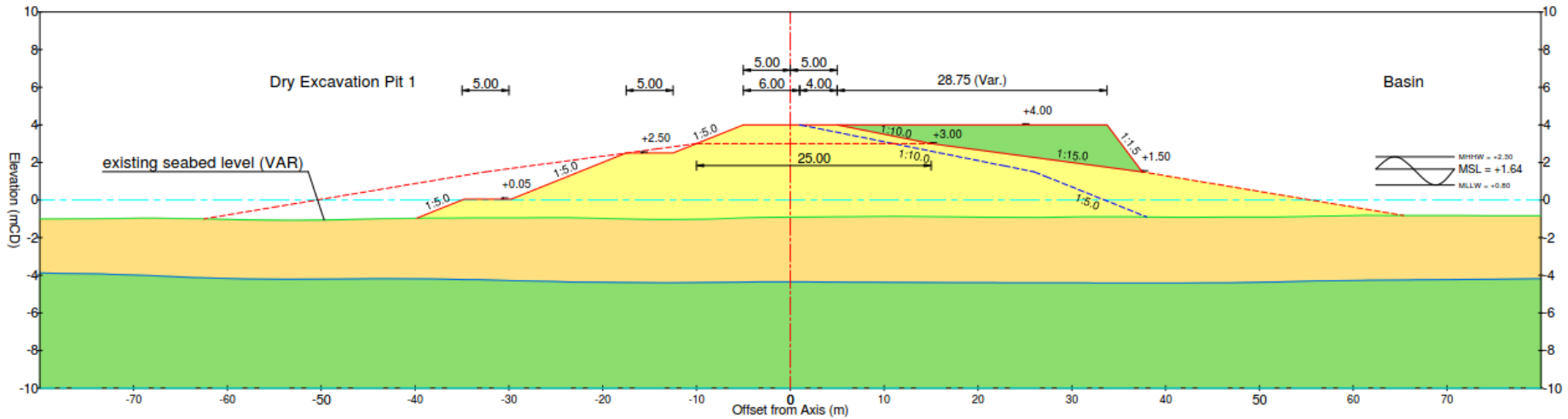
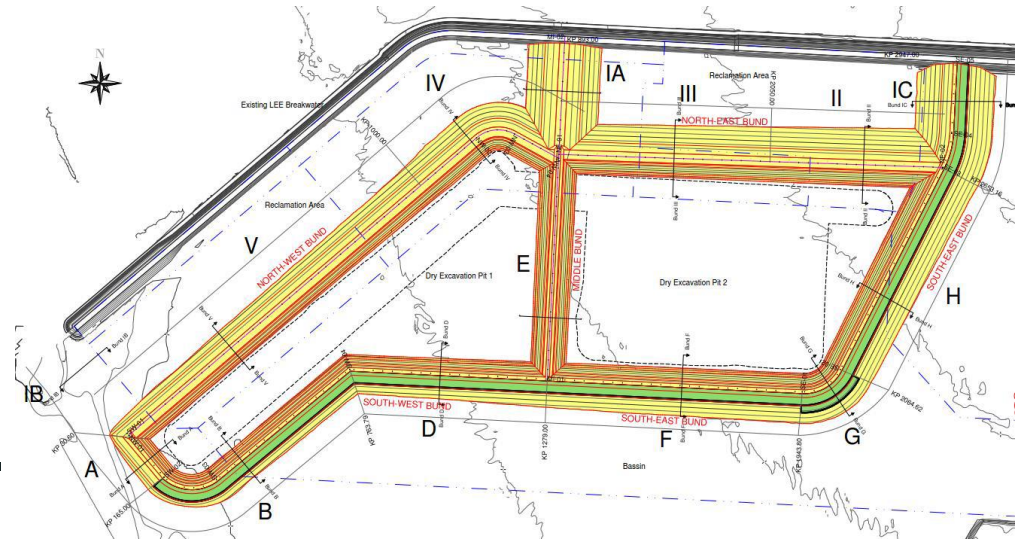
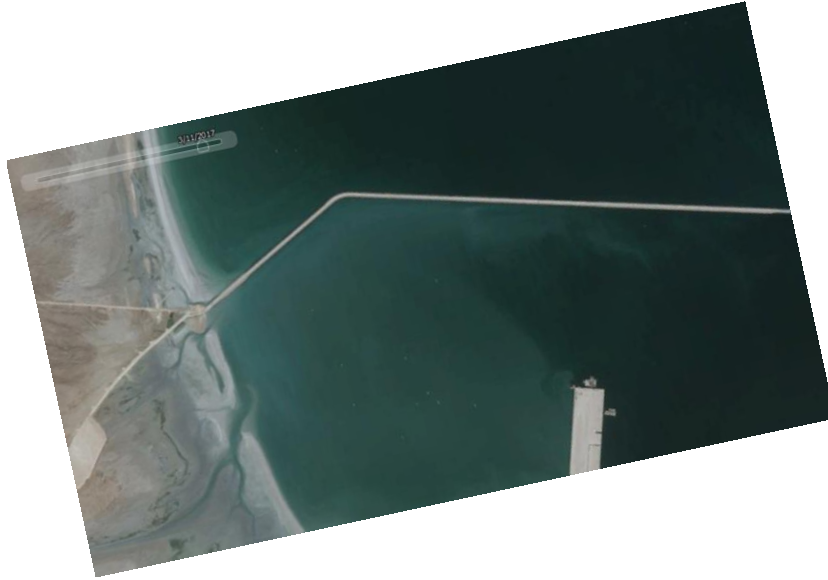
Rock socket piles :  
Design according to Tomlinson



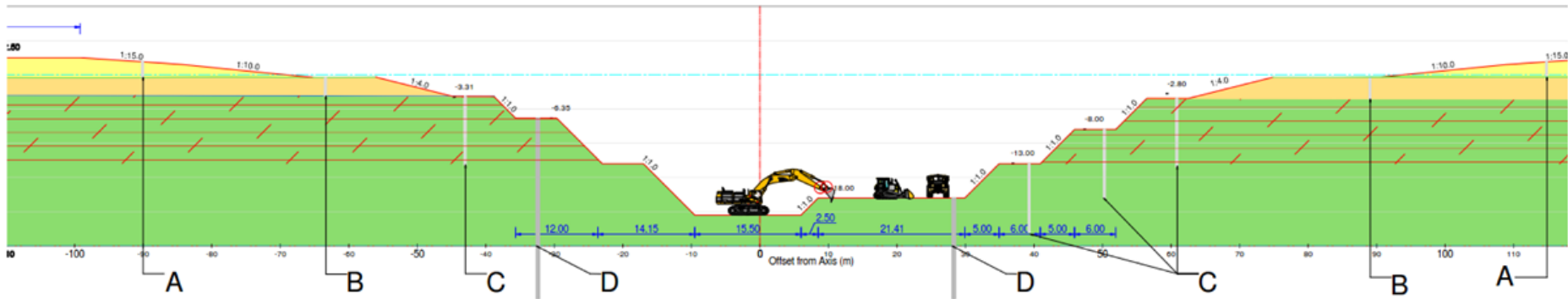
Propriétés mécaniques  
du substratum :

UCS  
RQD

# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman) Rabattement



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman) Excavation



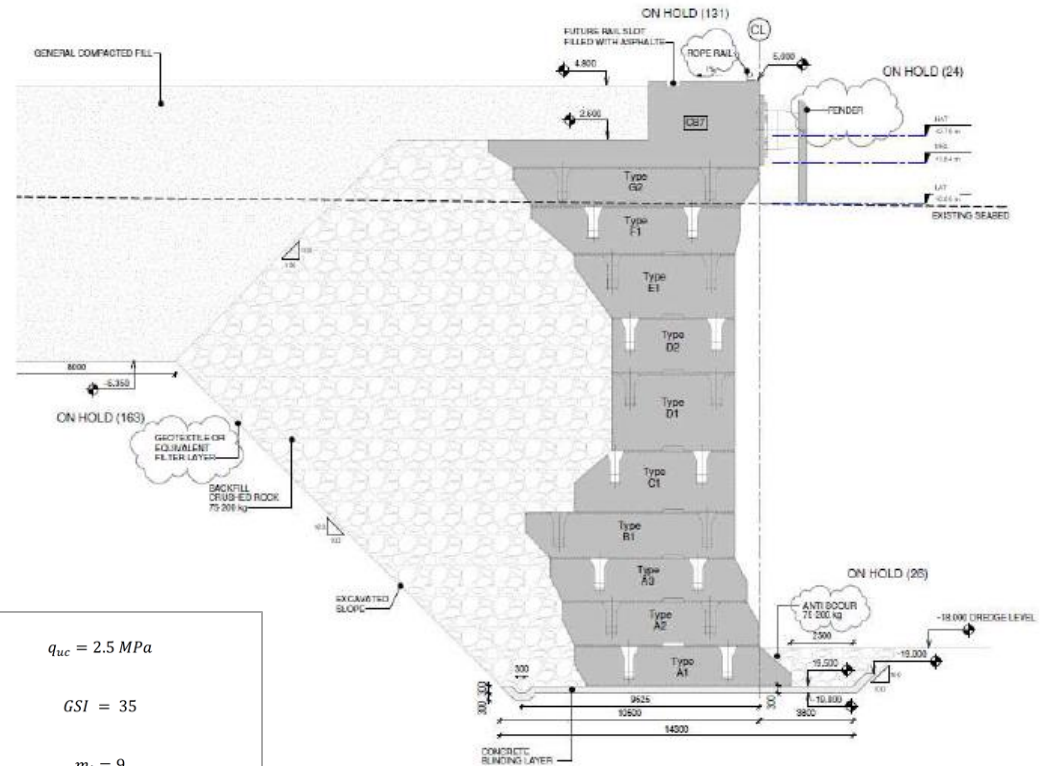
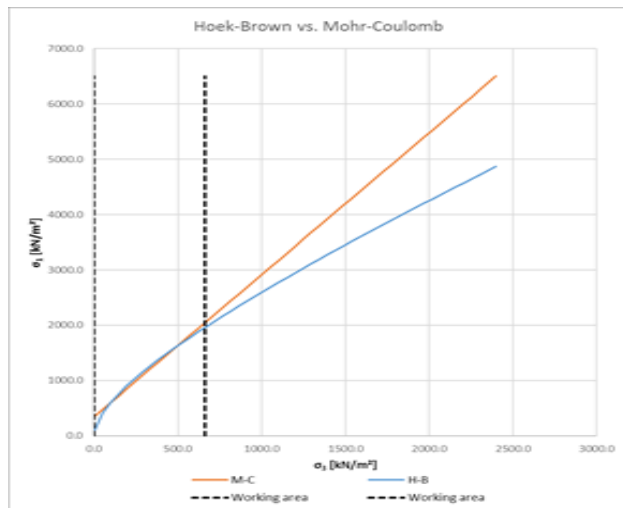
# 1. Roche évolutive en Climat Aride

## Port de Duqm (Sultanat d'Oman)

### Mur gravitaire en blocs

- 5500 blocs ;
- Largeur des blocs : 5 à 8m
- Hauteur : 2m
- Méthode de calcul de la capacité portante imposée par le client (British Standard) ;
- Paramètres équivalents Mohr Coulomb (à partir des paramètres de Hoek-Brown) :

$$c' = 83 \text{ kPa} / \Phi' = 28^\circ$$



$$q_{uc} = 2.5 \text{ MPa}$$

$$GSI = 35$$

$$m_i = 9$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right) = 0.883$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right) = 7.3 \cdot 10^{-4}$$

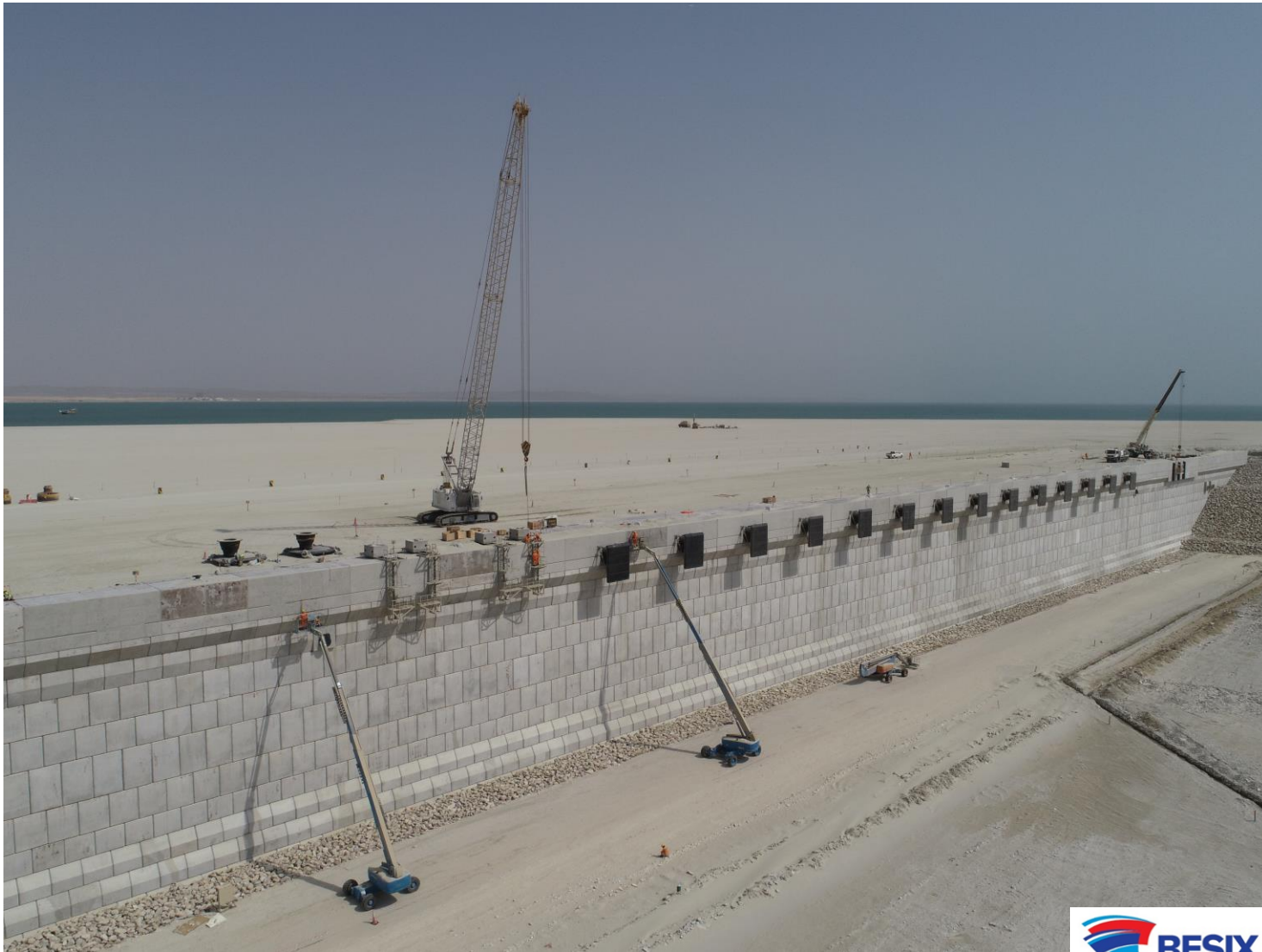
$$a = 0.5$$



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)



# 1. Roche évolutive en Climat Aride

## Port de Duqm (Sultanat d'Oman)

### Dimensionnement des pieux forés (1200mm) - Tomlinson

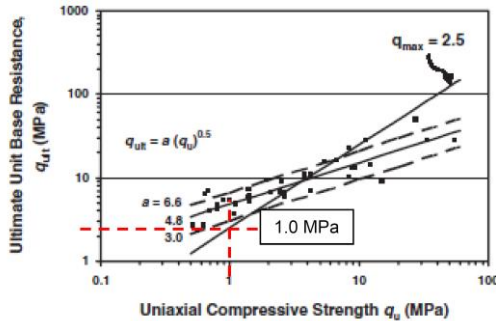
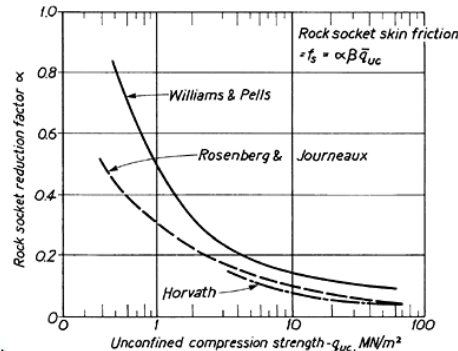
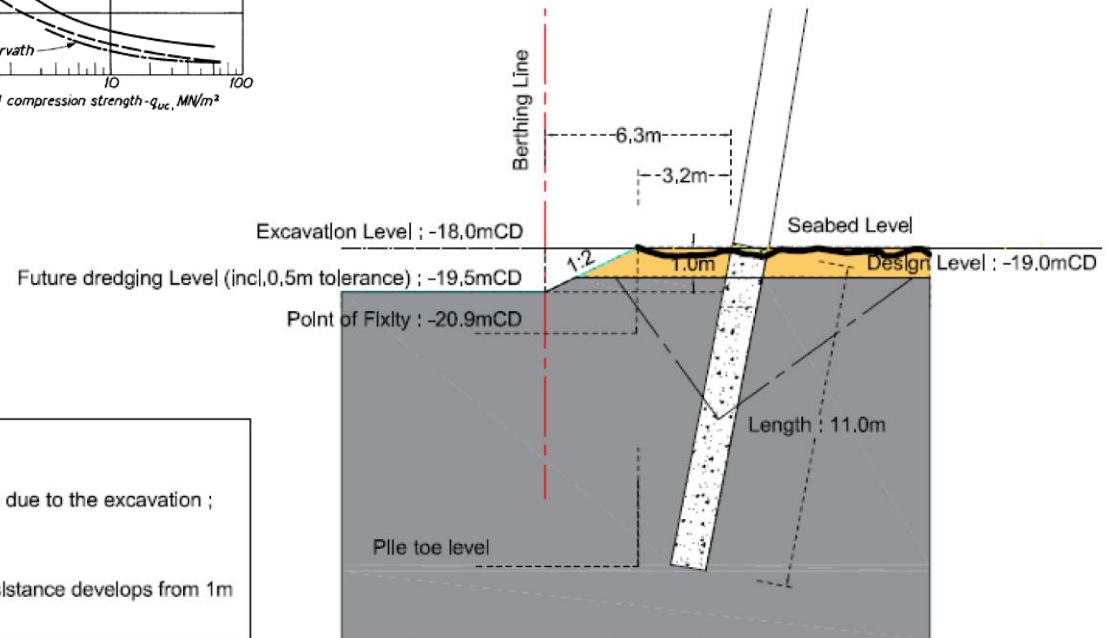


Figure 4.7 : Unit base resistance versus intact rock strength (from [C.1]).



UCS	2.0 MPa	2.5 MPa
$\alpha$	0.26	0.21
$j$	0.4 (RQD:70%)	0.4 (RQD:70%)
$\beta$	0.75	0.75
$q_{us}$	390 kPa	394 kPa



- Allowance for ;
  - Scour ;
  - Potential Disturbance due to the excavation ;
  - Excavation tolerance.
- Frictional and horizontal resistance develops from 1m below -18mCD





# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)



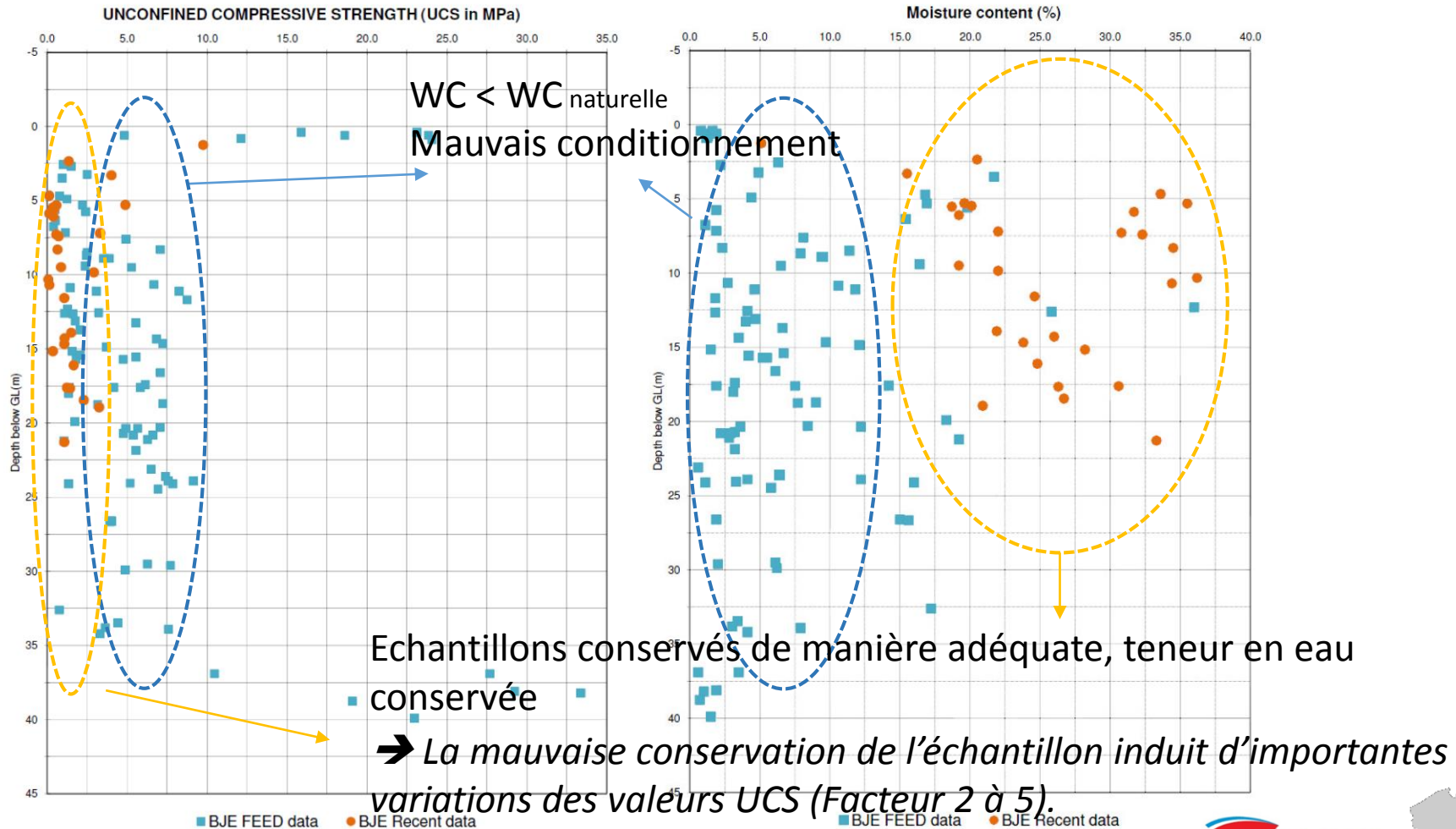
# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)



# 1. Roche évolutive en Climat Aride

## Port de Duqm (Sultanat d'Oman)

### Les roches argileuses du MO/le Mudstone de Duqm



Exemple : Bahrain LNG Import Terminal



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman) Les roches argileuses du MO/le Mudstone de Duqm



# 1. Roche évolutive en Climat Aride Cas de Duqm (Sultanat d'Oman) Comportement du Mudstone vs. teneur en eau Slake Test



# 1. Roche évolutive en Climat Aride

## Port de Duqm (Sultanat d'Oman)

### Comportement du Mudstone en fonction de la teneur en eau

- Augmentation significative de la valeur UCS après sécheresse ;
- Réduction considérable de la qualité du mudstone après quelques heures lorsque celui-ci a été exposé à la sécheresse et remis au contact de l'eau de manière successive.



- Conséquences?
  - ➔ Calcul de la capacité portante adapté pour les pieux forés ;  
Frange superficielle du terrain non considérée
  - ➔ L'alternance des phases sécheresse/mouillage du support du mur de quai.  
Mise en place d'un béton de propreté dans les deux heures après excavation et mise à nu du niveau d'assise.
- Objectif : Maintenir une teneur en eau du terrain en place aussi proche que possible de la teneur initiale. Et plus particulièrement éviter les cycles déshydratation/hydratation.

# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)



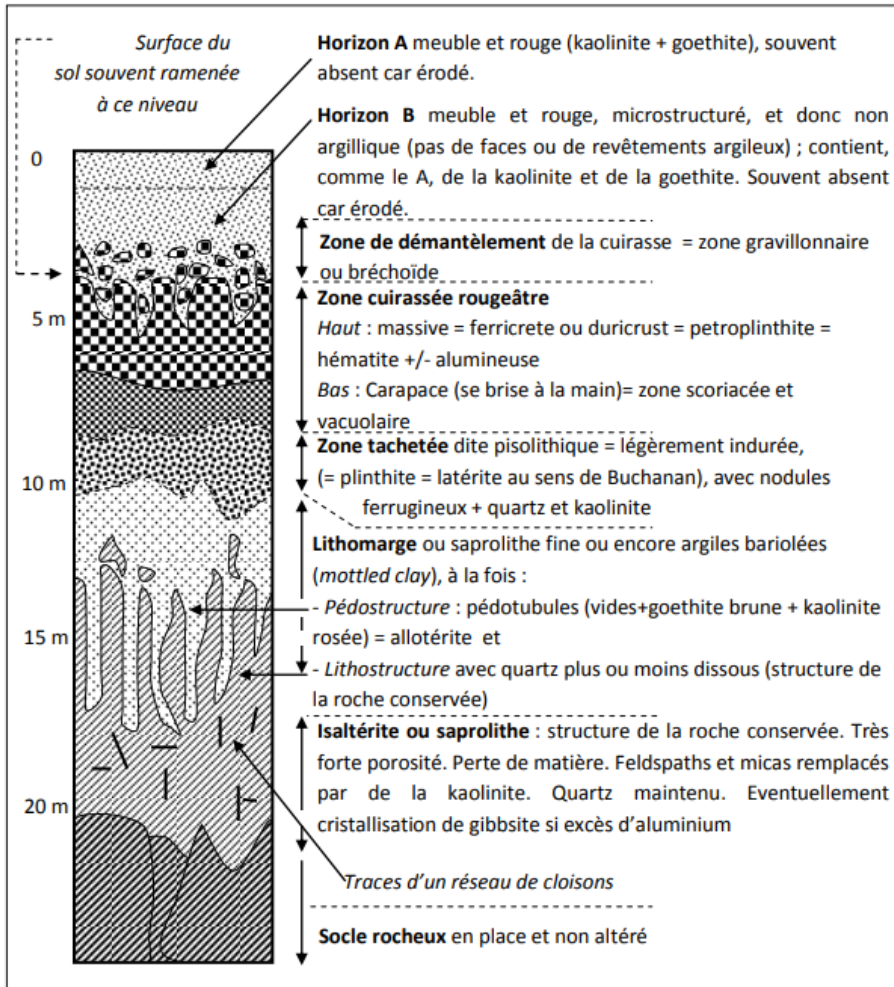


# 1. Roche évolutive en Climat Aride Port de Duqm (Sultanat d'Oman)

En cours d'exécution :  
Monitoring de la stabilité des talus



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial



Source : Legros (2013)

- Altération profondes et longue en raison d'une exposition importante à des températures élevées et de nombreuses précipitations.
- Matériau caractéristique de ces régions : la Latérite.
  - Sols rougeâtres riche en Fer, Aluminium et Kaolinite.
  - Minéraux caractéristiques : Gibbsite, bauxite, hématite, goethite, quartz.



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.1. Nachtigal (Cameroun)

1. Barrage : 1.2km
2. Canal usinier de 3km de long
3. Centrale hydroélectrique construite dans une excavation de 45m de profondeur (Gneiss)



Source : NHPC

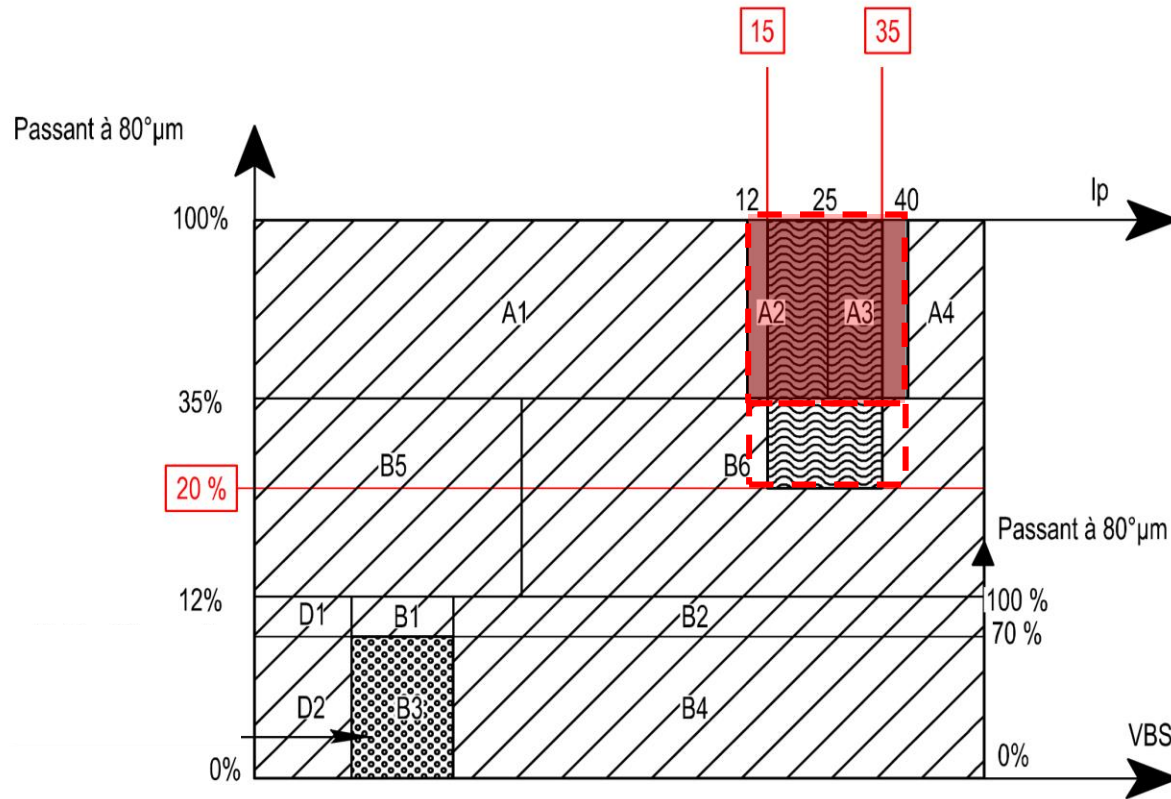
## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.1. Nachtigal (Cameroun)

Classification GTR de la latérite utilisée pour le corps des batardeaux

2

3



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.1. Nachtigal (Cameroun)

Distinction entre latérites graveleuses et fines par des sondages à la pelle

Cartographie des épaisseurs (Isopaches)

Définition des volumes nécessaires et d'éventuels apports extérieurs requis

LATERITE FINE

% fines > 35% et

% graviers (> 2mm) < 10%

IP : [15-35]

GTR type A2-A3

Propriétés imperméables :

Utilisation dans les (pré-)batardeaux



LATERITE GRAVELEUSE

% fines < 35% et

% graviers (> 2mm) > 10%

Utilisation en travaux routiers

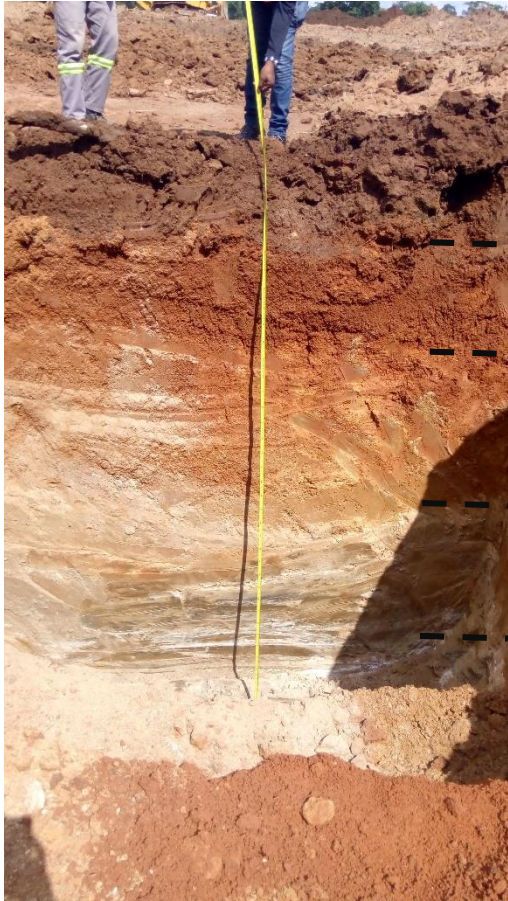
Résistance à l'érosion durant la saison des pluies

Tout type de trafic



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.1. Nachtigal (Cameroun)



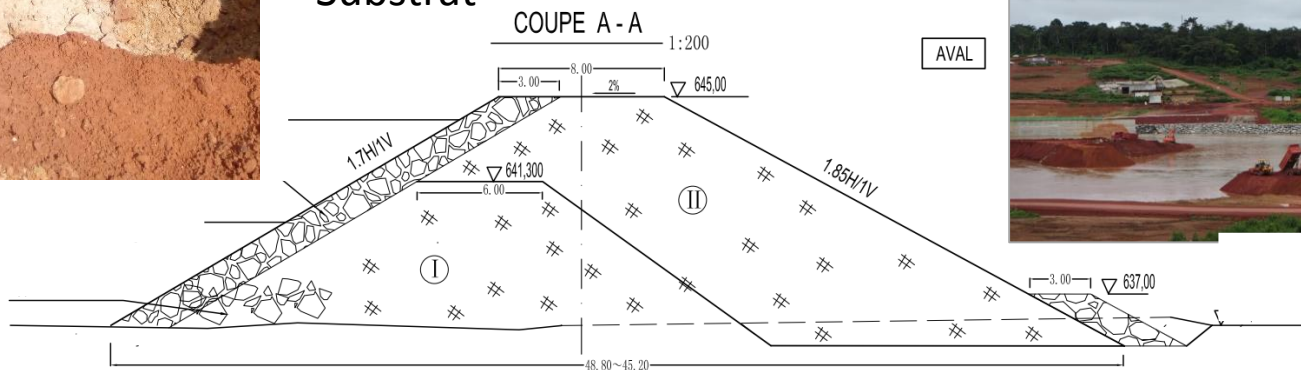
Terre Vég

Lat G

Lat A

Gore

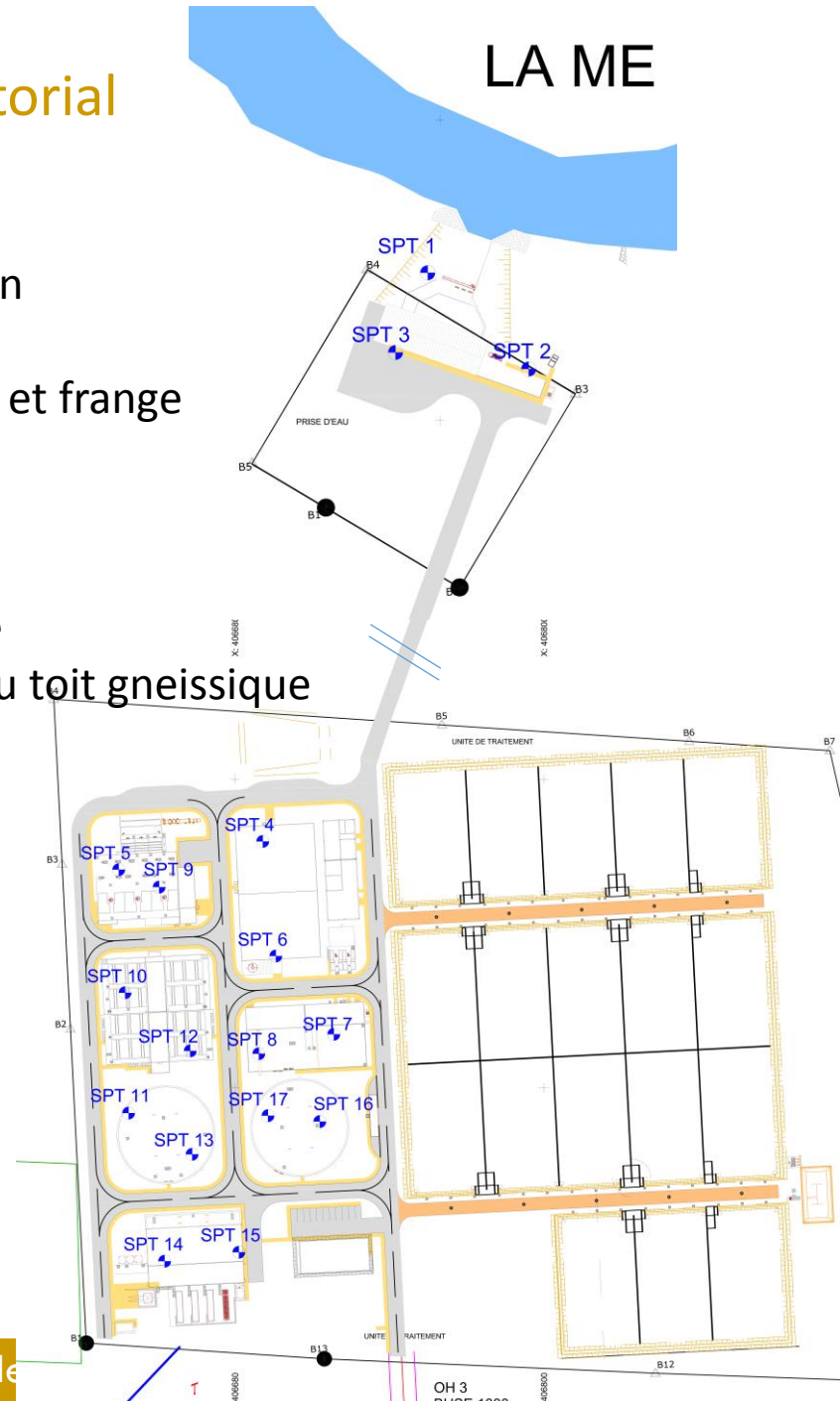
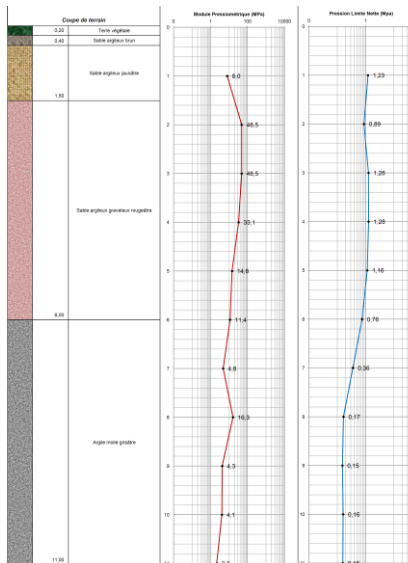
Substrat



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.2. La Mé (Côte d'Ivoire)

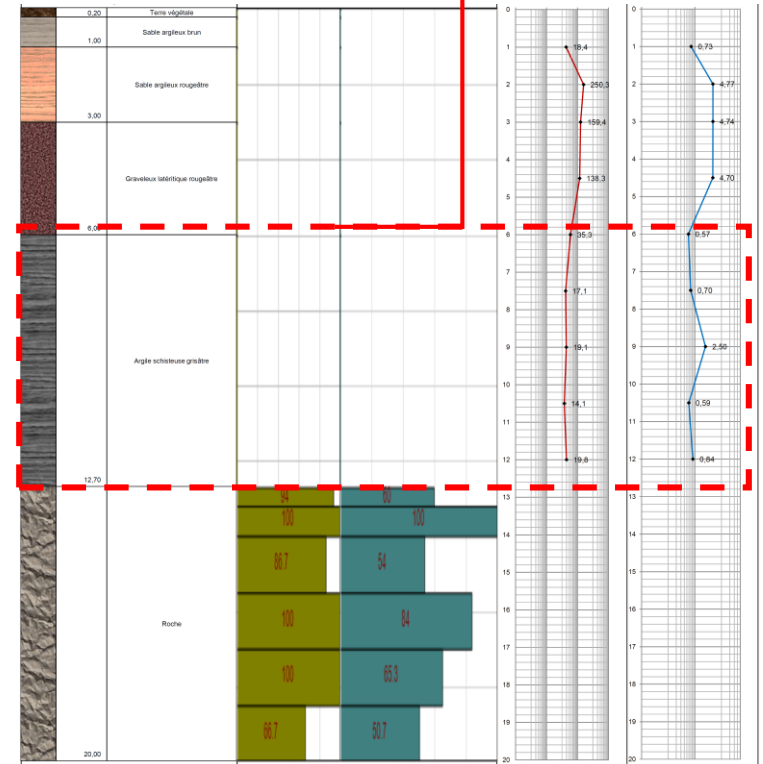
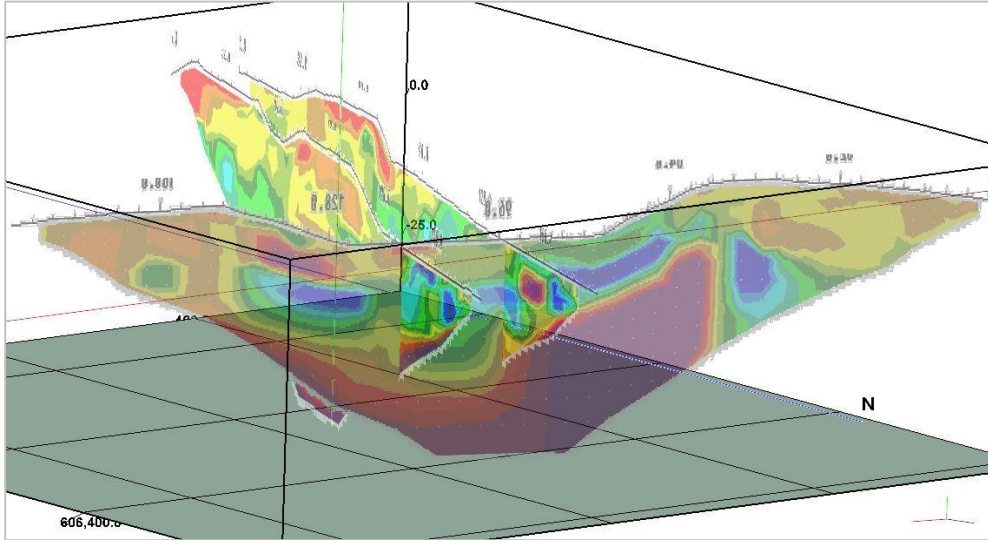
- Station d'épuration d'eau pour la ville d'Abidjan
- Cas de la prise d'eau
- Contexte géologique : Bedrock de type Gneiss et frange d'altération inconnue
- Cartographie géologique lacunaire
- Géomorphologie du site : Plateau
- Projet initial (Tender) : Palplanche dans l'argile
- Projet final (Exécution) : Pieux sécants jusqu'au toit gneissique



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.2. La Mé (Côte d'Ivoire)

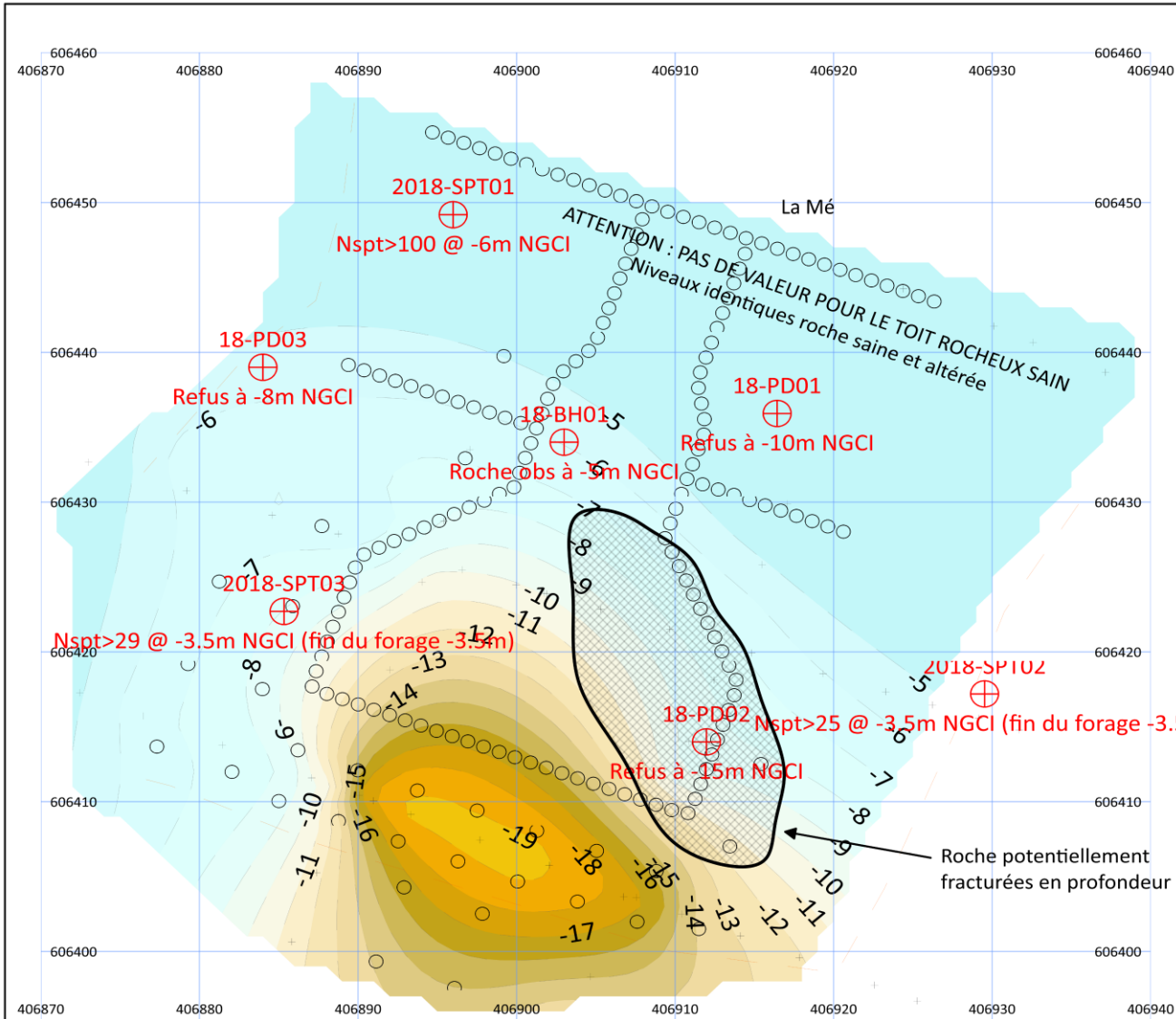
- Frange d'altération d'épaisseur variable. ←
- Propriétés conductrices de la frange altérée /résistives de la roche (gneiss)  
==> tomographies électriques pour cartographier l'épaisseur.
- Calibration avec les forages.





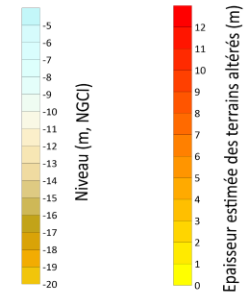
# 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

## 2.2. La Mé (Côte d'Ivoire)



### Légende

- ⊕ Sondages (Jan/Sept 2018)
- Pieux des angles
- - - Excavation prise d'eau
- Limite déblais (PF +6.5m NGCI)



### Prise d'eau de la Mé Niveau du toit rocheux sain

Date :	23/05/2019
Généré par :	LDE
Revu par :	-
Page :	2/3

Besix Engineering Department  
Gemeenschappenlaan 100  
1200 Brussels (BE)



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.3. Bioko (Guinée Equatoriale)



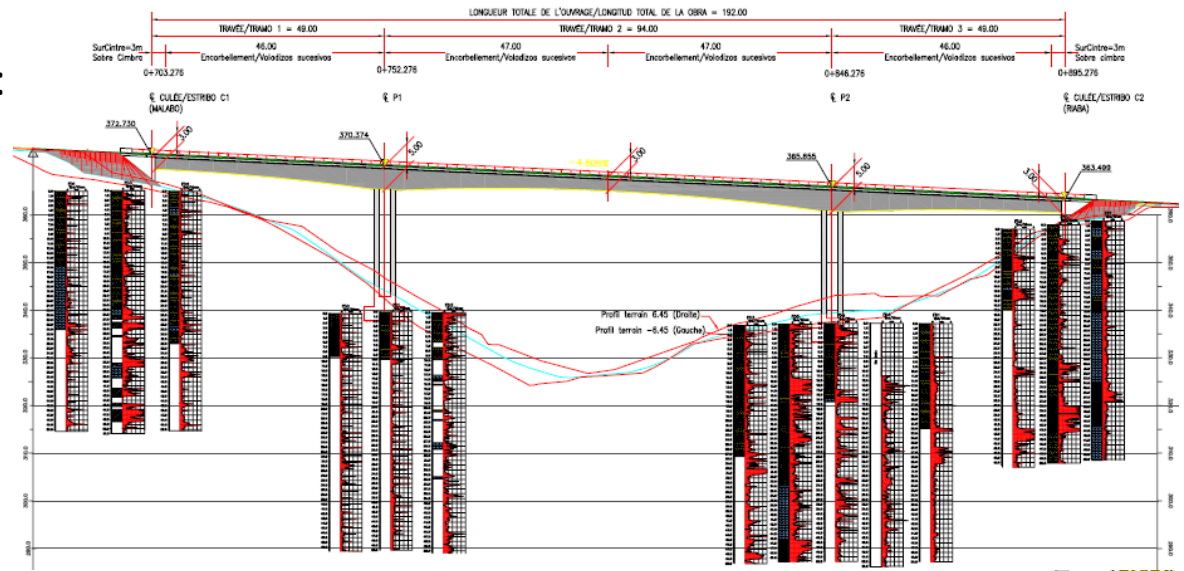
- Environnement volcanique :
  - Exposition très courte dans les temps géologiques ;
  - Relief très marqué de l'île de Bioko (strato-volcan) ;
  - Alternance de dépôts pyroclastiques et coulées de lave
    - Altération en sandwich (couches les plus perméables) ;
    - couches d'écoulements préférentiels.



## 2. Altération Climat Tropical et Equatorial

### 2.3. Bioko (Guinée Equatoriale)

- Investigations :
  - Sondages destructifs avec enregistrements de paramètres.
  - Sondages pressiométriques.
  - Sondages carottés et Essais de laboratoire.
- Pertes importantes des fluides d'injection
- Dispositions constructives :
  - Micropieux.



# Conclusions

Eviter les surprises!

Les phénomènes d'altération sont souvent suspectés, mais souvent mal caractérisés à l'échelle du site.

Difficulté principalement lié à la géométrie des terrains altérés.

## Avant exécution :

- Une bonne analyse du contexte géologique et géomorphologique ;
- Une campagne de sol fiable et complète
  - Suivi systématique ;
  - Contrôle qualité ;

En cours d'exécution, un contrôle qualité adapté et un suivi

Pas de disposition constructive type. Les solutions sont la plupart du temps sur mesure, en fonction des capacités locales.



Merci de votre attention !

