



Groupe de Travail "Fondations d'éoliennes"

Présentation des investigations et études géotechniques

Frédéric DURAND

Journée du 20 octobre 2009

Sommaire



- Préambule sur les modules
- Présentation des 3 domaines
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- Reconnaissance par éoliennes
- Profondeur d'investigations
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- Attendus du client et Attendus du rapport de sol

Sommaire



- **Préambule sur les modules**
- Présentation des 3 domaines
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- Reconnaissance par éoliennes
- Profondeur d'investigations
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- Attendus du client et du rapport de sol

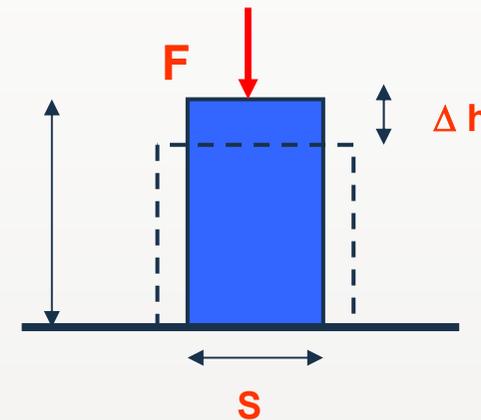
Les différents modules

- Les essais triaxiaux permettent de définir les modules.
- A ce titre, nous pouvons rappeler la définition des différents modules :

➤ module d'Young

$$E = (F/S) / (\Delta h/h) = \Delta \sigma / \varepsilon$$

à contrainte latérale constante ($\varepsilon = \Delta h/h$)

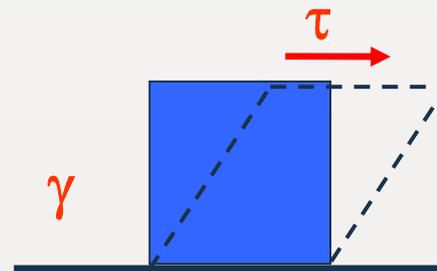


➤ module de cisaillement

$$G = \Delta \tau / \gamma$$

τ contrainte de cisaillement

γ distorsion ($\gamma = (1+\nu) \cdot \varepsilon$)



Les différents modules



➤ Le coefficient de Poisson

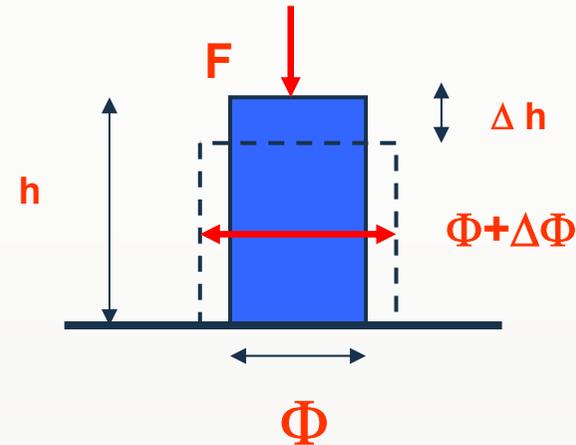
$$\frac{\Delta\Phi}{\Phi} = \nu \frac{\Delta h}{h}$$

ν est le coefficient de Poisson.

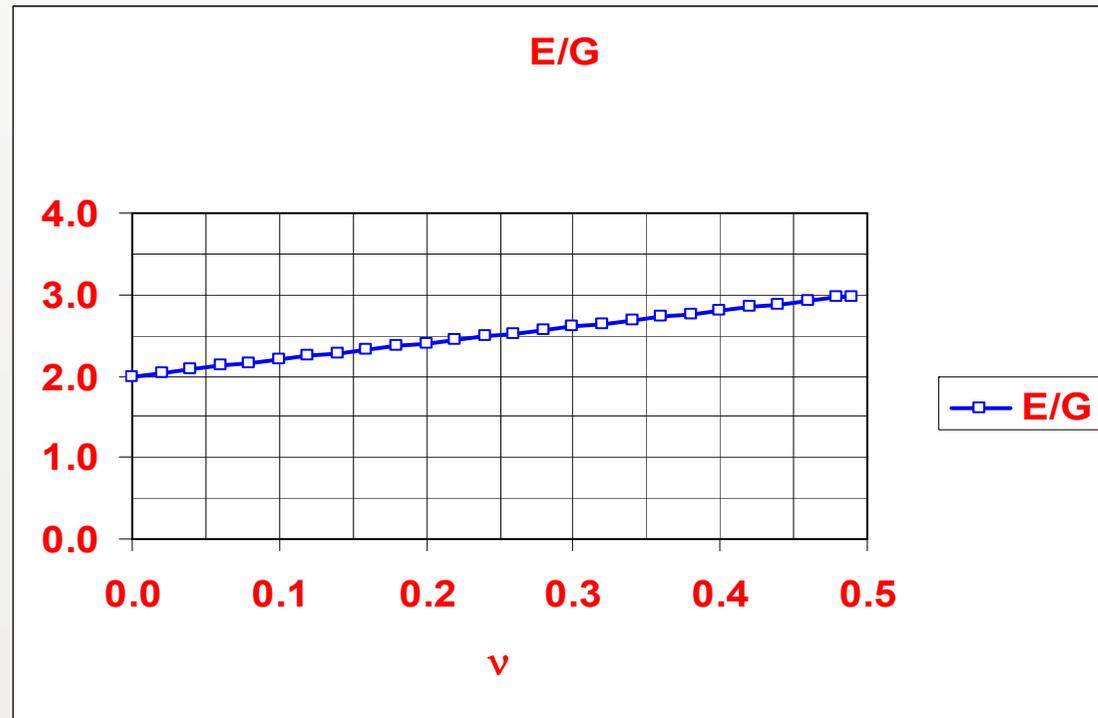
Un sol peut être caractérisé

soit par le couple (E, ν)

soit par le couple (G, ν)



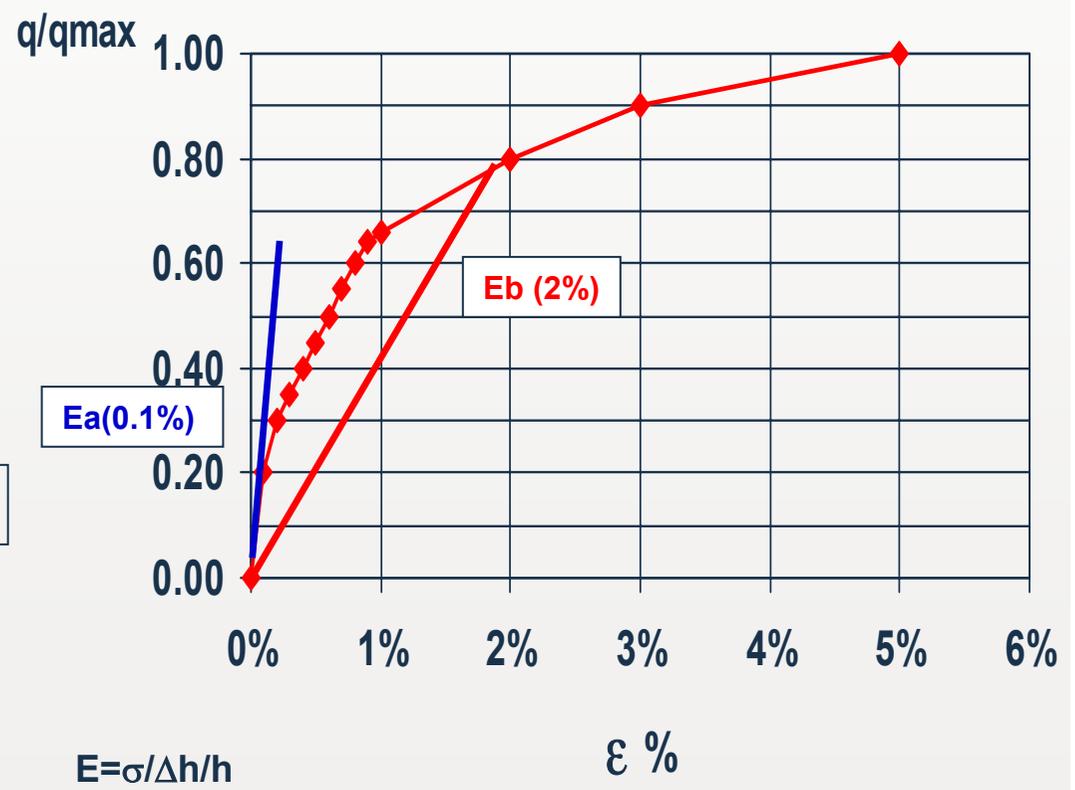
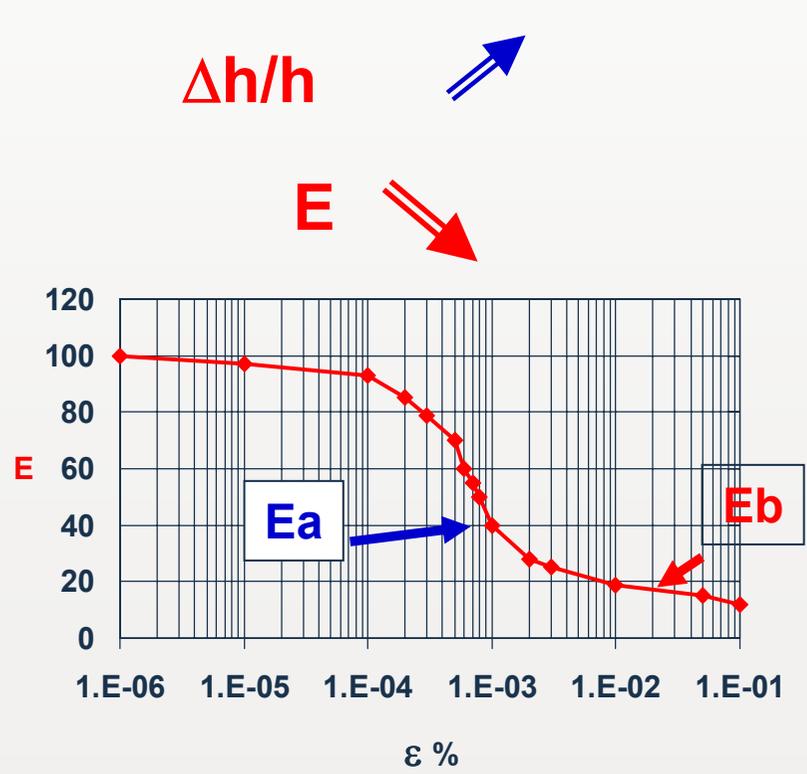
$$G = E / 2 (1 + \nu)$$



Les différents modules



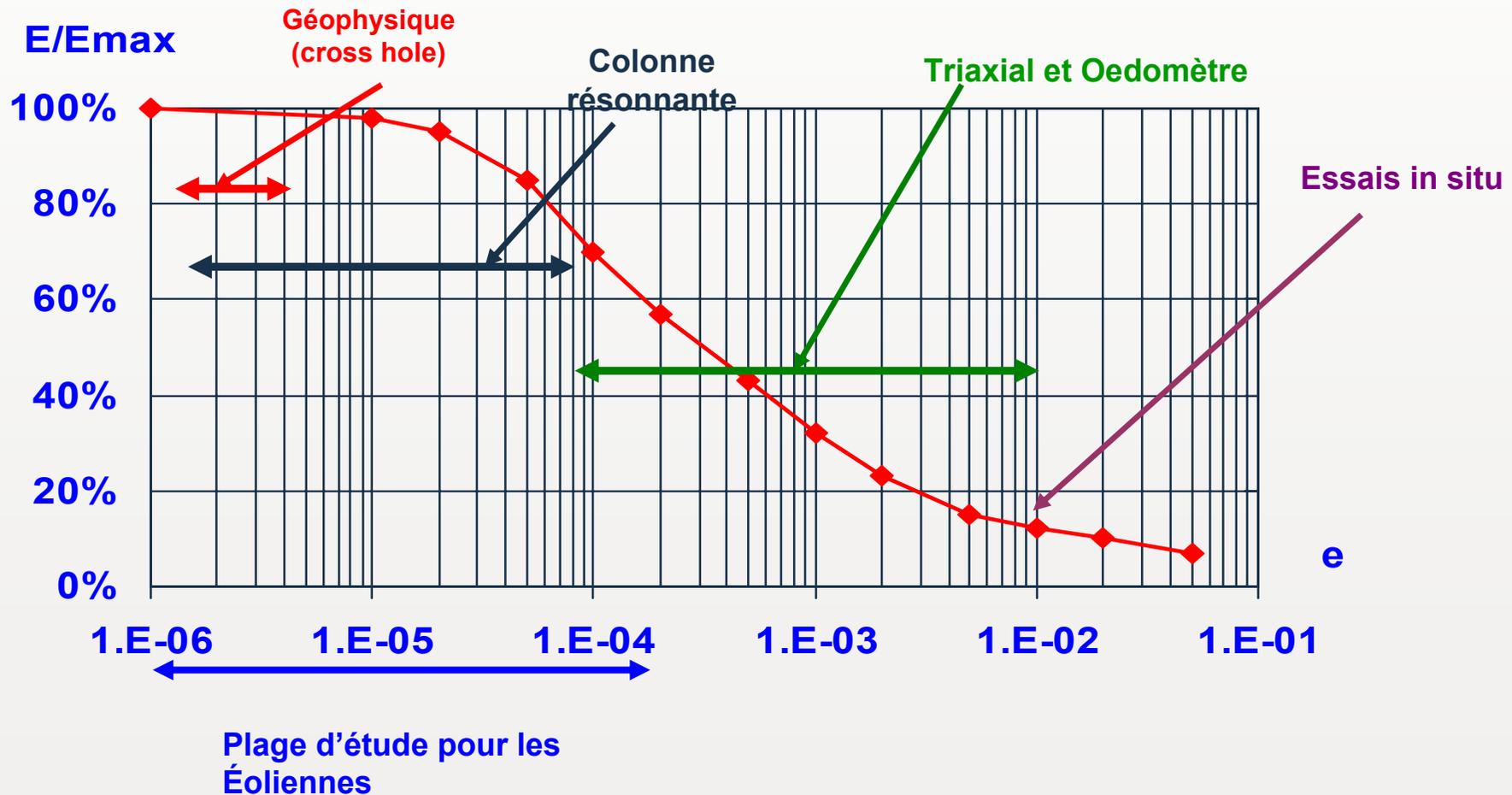
- ▶ par ailleurs, un sol n'est pas un matériau élastique linéaire :
- ▶ quand $e = (\Delta h/h)$ tend vers zéro, E tend vers E_{max} qui correspond à la pente à l'origine.



Les différents modules



Types de mesures

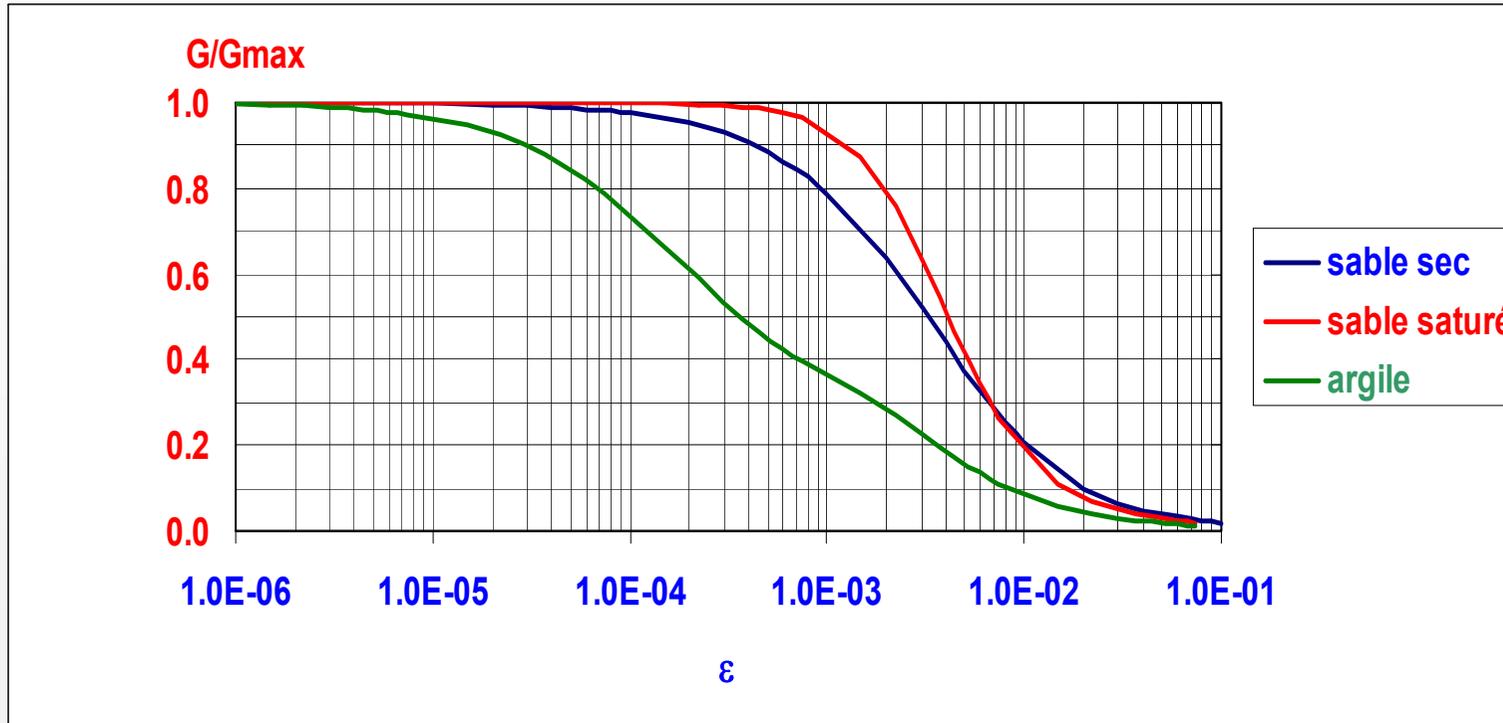


Sommaire



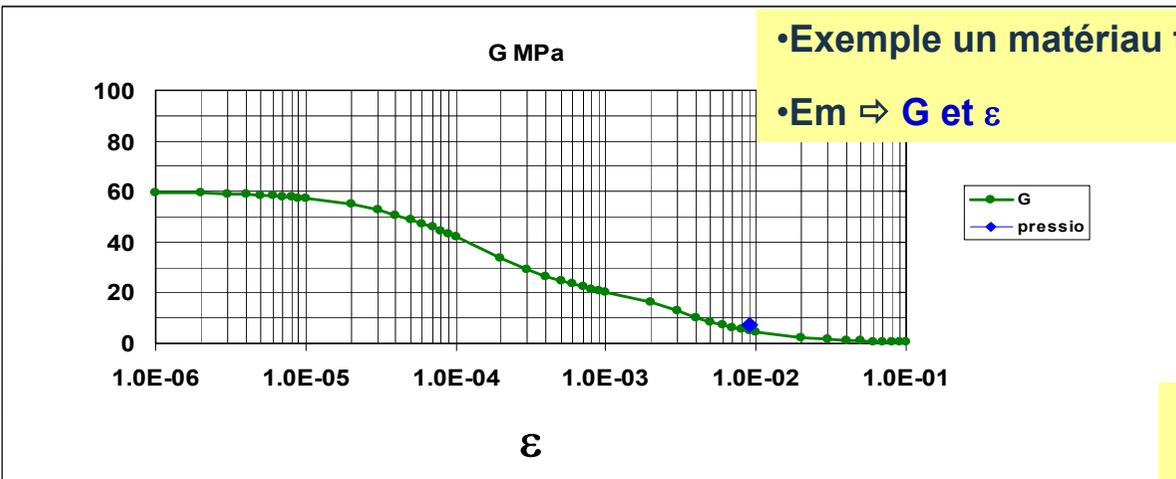
- Préambule sur les modules
- **Présentation des 3 domaines**
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- Reconnaissance par éoliennes
- Profondeur d'investigations
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- Attendus du client et Attendus du rapport de sol

Les 3 domaines



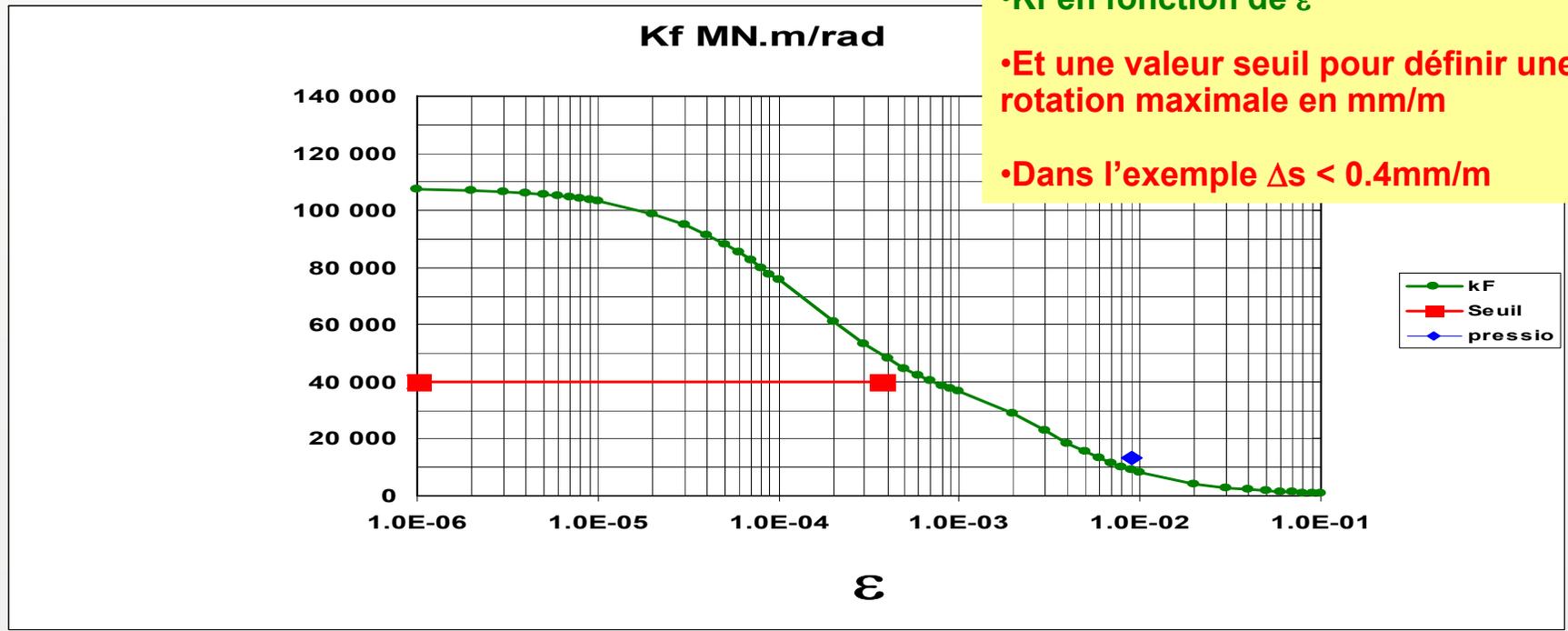
En fonction du type de sol nous pouvons avoir des courbes différentes de E/E_{max} ou G/G_{max} en fonction de ϵ

Les 3 domaines



•Exemple un matériau fin (argile)
 •Em ⇒ G et ε

•On peut calculer la raideur du massif
 •Kf en fonction de ε
 •Et une valeur seuil pour définir une rotation maximale en mm/m
 •Dans l'exemple Δs < 0.4mm/m



Les 3 domaines



Domaine n° 1 : $E_{yst} < 15 \text{ MPa}$

- Dans le domaine 1 a priori les caractéristiques de sol de cette couche ne permettent pas la réalisation de fondations superficielles compatibles avec les critères de déformation et de rotation usuels.
- Si une couche de sol appartenant au domaine n°1 se situe suffisamment en profondeur avec une faible épaisseur, on pourra éventuellement se ramener au domaine n° 2 moyennant une étude spécifique.
- On s'orientera alors vers une adaptation du système de fondation du type : substitution, renforcement de sol ou fondations profondes

Les 3 domaines



Domaine n° 3 : Eyst > 50 MPa

- pour que le projet soit dans le domaine n° 3, **toutes les couches** sur une **profondeur égale à 1,5 fois le diamètre du massif** doivent se situer dans le domaine n°3.
- si une couche de sol appartenant au domaine n°2 se situe suffisamment en profondeur avec une faible épaisseur, **on pourra éventuellement se ramener au domaine n° 3** moyennant une étude **spécifique**.
- **Un principe de fondation superficielle de l'éolienne est envisageable.**
- **La reconnaissance de sol est suffisante.**

Les 3 domaines



Domaine n° 2 : $15 \text{ MPa} \leq E_{yst} \leq 50 \text{ MPa}$

- Dans le cas d'un multicouche sur une profondeur égale à 1,5 fois le diamètre du massif, **si une des couches se trouve dans le domaine n° 2 et si aucune couche ne se situe dans le domaine n° 1, le projet se situe dans le domaine n° 2.**
- Si une couche de sol appartenant au domaine n° 1 se situe suffisamment en profondeur avec une faible épaisseur, **on pourra éventuellement se ramener au domaine n° 2 moyennant une étude spécifique.**
- **La seule définition du module de déformation « statique habituel » E_{yst} ne permet pas de retenir en l'état un système de fondation superficielle.**
- **Toutefois, un principe de fondation superficielle n'est pas exclu.**
- **La reconnaissance de sol à partir des essais in situ traditionnels doit être complétée par une campagne plus détaillée permettant de mesurer les paramètres à très faible déformation (E/E_{max} en fonction de ε)**

Les 3 domaines



Domaine n° 2 : $15 \text{ MPa} \leq E_{yst} \leq 50 \text{ MPa}$

Dans le cadre d'une **ébauche dimensionnelle** (G12)

On pourra utiliser la corrélation suivante:

✓ $G_{max} = 10 G(10^{-2})$

Dans le cadre de corrélations à partir de l'essai pressiométriques, on peut retenir :

✓ $G_{max} = 7 E_M$

Par défaut et à ce stade , pour les taux de déformation considérés pour les éoliennes ($\varepsilon \approx 10^{-3}$ à 10^{-4}), on peut considérer que :

✓ $G(\text{à } 10^{-4}) / G_{max} = 0,33$ pour les matériaux argileux

✓ $G(\text{à } 10^{-4}) / G_{max} = 0,50$ pour les matériaux sablo-graveleux

✓ Pour les autres matériaux, une interpolation est possible.

Les 3 domaines



Association régie par la loi
du 1.07.1901

Types de sols déduits selon le fascicule 62 Titre V		E_{mEq}	q_{ceq}	E_{yst} à 10^{-2}	E_y à 10^{-4} (Valeur min de calcul à retenir)	Domaines
Argiles Limons	A	< 10	< 3	< 15	—	1
	B + C ⁻	≥ 10 et ≤ 30	≥ 3 et ≤ 10	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
	C ⁺	> 30	> 10	> 50	250 (***)	3
Sables Graves	A	< 10	< 10	< 15	—	1
	B	≥ 10 et ≤ 25	≥ 10 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2 (**)
	C	> 25	> 20	> 50	300 (***)	3 (**)
Craies	A + B ⁻	< 8	< 5	< 15	—	1
	B	≥ 8 et ≤ 30	≥ 5 et ≤ 20	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
	B ⁺ + C	> 30	> 20	> 50	300 (***)	3
Marnes Marno-calcaires	A ⁻	< 8	< 5	< 15	—	1
	A ⁺ + A	≥ 8 et ≤ 25	≥ 5 et ≤ 15	≥ 15 et ≤ 50	(****)	2
	A ⁺ + B	> 25	> 15(*)	> 50	400 (***)	3
Roches	A ⁻	≤ 25	-	≤ 50	(****)	2
	A ⁺ + B	> 25	-	> 50	600	3

(*) Plus essais complémentaires si refus prématuré.

(**) Plus étude de liquéfaction sous sollicitations cycliques à réaliser si D10 (diamètre du passant à 10%) < 2 mm

(***) Déterminées à partir de corrélations habituelles

(****) Valeurs à définir lors de la reconnaissance complémentaire.

A⁻, A⁺, B⁻, B⁺, C⁻, C⁺ : Catégories supplémentaires à celles proposées dans le fascicule 62.

Les corrélations entre E_{yst} et E_m sont données à titre conservatif et intègrent un phénomène de fatigue lié au cycle.

Sommaire

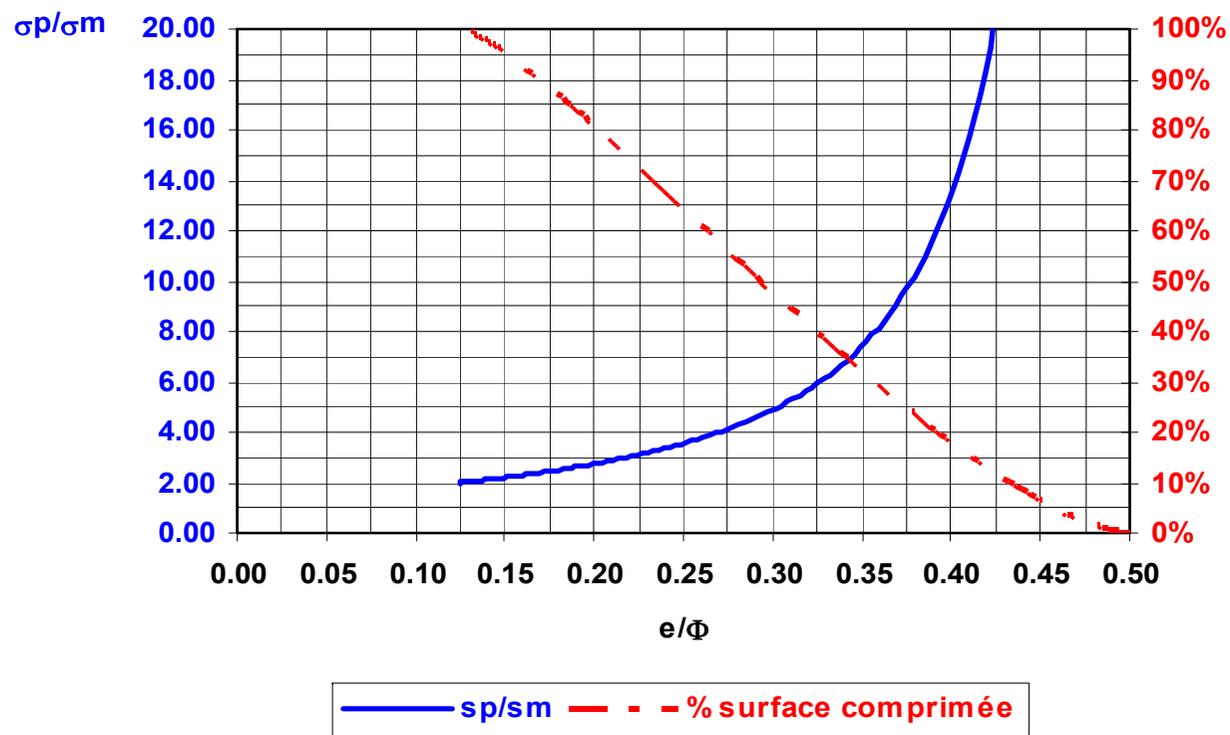


- Préambule sur les modules
- Présentation des 3 domaines
- **Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol**
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- Reconnaissance par éoliennes
- Profondeur d'investigations
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- Attendus du client et Attendus du rapport de sol

Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol



semelle circulaire



Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol



Conditions spécifiques	% Surface comprimée	σ_p/σ_m Max	Commentaires
ELS	100%	= 2	Pas de soulèvement en service
ELU	50%	= 4.7	Applicable à tous types de sol
ELU	30%	= 8	Applicable aux sols peu sensibles à des phénomènes de fatigue a priori (Craie/Marne/Roches) ou après justifications particulières pour les autres types de sol
ELU	10%	= 24	Non applicable aux éoliennes

Sommaire



- Préambule sur les modules
- Présentation des 3 domaines
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- **Reconnaissance par groupe d'éoliennes**
- Reconnaissance par éoliennes
- Profondeur d'investigations
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- Attendus du client et Attendus du rapport de sol

Par groupe d'éoliennes



- Notion de groupe et pas simplement de champ d'éoliennes
- Un groupe d'éoliennes \Rightarrow champ d'éoliennes situé dans une zone homogène géologiquement

	Nombre minimal et nature des sondages.		
Nombre d'éoliennes par groupe	Carottages prélèvements d'échantillons	Piézomètres	* Mesures géophysiques au moins de Vs
1 à 6	1	1 pour 2 éoliennes	1
7 à 12	2	5	1
13 à 18	3	6	2
A partir de 19	4 + 1 par « tranche » de 6	7 + 1 par « tranche » de 6	2 + 1 par tranche de 20

* Selon le domaine de classement des sols domaine 2

Sommaire



- Préambule sur les modules
- Présentation des 3 domaines
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- **Reconnaissance par éoliennes**
- Profondeur d'investigations
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- Attendus du client et Attendus du rapport de sol

Par éolienne

De plus, par éolienne, on réalise au minimum 4 sondages (**1 au centre et 3 en périphérie**) dont :

➤ **1 sondage in situ [R = recommandé] au centre** ;

- soit pressiométrique
- soit au pénétromètre statique

➤ **trois sondages [Q = qualitatif]** à choisir en fonction de la nature des sols pour vérifier en particulier l'homogénéité (profondeur, ...) des sols sous l'emprise de la fondation :

- soit au pénétromètre statique
- soit pressiométrique
- soit destructif avec enregistrement de paramètres, soit au pénétromètre dynamique ou au SPT
- soit à la pelle.

Sommaire



- Préambule sur les modules
- Présentation des 3 domaines
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- Reconnaissance par éoliennes
- **Profondeur d'investigations**
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- Attendus du client et Attendus du rapport de sol

Profondeur d'investigations **au centre** de l'éolienne



Sondage carotté et sondage réalisé au centre de chaque éolienne

La reconnaissance de sol doit permettre de déterminer les caractéristiques de sol sur une profondeur égale ou supérieure à celle sur laquelle des variations de contraintes sont encore sensibles :

- pour les massifs de type fondation superficielle :
 - au minimum 1,5 fois le diamètre théorique du massif,
 - ou un module d'Young $E_{yst} > 100 \text{ MPa}$ sur une épaisseur équivalente à un diamètre,
- pour des fondations profondes de diamètre Φ :
 - 7Φ et au minimum 5 mètres sous la pointe des pieux.
- pour des fondations mixtes et pour des sols renforcés par inclusions rigides ou colonnes ballastées :
 - on prend l'enveloppe des deux cas précédents.

Profondeur d'investigations **en périphérie** de l'éolienne



Autres sondages en périphérie

- La reconnaissance de sol doit permettre de vérifier l'homogénéité (profondeur, ...) des sols sous l'emprise de la fondation.
- **Elle peut donc être limitée en profondeur au toit du substratum sain** ou de l'horizon de fondation.

Sommaire



- Préambule sur les modules
- Présentation des 3 domaines
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- Reconnaissance par éoliennes
- Profondeur d'investigations
- **Reconnaissances complémentaires (domaine 2)**
- Attendus du client et Attendus du rapport de sol



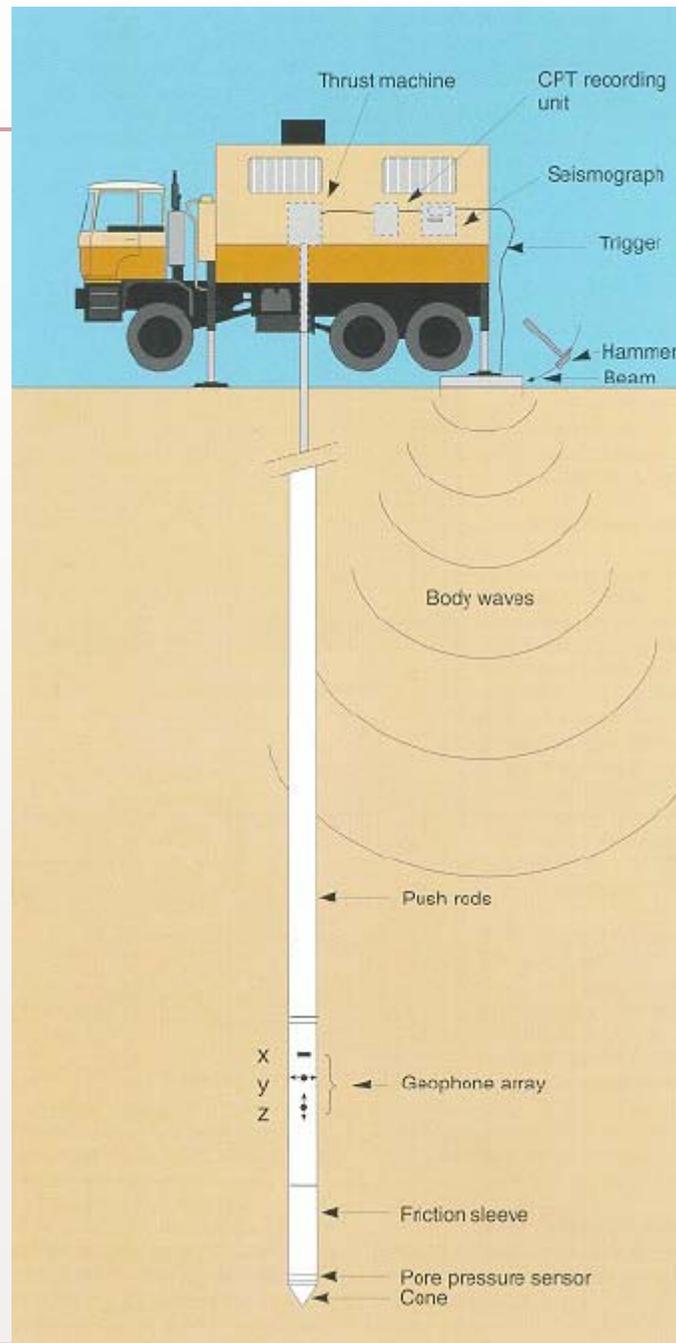
➤ PARAMETRES DYNAMIQUES

- Sismocône
- Ondes de surface (MASW)
- Cross Hole

➤ ESSAIS EN LABORATOIRE

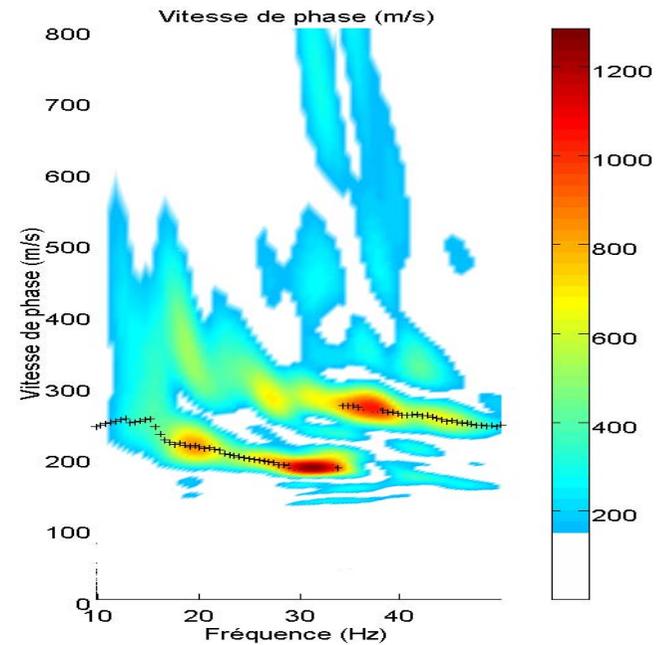
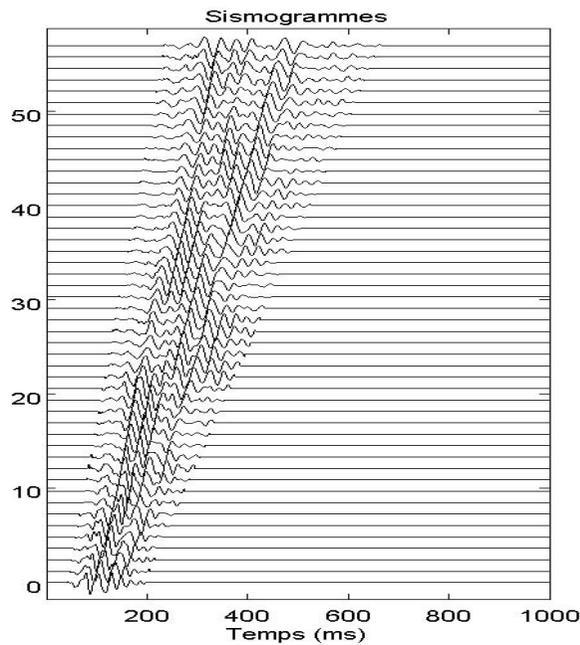
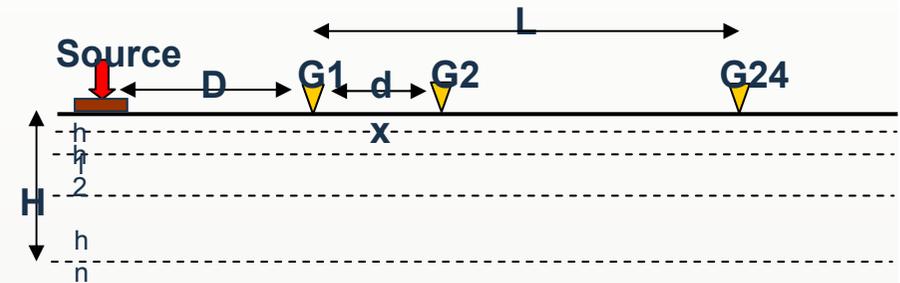
- Essais à la colonne résonnante
- Essais triaxiaux cycliques

Sismocône



MASW

- ▶ Dispositif type sismique réfraction
- ▶ Enregistrements sur 24 géophones basse fréquence ($f_c = 4.5$ Hz).
- ▶ Source: frappe à la masse
espacement: 1 à 3 mètres
profondeur d'investigation: 10 à 20 m



CROSS HOLE Mesures entre forages

Pierrelate - secteur Cogema
Dossier: 2003.01.133
Date des mesures: 26/2/04

Profondeur: 14.00 m / niveau du sol

Coord.
forages: SCHL4A SCHL4
X
Y
Z

Résultats

distance entre forages:
4.28 m

temps de parcours
ondes P: 2.1 ms

temps de parcours
ondes S: 9.6 ms

$V_p = 1937$ m/s

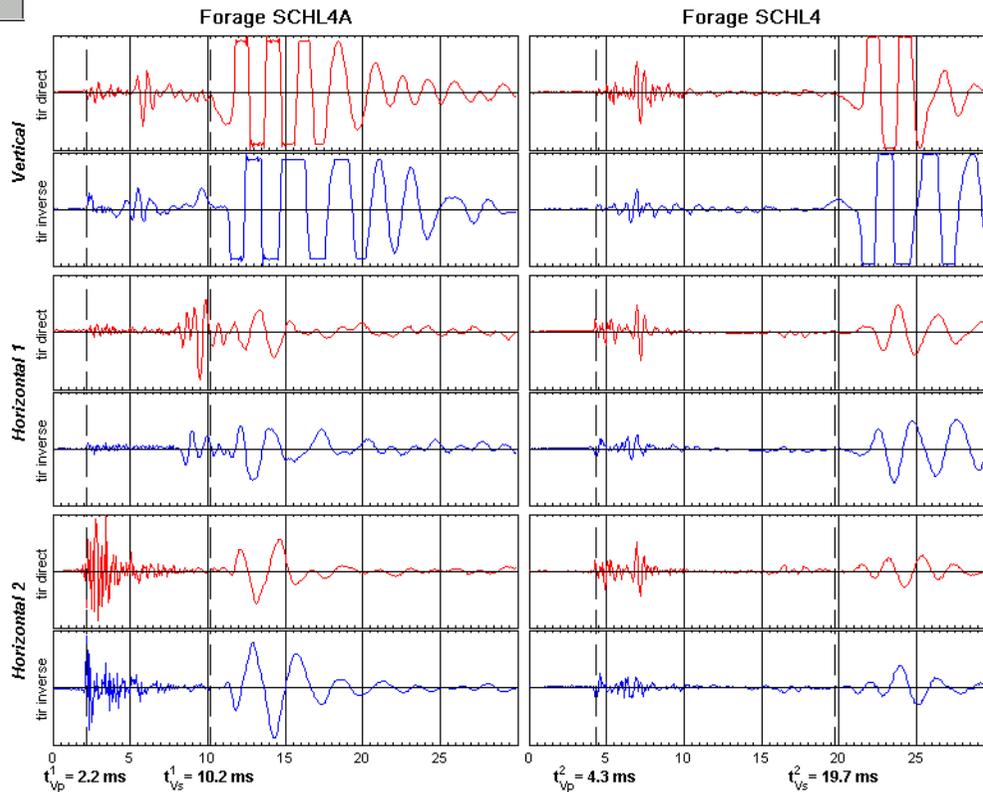
$V_s = 448$ m/s

Coefficient de Poisson
 $\sigma = 0.47$

Masse volumique estimée
 $\rho = 1900$ kg/m³

Module de Cisaillement
 $G = 381$ MPa

Module de Compression
 $E = 1122$ MPa



Sommaire



- Préambule sur les modules
- Présentation des 3 domaines
- Conditions de soulèvement de massif en fonction du type de sol
- Reconnaissance par groupe d'éoliennes
- Reconnaissance par éoliennes
- Profondeur d'investigations
- Reconnaissances complémentaires (domaine 2)
- **Attendus du client et Attendus du rapport de sol**

Attendus du client



Données du site de la NF EN 61-400 de juin 2006) :

- ▶ l'implantation du projet ;
- ▶ le nivellement du projet ;
- ▶ plan topographique ;
- ▶ le plan des réseaux existants et la liste des concessionnaires pouvant être concernés (**DR** : Demande de Renseignements [décret 91-1147]) ;
- ▶ les critères d'environnement (PPR) ;
- ▶ les **différentes descentes de charge** ;
- ▶ les **exigences imposées** en termes de :
 - **tassement et déformations, raideur,**
 - **contraintes requises du sol (le cas échéant).**

Attendus du rapport



Le géotechnicien doit fournir :

- le périmètre géotechnique [ZIG]
- la géologie et la stratigraphie
- l'hydrologie
- l'agressivité (eau et sol)
- un modèle géotechnique définissant les différentes couches à prendre en compte:
 - ✓ l'épaisseur,
 - ✓ la nature des terrains
 - ✓ la perméabilité, si nécessaire,
 - ✓ la pression limite ou la valeur au pénétromètre statique caractéristique,
 - ✓ les modules:
 - ❖ Eyst pour une déformation de l'ordre de 10^{-2}
 - ❖ E ou G pour des déformations comprises entre 10^{-3} et 10^{-4}

Attendus du rapport



Le géotechnicien doit fournir :

- Domaines 1 2 ou 3
- les dispositions constructives
- Le type de fondations
- les hypothèses géotechniques
- Et suivant son niveau de mission G1 ou G2
 - Soit une ébauche dimensionnelle
 - Soit un dimensionnement de projet



Groupe de Travail "Fondations d'éoliennes"

Merci pour votre attention