



Journée SIRT du 18 Mars 2021



**Défis posés par le dimensionnement et l'installation
des éoliennes offshore dans les roches tendres
du plateau continental français**

Alain PUECH
FUGRO France

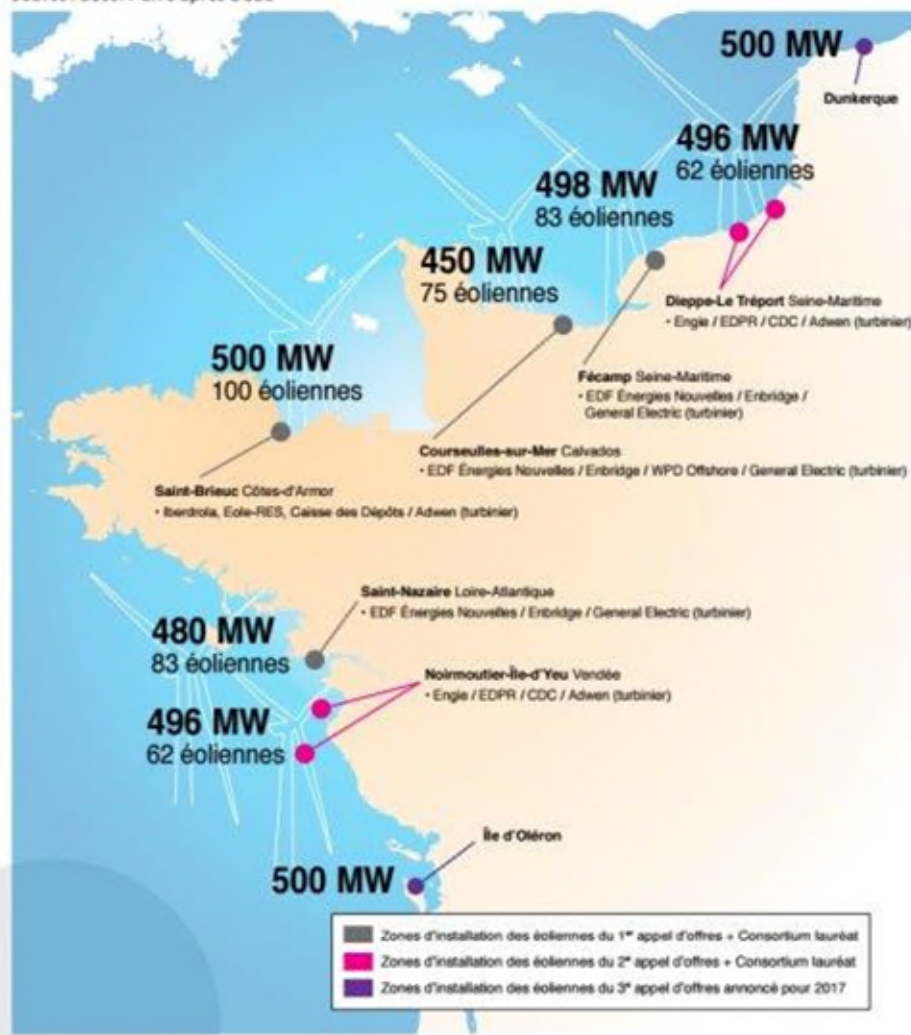
Sommaire

- Eoliennes offshore fixes: sites, concepts, sols et roches
- Installation des pieux et monopieux: battage; forage
- Interaction sol-structure
- Comment appréhender G_{masse} ?
- Capacité latérale des monopieux
- Dimensionnement des « socket piles » des sous-stations
- Capacité axiale dans la craie
- Aspects réglementaires

Eoliennes offshore fixes: sites

Cartographie des zones de développement de l'éolien offshore posé en France

Source : Observ'ER d'après DGE

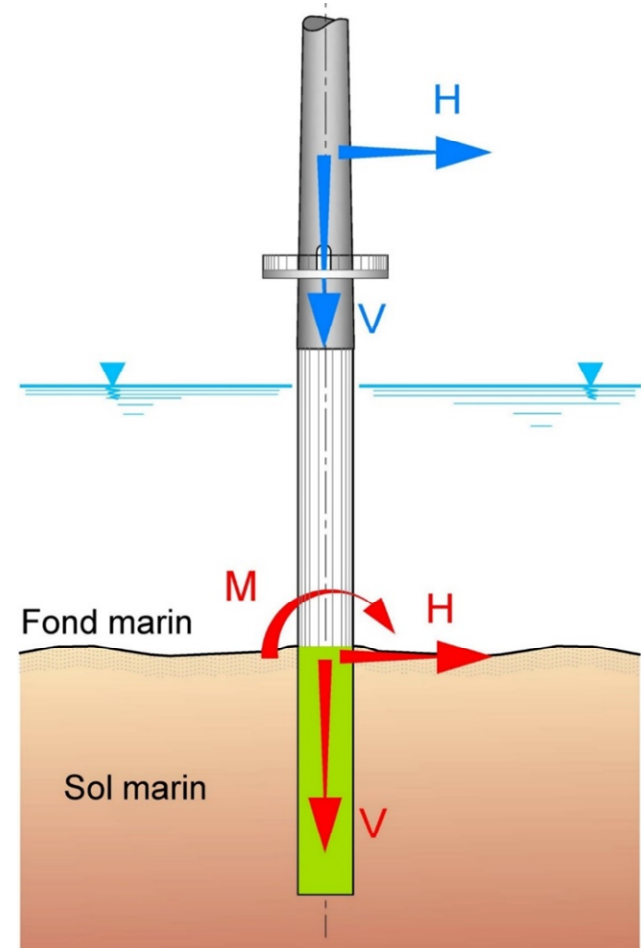


Eoliennes offshore fixes: concepts

► Monopieux:

St Nazaire (80x6MW)

Courseulles (64x7MW)



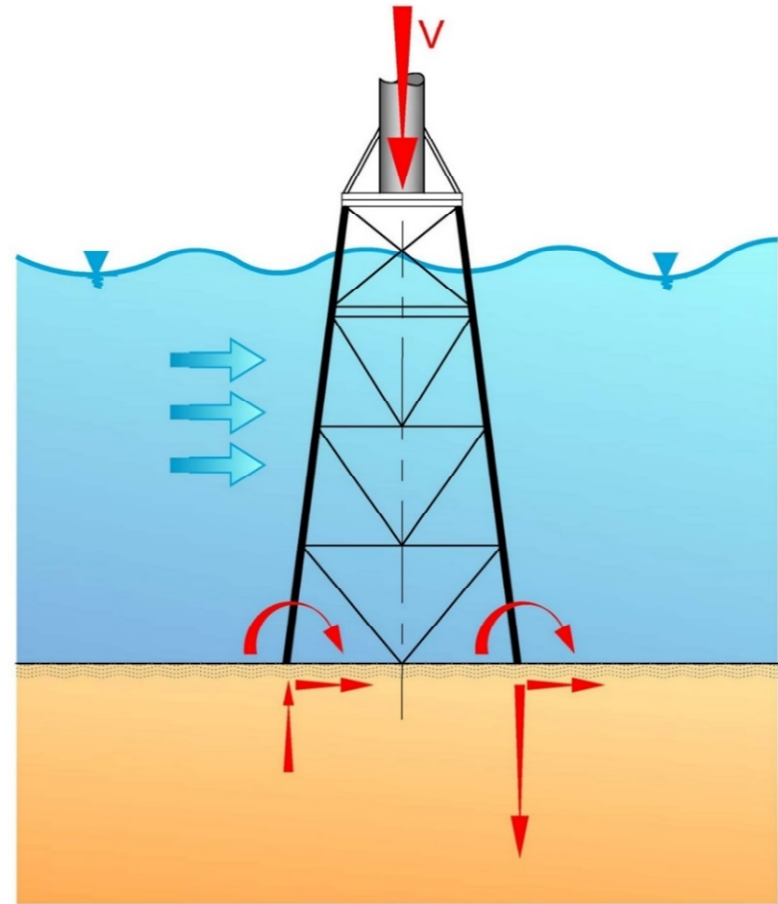
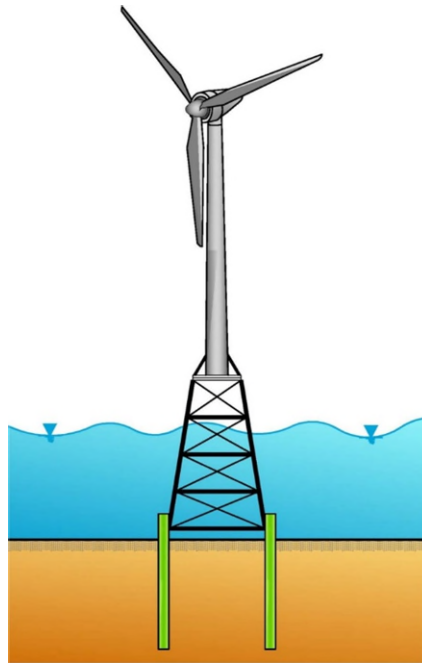
Eoliennes offshore fixes: concepts

► Jackets sur pieux:

St Brieuc (62x8MW);

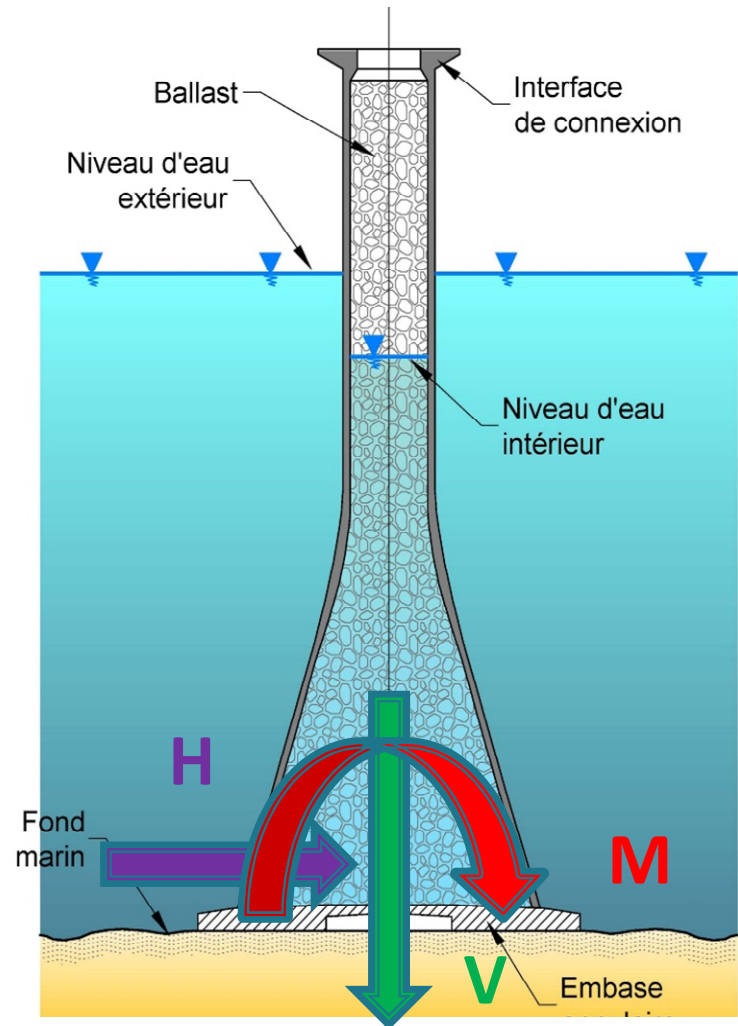
Le Tréport (62x 8MW)

Yeu-Noirmoutiers (62x8MW)



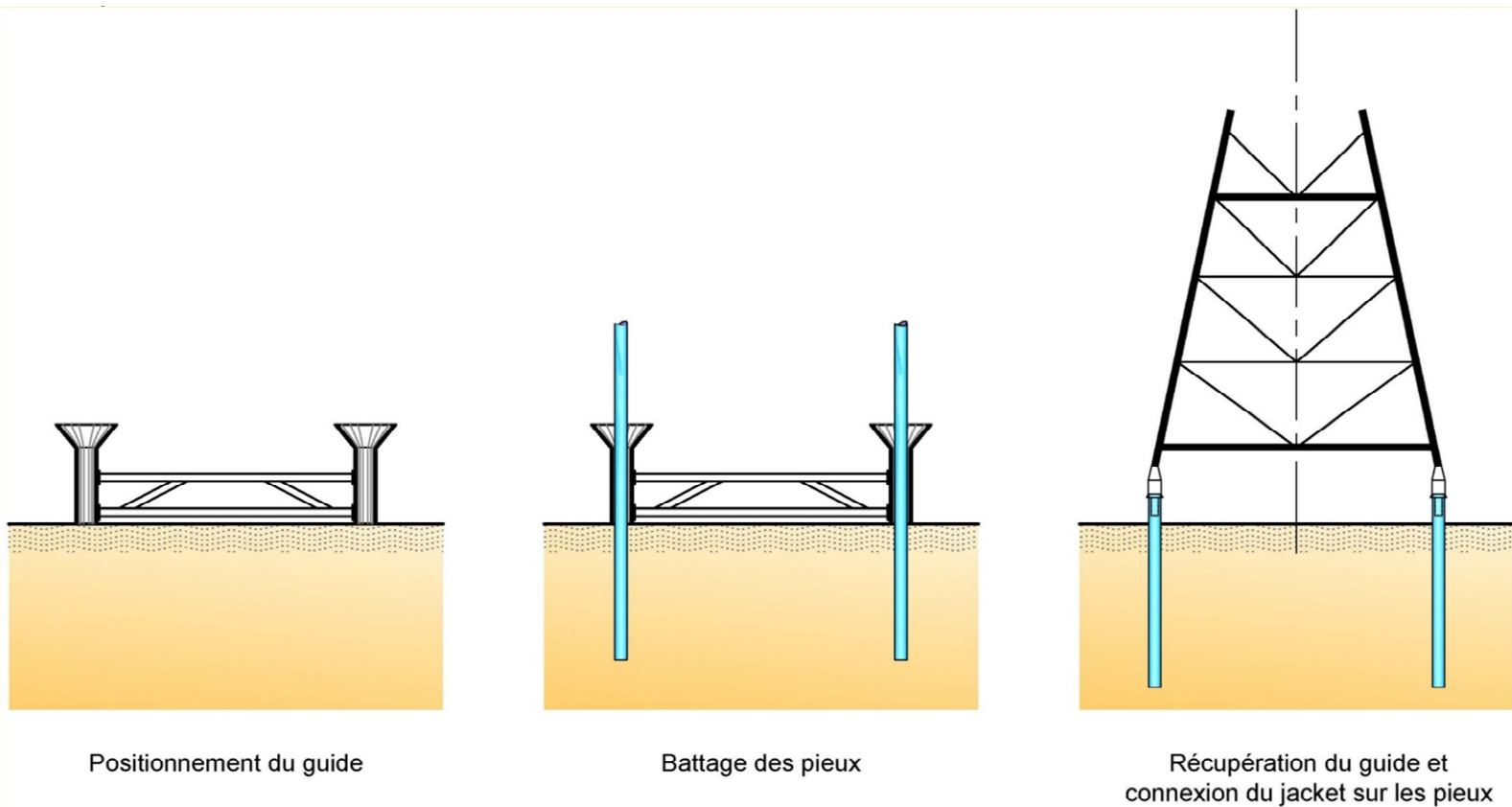
Eoliennes offshore fixes: concepts

- Embases gravitaires:
Fécamp (71x7MW)



Eoliennes offshore fixes: concepts

► Supports des sous-stations (OSS):



Les sols et roches rencontrés

Sur les sites du plateau continental de métropole, on rencontre:

- Sols usuellement rencontrés jusqu'à présent: traités par les codes (DNVGL*):
Sables siliceux, argiles normalement à très fortement consolidées
- Sols déjà rencontrés (e.g. UK) mais difficiles et mal connus:
Craies, de moyenne à forte densité, altérées en surface ($0,5 < R_c < 3\text{MPa}$; jusqu'à 10MPa) avec la difficulté supplémentaire des bancs de silex fréquents !
- Sols non rencontrés jusqu'à présent:
Sables carbonatés +/- cimentés ($R_c < 5\text{MPa}$)
Calcarénites/grès dolomitiques ($5\text{MPa} < R_c < 20\text{MPa}$; jusqu'à 50MPa)
Marnes ($R_c < 1\text{MPa}$)
Roches moyennement dures à dures e.g. Pelites-Psammites ($10 < R_c < 100\text{MPa}$)

Fracturation variable.

Expérience offshore très limitée. Non traités dans les codes.

Recours aux pieux forés (expérience terrestre importante)

* DNVGL: Det Norske Veritas / Germanischer Lloyd



Installation des pieux et monopieux

► Battage toujours privilégié (coût)

Pieux: diamètres de 2 à 3m; longueur 50m+

Monopieux: diamètres > 7m; longueur 20 à 30m

Réputé faisable dans roches tendres ($R_c < 5\text{MPa}$) mais:

- ❑ Prédications de battage difficiles (méthodes peu éprouvées); incertitudes sur valeurs de l'amortissement (hystérétique et radial?)
- ❑ Résistances élevées: fortes énergies (jusqu'à 4000kJ); nombre de coups élevé; fatigue des aciers; risque d'endommagement du tube et de déformation progressive (« extrusion buckling »)

Installation par battage



Pieu

IHC S 4000

Energie: 4000kJ

Masse frappante: 200T

Poids: 430T; longueur 20m

Monopieu



Installation des pieux et monopieux

► Forage délicat

Pieux: diamètres de 2 à 3m; «socket piles » : 15 à 25m

Monopieux: diamètres > 7m; longueur 20 à 30m

Matériel lourd; opérations lentes et coûteuses



Gwynt y Môr – 160 WT

Drill bit: 4.3m expandable to 6m



Installation par forage

Foreuses non disponibles: développement de VBM (Vertical Boring Machines) XXL en cours pour Saint Nazaire et Courseulles.



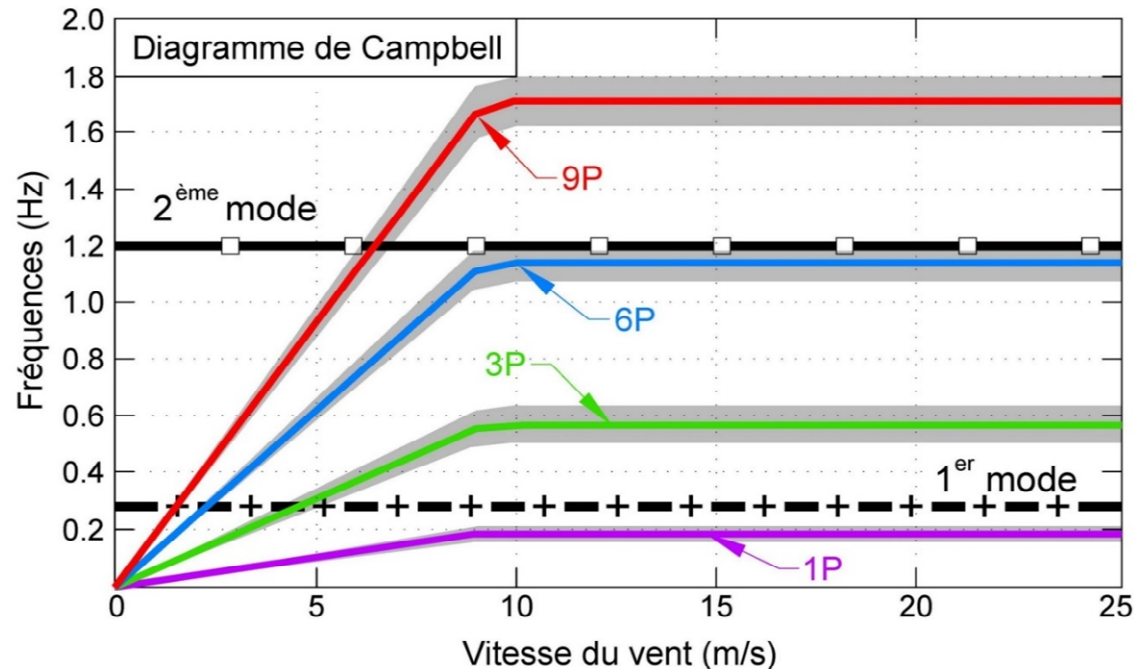
Photos Fugro



Interaction sol-structure

- Une particularité des monopieux est que l'ISS joue un rôle prépondérant.
- Les fréquences propres des structures de type monopieu sont proches des fréquences des sources d'excitation : houle, vent, rotor (1P), pales 3P).
- L'analyse des fréquences propres est déterminante pour la sélection du diamètre.
- La raideur latérale et/ou de rotation de la fondation joue un rôle important dans la raideur globale du système.
- Il est essentiel de déterminer les raideurs de fondation avec précision ainsi que leur évolution dans le temps (nombre de cycles)

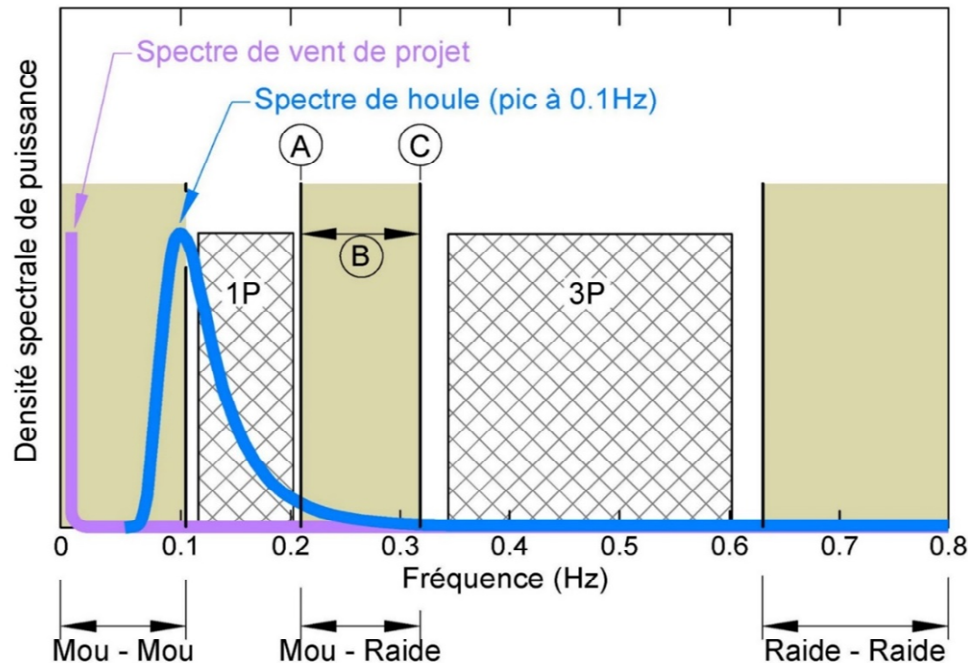
Interaction sol-structure



Fuseaux de fréquences à éviter et fréquences des deux premiers modes de la structure:

- en régime permanent le premier mode échappe aux fuseaux 1P et 3P, mais le fuseau 6P excite le second mode;
- en phase transitoire, le premier mode traverse les fuseaux 1P, 3P, 6P; situation gérée par le contrôleur de la turbine.

Interaction sol-structure



Phase permanente – Choix du type de structure pour éviter les plages de fréquences nocives

➤ Choix de structure plus raide ou plus souple en anticipant l'évolution du sol

- (A) Meilleur dimensionnement possible en cas de risque d'écrouissage du sol (accroissement de raideur)
- (B) Meilleur dimensionnement possible en cas d'incertitude sur le comportement du sol à long terme
- (C) Meilleur dimensionnement possible en cas de risque de ramollissement du sol (perte de raideur)

Comment appréhender G_{masse} ?

- ▶ Les raideurs sont directement dépendantes du module de cisaillement du sol en place G_{masse}
 - ▶ G_{masse} peut être obtenu à partir du module de la roche intacte mesuré sur carottes en laboratoire G_{intact} corrigé d'un facteur de masse j estimé en fonction:
 - du RQD
 - des vitesses de propagation d'ondes en labo et in situ
 - des indices géologiques RMR ou GSI prenant en compte la nature et l'état des discontinuités du massif de roche.
- Difficulté d'estimer RMR ou GSI sur la seule base de sondages*

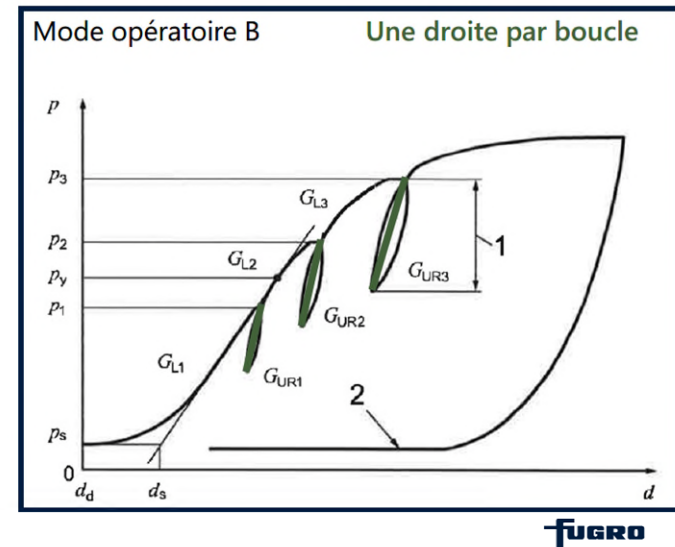
Comment appréhender G_{masse} ?

► G_{masse} peut être obtenu par mesure directe in situ

- ❑ Dilatomètre flexible (e.g.DPM 95)
- ❑ HPDT (Cambridge In Situ): utilisé sur plusieurs sites
- ❑ Monochambre FC : validée dans le cadre du projet ARSCOP.

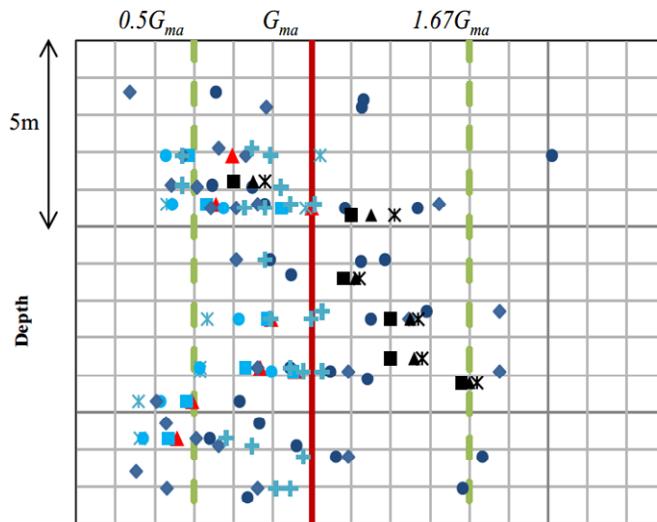
Thèse d'Alexandre LOPES soutenue en 2020

- Protocole d'essai
- Procédure d'interprétation

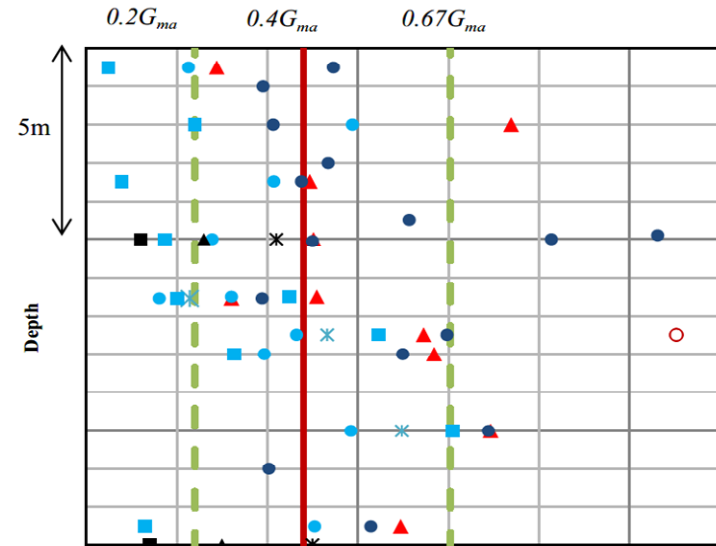


Comment appréhender G_{masse} ?

- Combiner les différentes approches: LE, BE, HE



(a) with low fracturing level. ($G_m \sim G_{intact}$)

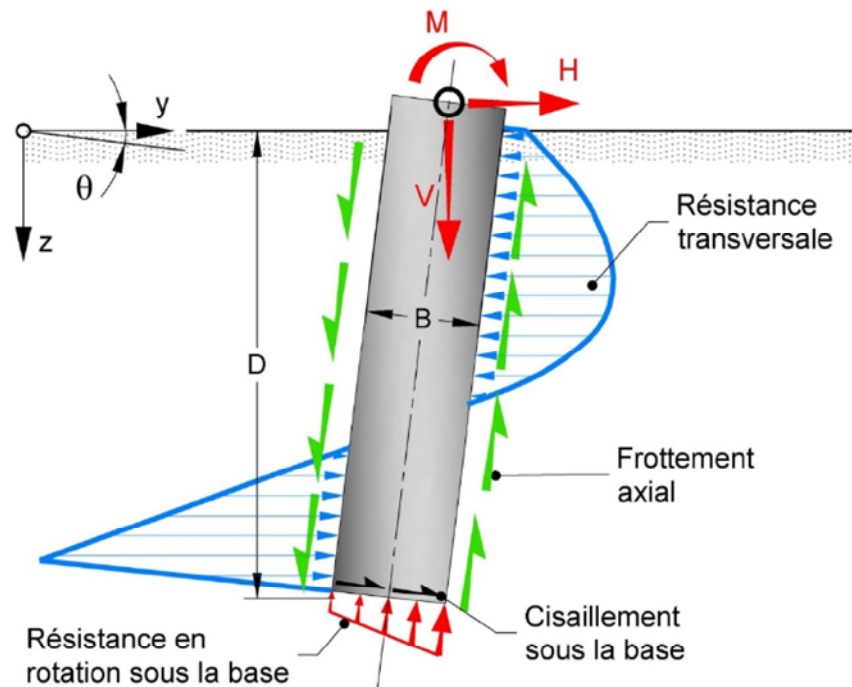


(b) with high fracturing level. ($G_m < G_{intact}$)

- ▲ Hobbs (j-RQD)
- Hobbs (j-vel. index)
- ✱ Hoek & Diederichs
- Hoek & Brown
- Gardner
- Zhang & Einstein
- ◆ Bieniawski RMR>50, Serafim et Pereira RMR<50
- ✱ Diederichs & Kaiser
- HPD 1st cycle
- ▲ HPD 2nd cycle
- ✱ HPD 3rd cycle
- low and high estimate
- Mean estimate

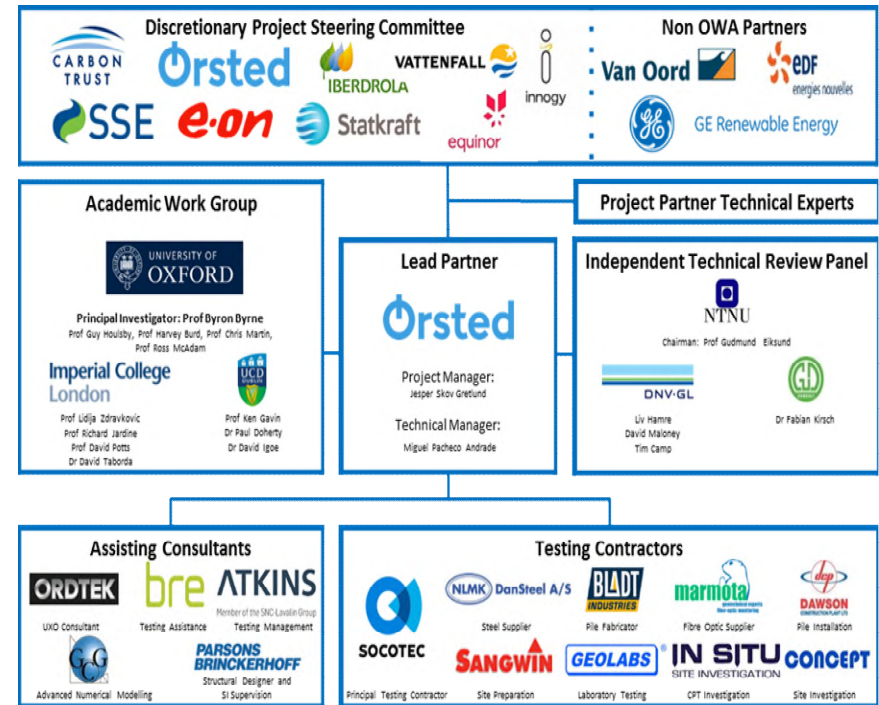
Capacité transversale des monopieux

- Le calcul de la capacité transversale des monopieux ne peut être mené à partir d'une simple analyse par courbes de transfert p-y standards. Le comportement des monopieux est plus complexe.



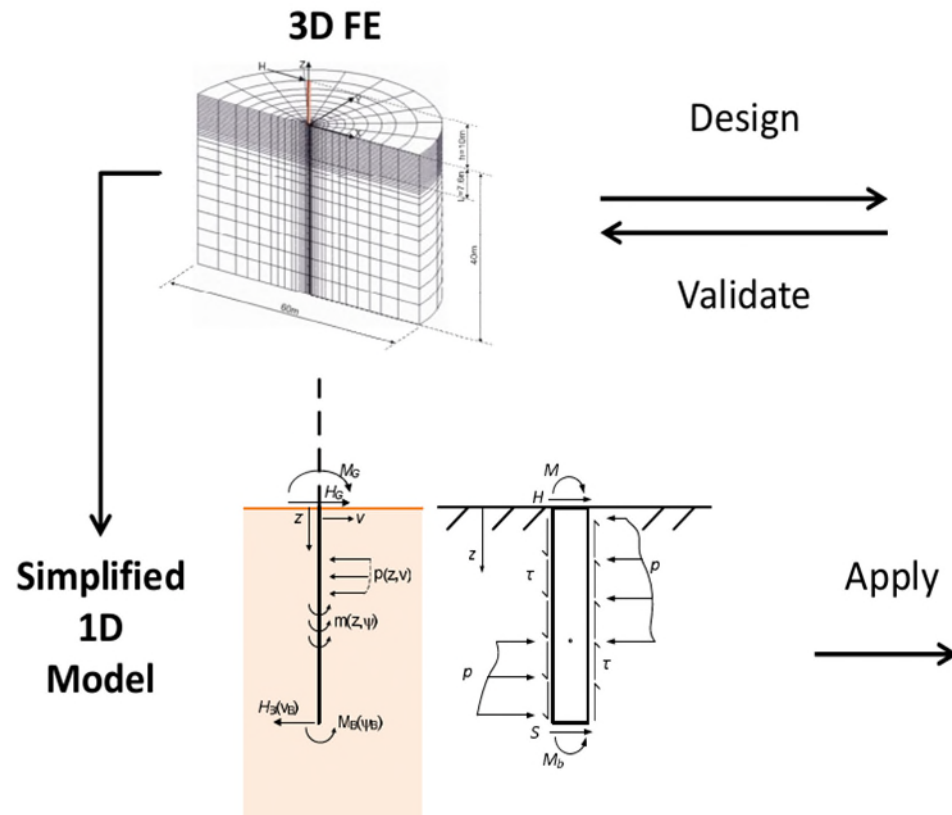
Capacité transversale des monopieux

- Le projet PISA (2013-2016) a permis de mettre au point une méthodologie adaptée dans les sols usuels: sables et argiles
- Essais sur différents diamètres jusqu'à $D=2\text{m}$ à:
Cowden – UK (argile raide)
Dunkerque – F (sable dense)



Capacité transversale des monopieux

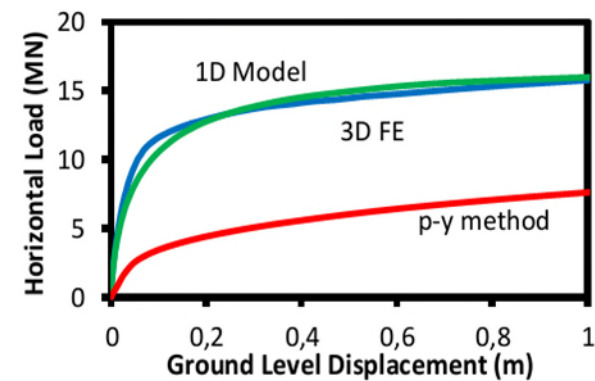
Méthodologie PISA



Field Tests



Accurate Response Prediction



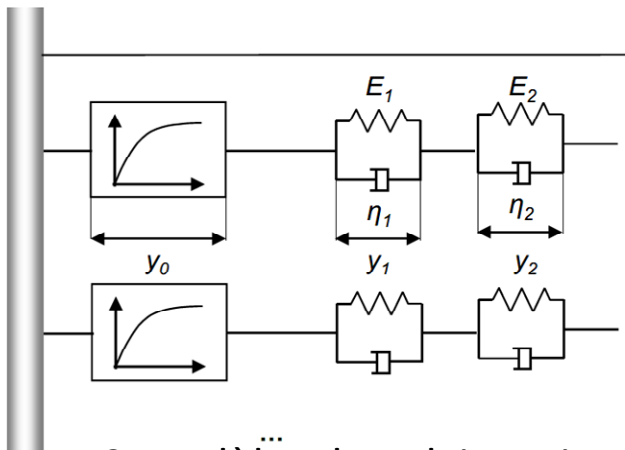
Capacité transversale des monopieux dans les roches tendres

- Adapter la méthodologie PISA
- Essais sur site de Gouvieux (EDF-EN)
 - Inspirés du programme de recherche PISA
 - Essais de chargements horizontaux monotones et cycliques fortement instrumentés
 - Jusqu'à 3000 cycles réalisés à une amplitude donnée
 - 4 essais cycliques de $2 * 12h$

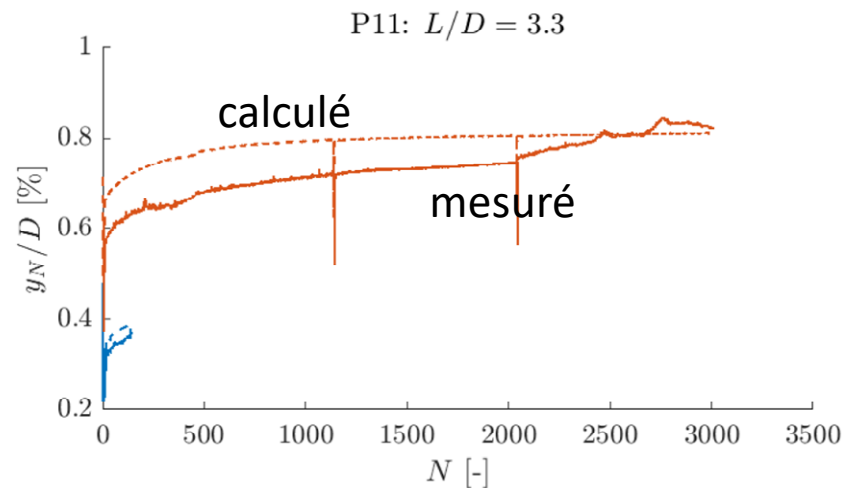


Capacité transversale des monopieux dans les roches tendres

- Résultats confidentiels
- Interprétation dans le cadre de SOLCYP+
- Thèse d' Anaïs LOVERA (2019). Non publique



2 Modèles de Kelvin-Voigt en série avec une courbe P-y hyperbolique

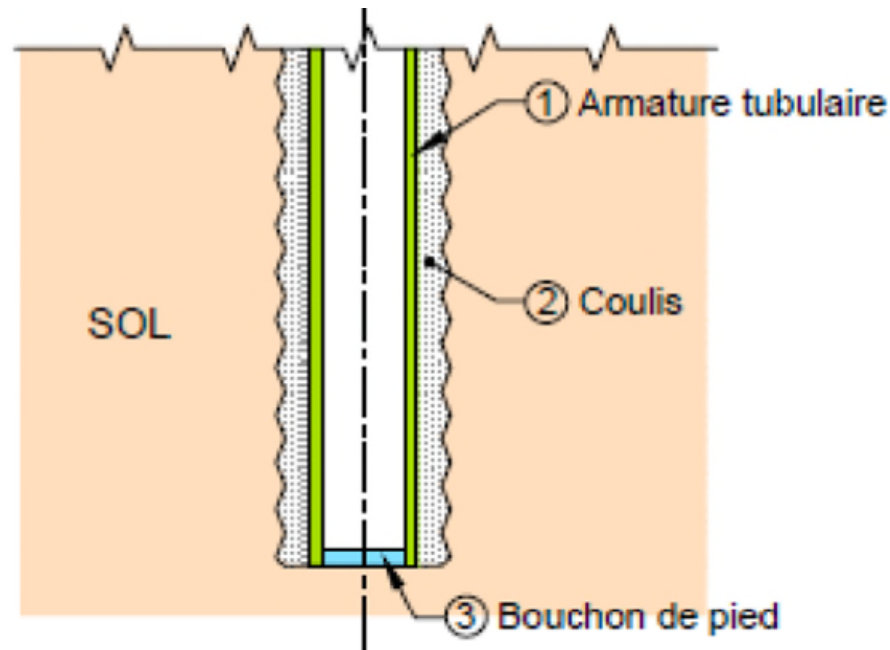


Déplacement cumulé normalisé y_N/D en fonction du nombre de cycles (à paraître ISFOG 2020)

« Socket piles » des sous-stations

Les OSS sont fondées sur des jackets ancrés au rocher par pieux de grands diamètres ($2 < D_{\text{ext}} < 3\text{m}$) mais courts ($L/D < 10$)

Pieux forés et cimentés



« Socket piles » des sous-stations

La capacité axiale est contrôlée par les interfaces acier-coulis et coulis-roche

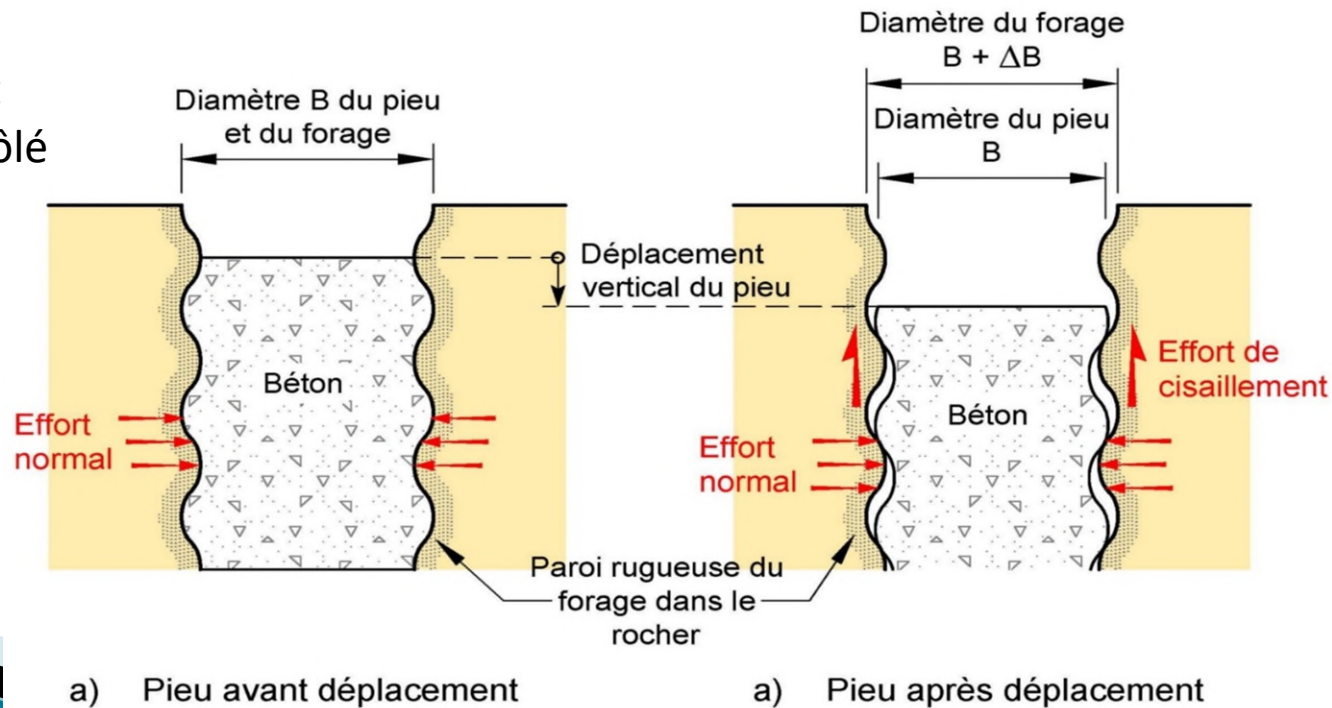
Acier-coulis: mise en place de « shear keys » pour bloquer le cisaillement sur l'interface.

Coulis-roche:

- o L'interface coulis-roche est irrégulière

- o Sous l'effet d'un déplacement axial du pieu, il se produit une **dilatation** au niveau de l'interface

- o L'accroissement d'effort normal résultant est contrôlé par la **rigidité radiale du massif** de roche



« Socket piles » des sous-stations

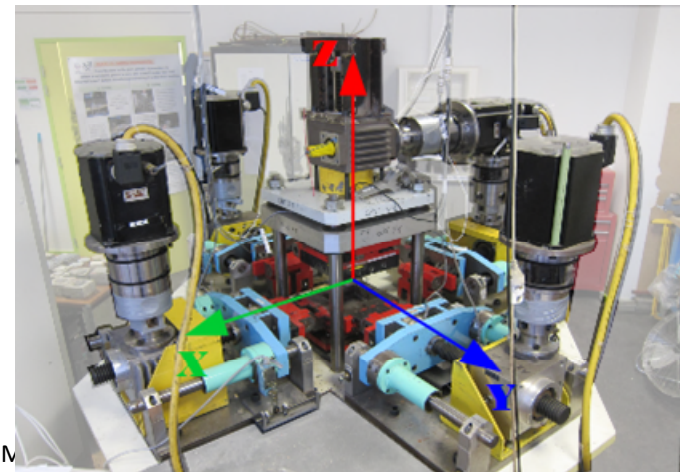
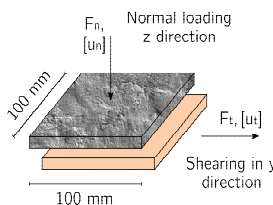
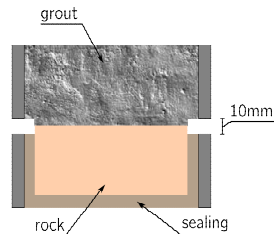
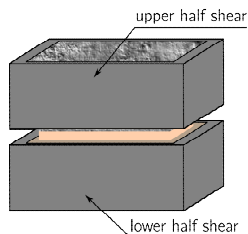
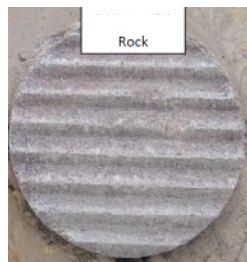
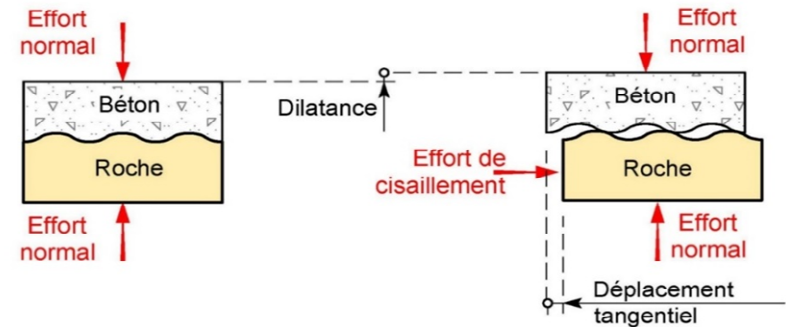
- o Ce phénomène peut être simulé par un essai de cisaillement simple dans lequel la **rigidité normale** est maintenue constante

Essai CNS (Constant Normal Stiffness)

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

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

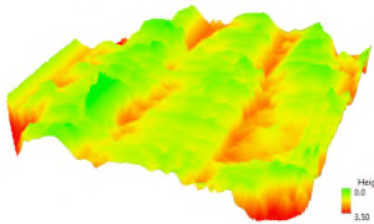
G_{mass} : Module de cisaillement du massif de roche



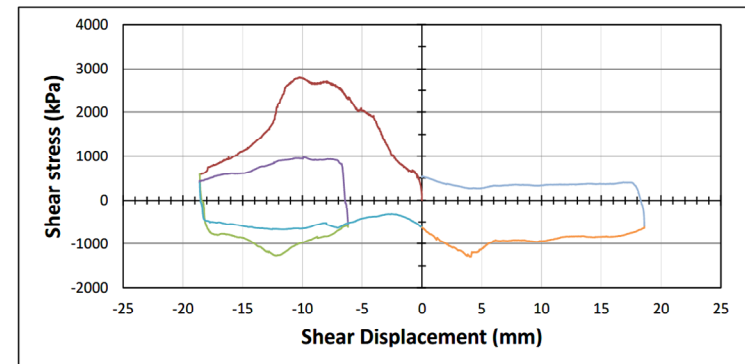
« Socket piles » des sous-stations

Dans le cadre du projet SOLCYP+ (2016-2020):

- Définition de protocoles d'essais: estimation de k ; rugosité représentative; contrainte initiale
- Réalisation de séries d'essais sur différents types de roches (calcarénites, craies, grés)



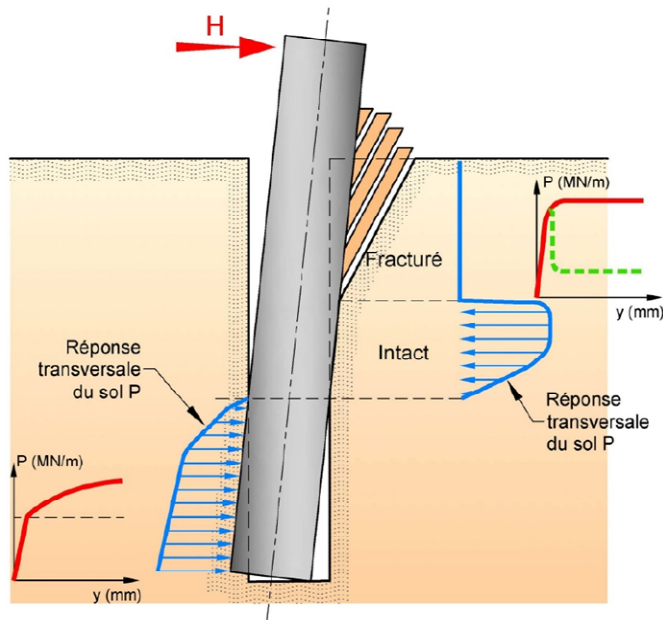
- En parallèle essais industriels pour projets éoliens offshore



« Socket piles » des sous-stations

➤ Intégrité de la roche près de la surface

Effet sur : résistance latérale et capacité axiale



Modèle de découpage en feuillets (« chipping »)
Modèle CHIPPER; Erbrich, 2004

- ✓ Modification des courbes de transfert p-y
- ✓ Neutralisation de la résistance d'interface sur la hauteur incriminée

Erbrich, C. (2004) *A new method for the design of laterally loaded anchor piles in soft rock*. Offshore Technology Conference, Houston

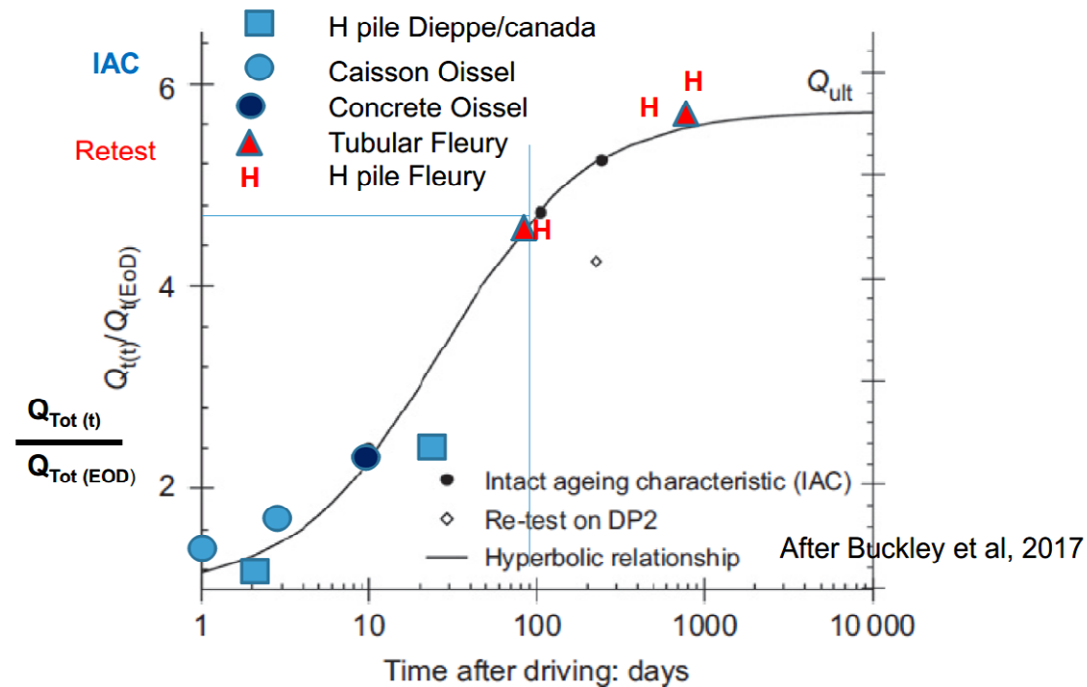
Capacité axiale des pieux dans la craie

- Craies de faible, moyenne et moyennement forte densité
- Battage facile (hors bancs de silex). Frottements limites en fin de battage faibles: typiquement < 20kPa
- **Cicatrisation** (« set-up »): Ampleur? Durée?

Ce paramètre conditionne le dimensionnement

Les données disponibles (UK, F, G) sur suggèrent:

$\wedge \# 5$



Capacité axiale des pieux dans la craie

- ▶ Incertitude incompatible avec le dimensionnement des pieux d'OSS. Court terme (8-10 jours vs long terme)
- ▶ Lancement d'un projet international **ALPACA** (2017-2019). Imperial College/ Oxford University
 - Majorité des acteurs de l'éolien offshore
 - 37 pieux / 3 échelles
 - Essais in situ/ en labo
 - Axial/latéral
 - Statique: de 0 à 200+ jours
 - Cyclique

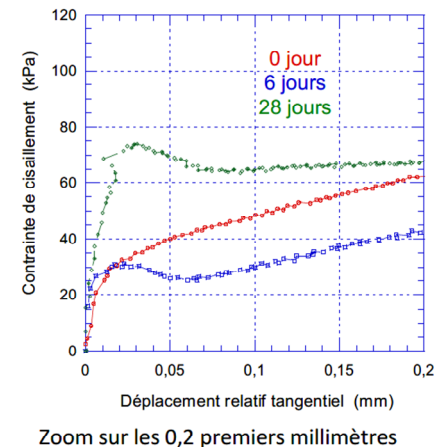
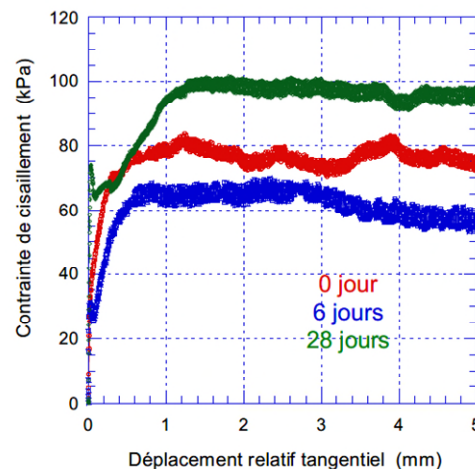
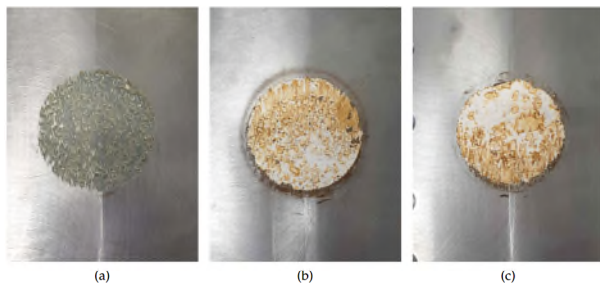


Capacité axiale des pieux dans la craie

- ▶ Phase initiale terminée
- ▶ Résultats surprenants et déstabilisants (non publics)
- ▶ Lancement d'une extension du projet **ALPACA+** (2020) avec notamment installation et essais sur pieux de 1.2 et 1.8m

Capacité axiale des pieux dans la craie

- Investigations dans le cadre de SOLCYP+
 - ❑ Thèse au LGCgE de Lille sur le comportement de la craie: Mirna Doghman (2021) - Développer des courbes de transfert t-z adaptées à la craie (contractance, rôle du temps)
 - ❑ Essais CNS sur la craie du Tréport à Grenoble, Labo 3SR: développement de la cicatrisation et rôle de la corrosion



Aspects réglementaires

- Le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore est largement conduit à l'international à partir de:
DNVGL – ST 0126 (2016) Support structures for windturbines
- Ce document est explicite pour ce qui concerne l'industrie offshore traditionnelle: usage de pieux métalliques battus et sols usuellement rencontrés en mer (sables et argiles).
- Il n'existe pas en France de document normatif ou de texte réglementaire concernant la conception et la réalisation de fondations des ouvrages offshore dans les eaux territoriales.
- Pour pallier ce manque, le CFMS a édité en 2019 des:

« Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore »

www.cfms-sols.org

Aspects réglementaires

- Ces recommandations, **compatibles avec et complémentaires à celles du DNVGL**:
 - Elles couvrent les types de sols spécifiques rencontrés sur le plateau continental français et notamment les **SIRT** (marnes, craies, calcarénites);
 - Elles traitent de manière détaillée le cas des **pieux forés** adaptés à ces types de sols;
 - Elles introduisent les apports du projet SOLCYP concernant le dimensionnement des pieux sous **chargements cycliques**;
 - Elles harmonisent les **niveaux de sécurité** (coefficients partiels de résistance/matériaux) entre travaux offshore et travaux terrestres en se basant sur l'expérience nationale dans ce domaine.

- **Un groupe de travail vient d'être créé pour élaborer des recommandations pour les ancrages des éoliennes flottantes**

