



Projet SOLCYP+



AAP Marine Renewable Energy 2017

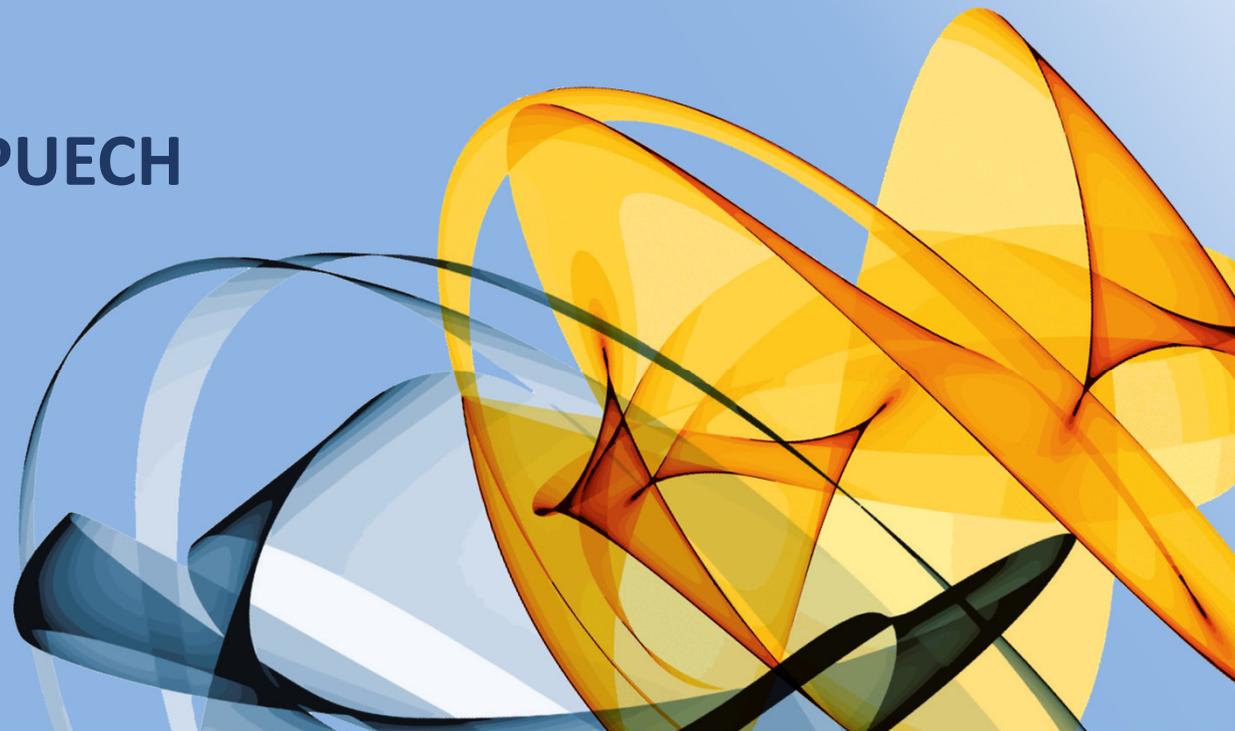
Détermination des paramètres pour essais CNS d'interface roche-coulis

Alain PUECH



06 Décembre 2018

Fondations d'Eoliennes Offshore

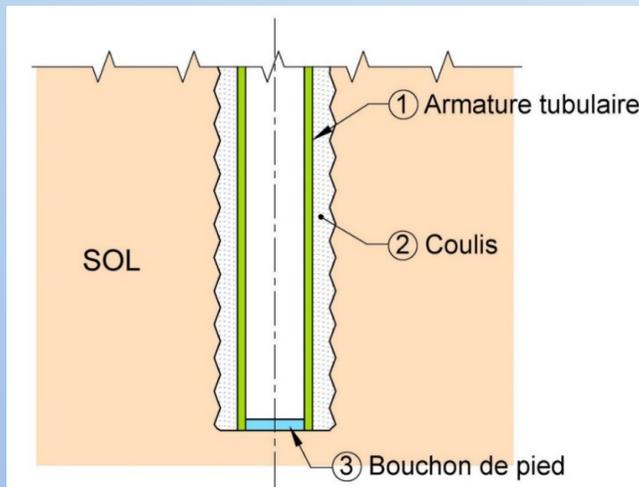


Pieux forés dans les roches

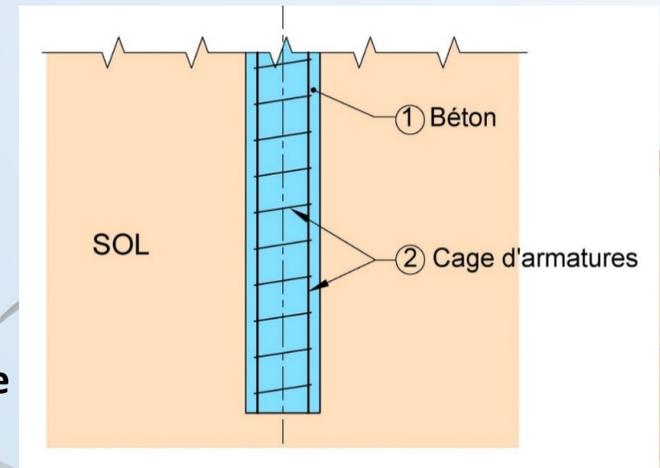
Des roches tendres à dures sont rencontrées sur les sites des futures éoliennes au large des côtes françaises:

- Divers types: craies, marnes, calcarénites, grès, métamorphiques, ...
- Altération et fracturation variables

Dans les roches moyennement tendres à dures ($10 < RC < 100\text{MPa}$)
on aura recours à des pieux forés



Technique offshore



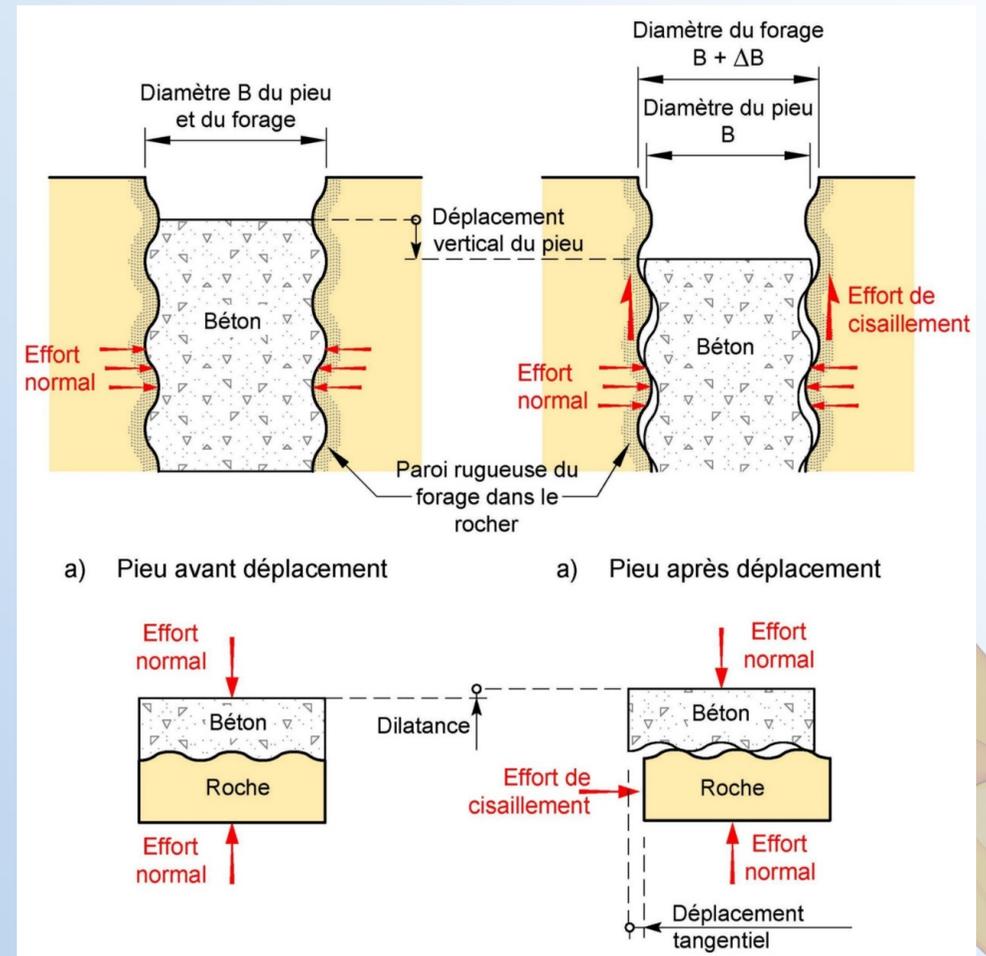
Technique terrestre

Analogie

- L'interface béton (coulis)-roche est irrégulière
- Sous l'effet d'un déplacement axial du pieu, il se produit une **dilatation** au niveau de l'interface
- L'accroissement d'effort normal résultant est contrôlé par la **rigidité radiale du massif** de roche
- Ce phénomène peut être simulé par un essai de cisaillement simple dans lequel la **rigidité normale** est maintenue constante

Essais dit CNS (Constant Normal Stiffness)

$$\sigma_n - \sigma_0 = k(u - u_0)$$



Paramètres des essais CNS

Trois paramètres essentiels:

- **La contrainte initiale σ_0** : relativement faible car pieux courts; prise égale au poids de la colonne de coulis avant prise (typiquement $\sigma_0 < 100\text{kPa}$)
- **La rigidité normale k** : elle doit être égale à la rigidité radiale imposée par le massif;

$$\Delta\sigma_n = \frac{E_m}{(1 + \nu_m)} \frac{\Delta r}{r}$$

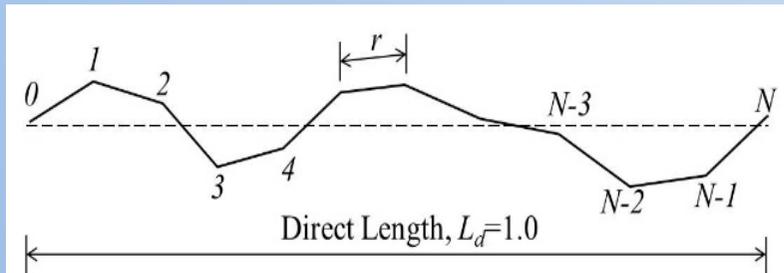
Expansion de cavité

Raideur: $k = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta r} = \frac{E_m}{(1 + \nu_m)} \frac{1}{r} = \frac{2G_m}{r}$

G_m : Module de cisaillement du massif de roche

- **La rugosité de l'interface**: elle doit être simulée par la géométrie des aspérités à façonner sur les éprouvettes

Rugosité

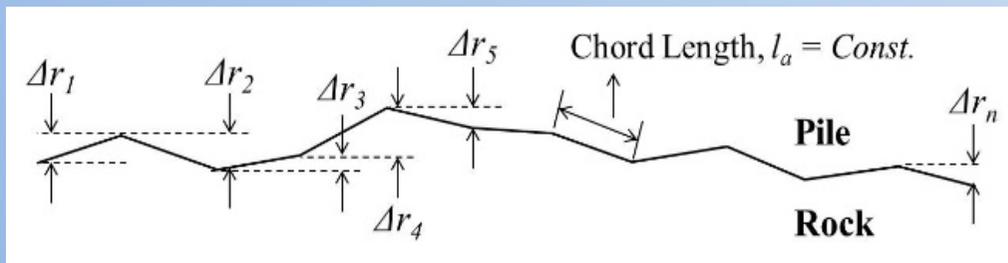


Modèle statistique fractal (Seidel and Haberfield, 1995)

N cordes de longueur constante, r ;

Chaque corde définie par son inclinaison, θ , et sa longueur;

Distribution normale des angles supposée.



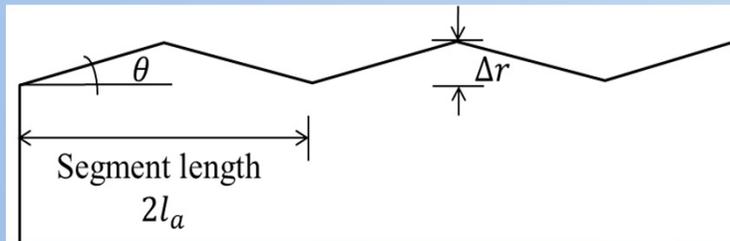
Le modèle de rugosité de Monash University (Seidel and Collingwood, 2001)

pour prédire le comportement des “rock-sockets”

Hauteur des aspérités, Δr , varie selon une distribution Gaussienne.



Rugosité



Seol et al. (2007) travaillant à partir du modèle Monash:
le profil naturel irrégulier d'une paroi de forage peut être simplifié en un profil régulier en dent de scie pour lequel la hauteur de rugosité régulière équivalente dépend de la longueur de la corde



Rugosité

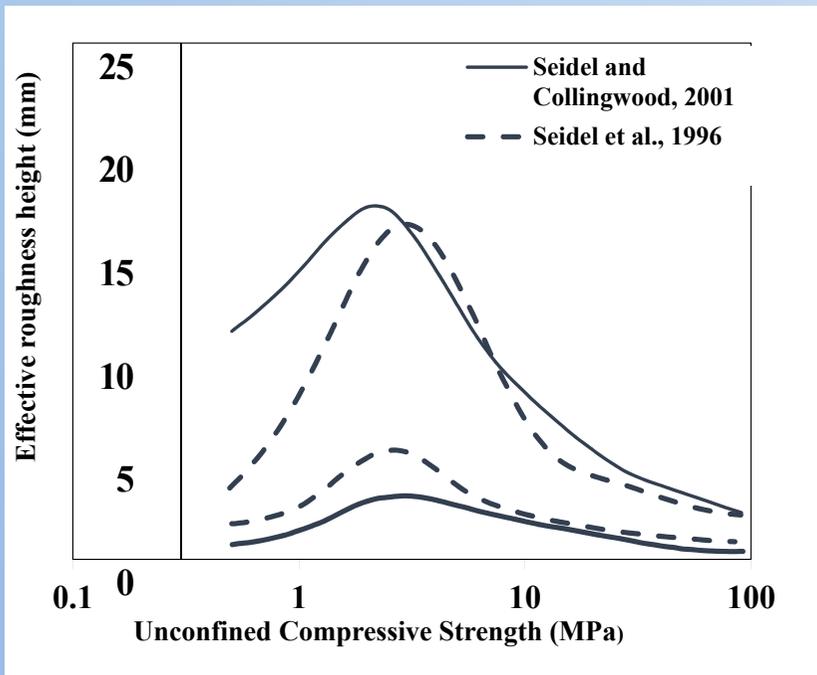
Mesures de rugosité sur des parois de forage:

- ✓ Plusieurs types de roches
- ✓ $5 < RC < 150\text{MPa}$
- ✓ Plusieurs techniques de forage

1mm < Hauteur de rugosité < 16mm
 $1^\circ < \text{Angle de rugosité} < 18^\circ$

Author(s)	Rock type	UCS intact rock (MPa)	Roughness height (mm)	Roughness angle (°)	Remark
Seol et al. (2007)	Gneiss	5-50	1-7	1.1-8.0	Bit
Seidel and Collingwood (2001)	Claystone, sandstone, shale, limestone, etc.	5-10 10-70	1.7-16.2 0.9-6.6	1.9-18.9 1.1-7.6	Back analysis
Lee et al. (2003)	Granite, Gneiss, Sandstone, Andesite	100-150 30-130 75-77 74	1-4	1.1-4.6	RCD/all casing
Nam (2004)	Clayshale	1-4	3.6-5.3 4.7-5.8	4.1-6.1 5.4-6.7	Auger Core barrel
	Limestone	10	3.2-3.7 4.3-5.1	3.7-4.2 4.9-5.8	Auger Core barrel

Rugosité



La rugosité serait maximale dans les roches tendres ($RC < 10\text{MPa}$) puis décroîtrait fortement au-delà



Raideur

$$k = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta r} = \frac{E_m}{(1+\nu_m)} \frac{1}{r} = \frac{4G_m}{D}$$

La raideur radiale **k (kPa/mm)** est :

- directement liée au module de cisaillement du massif G_m
- inversement proportionnelle au diamètre du pieu **D**

En pratique : pour des pieux de grand diamètre ($D > 1\text{m}$)

$$1000 < k \text{ (kPa/mm)} < 10\ 000+$$

mais peut être très élevée pour des pieux de petit diamètre ($k \rightarrow \infty$)

Raideurs de la roche intacte G_{intact} et du massif rocheux G_m

Le module de cisaillement de la roche intacte peut être obtenu:

- Par mesure directe (Compression Simple ou Triaxial) avec ou sans mesure locale des déformations
- De manière indirecte par mesure de la vitesse de propagation des ondes de cisaillement: $G = \rho \cdot V_s^2$

Le massif rocheux est plus ou moins affecté par des discontinuités qui font décroître sa raideur: $G_m < G_{intact}$

Estimer l'impact des discontinuités sur la raideur est un exercice délicat.

Evaluer G_m à partir des indices géologiques: RMR ou GSI

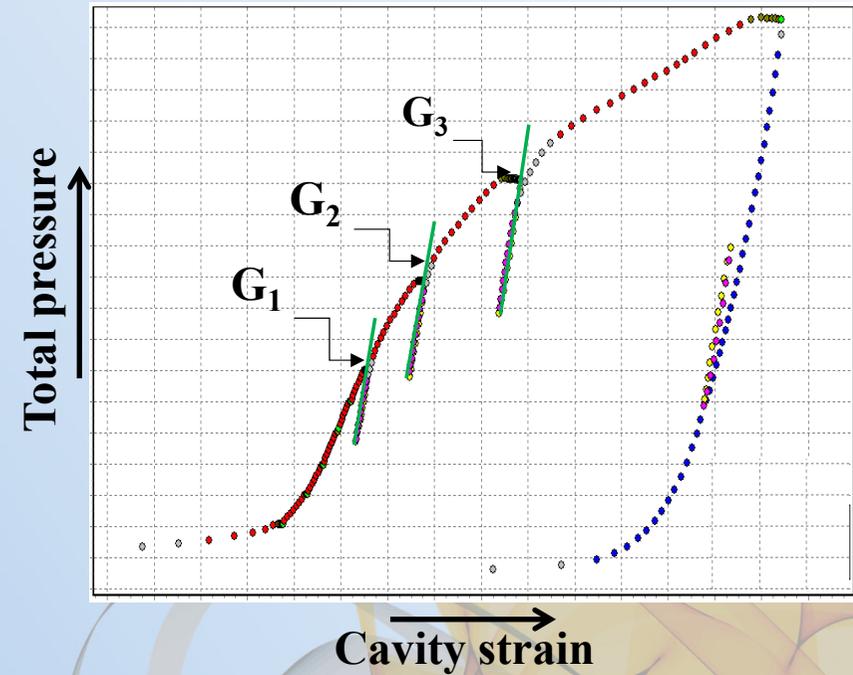
Author (s)	Equation $E_{m=}$	Remark
Serafim and Pereira (1983)	$10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$	[GPa]. Proposed for RMR<50
Gardner (1987)	$\alpha_E E_{intact}$ $\alpha_E = 0.0231RQD - 1.32$	For RQD>60. If RQD<60, $\alpha_E=0.15$
Bieniawski (1989)	$2RMR - 100$	[GPa] Only for RMR>50
Nicholson and Bieniawski (1990)	$E_r \left(\frac{0.0028RMR^2 + 0.9e^{RMR/22.82}}{100} \right)$	For strong rock of Er=50GPa
Mitri HS, Edrissi R, Henning J. (1994)	$E_i G_m < G_{intact} \left(\frac{1 - \cos(\pi RMR/100)}{2} \right)$	For strong rock up to Er=50GPa

Author (s)	Equation $E_{m=}$	Remark
Hoek and Brown (1997)	$\sqrt{\frac{UCS(MPa)}{100}} 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)}$	[GPa]
Diederichs and Kaiser (1999)	$7(\pm 3) \sqrt{10^{\left(\frac{RMR-44}{21}\right)}}$	[GPa] applicable for RMR>44
Sonmez H, et al. (2004)	$E_{intact} (S^a)^{0.4}$ $s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9}\right)}$ $a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} e^{\left(-\frac{GSI}{15}\right)} - e^{\left(-\frac{20}{3}\right)}$	
Zhang and Einstein (2004)	$\alpha_E E_{intact}$ $\alpha_E = 10^{0.0186RQD} - 1.91$	RQD from 0 to 100%
Hoek and Diederichs (2006)	$E_i \left(0.02 + \frac{1-D/2}{1+e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}} \right)$	D=degree of disturbance (from 0 to 1)

Evaluer G_m à partir du dilatomètre: HPDT

- ❑ Essai d'expansion cylindrique
- ❑ Mesures de G à faibles taux de déformation
- ❑ En général trois boucles avec P croissant:

$G_1 < G_2 < G_3$ si discontinuités ouvertes

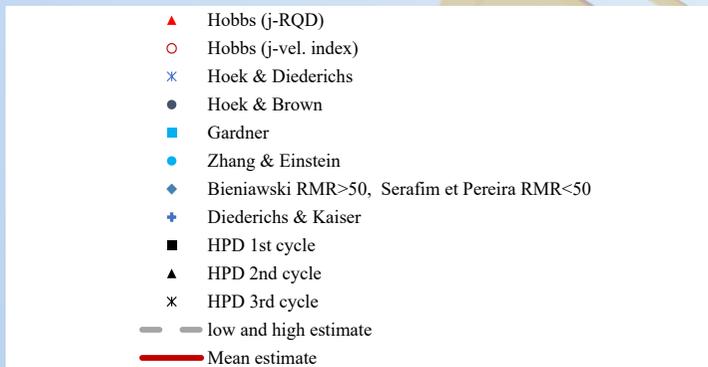
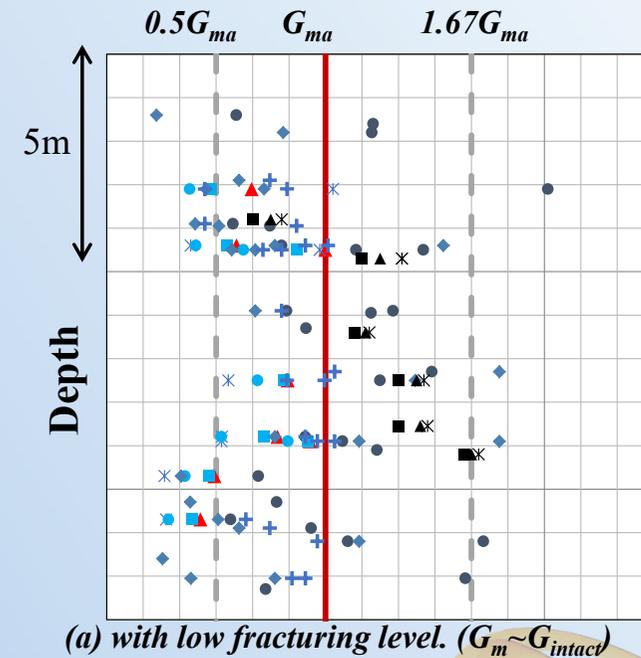


Exemple 1

Grès $50 < RC < 100\text{MPa}$
Faible niveau de fracturation

$G_m \# G_{\text{intact}}$

HPDT en borne supérieure
 Valeurs de G1, G2 et G3 proches

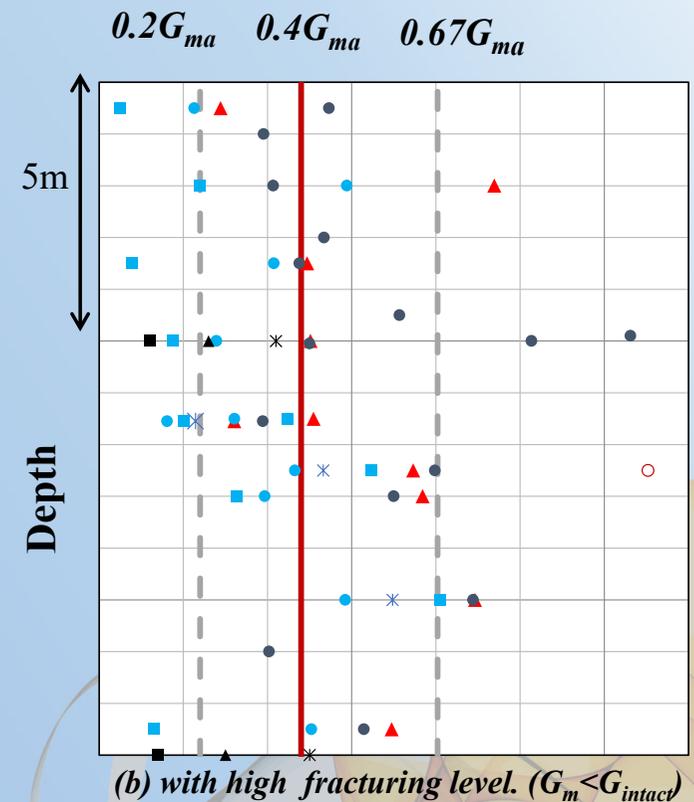


Exemple 2

Grès $50 < RC < 100\text{MPa}$
Niveau de fracturation élevé

$G_m \# 0.4 G_{\text{intact}}$

HPDT en borne inférieure sous
 $G1$ puis $G3 > G2 > G1$ (fermeture
des discontinuités)



Conclusions

- ❑ Le dimensionnement de pieux forés et cimentés dans des massifs rocheux reste un exercice délicat. Des applications sont attendues pour les futures fermes éoliennes au large des côtes françaises.
- ❑ **Des essais de cisaillement d'interface roche-coulis conduits sous rigidité normale constante** sont considérés comme particulièrement indiqués pour l'évaluation de la résistance au cisaillement de l'interface
- ❑ Les paramètres essentiels pour la définition d'essais de cisaillement CNS sont:
 - ✓ **la rugosité de l'interface roche-coulis**, et
 - ✓ **la valeur de la rigidité normale** à appliquer sur les échantillons testés au laboratoireLes méthodologies d'évaluation de ces paramètres sont en cours de développement

Conclusions

- ❑ **Des mesures systématiques de profils de rugosité des parois de forages** réalisées avec différentes techniques de foration et dans divers types de roches sont vivement recommandées pour accroître le domaine d'applicabilité des profils de rugosités équivalentes.
- ❑ Il est souhaitable de **mettre en oeuvre la plus grande gamme possible de techniques** pour procéder à l'évaluation du module de cisaillement G_m du massif de roche. Cette évaluation peut alors être faite de manière satisfaisante moyennant un minimum de jugement géologique et de précautions d'ingénierie.





Projet SOLCYP+



AAP Marine Renewable Energy 2017

Merci de votre attention



06 Décembre 2018

Fondations d'Eoliennes Offshore

