Amélioration et renforcement des sols

Combinaisons de procédés de renforcement de sol sous des éoliennes

Serge Lambert – KELLER Fondations Spéciales

Combinaisons de procédés de renforcement de sol sous des éoliennes

Contenu

- Introduction
- Le projet
- Contexte géologique/géotechnique
- Solution de renforcement de sol
- Les travaux d'injection solide
- Modélisation
- Contrôles
- Conclusions

Introduction

Projet d'éoliennes avec ses spécificités dans un contexte géotechnique compliqué:

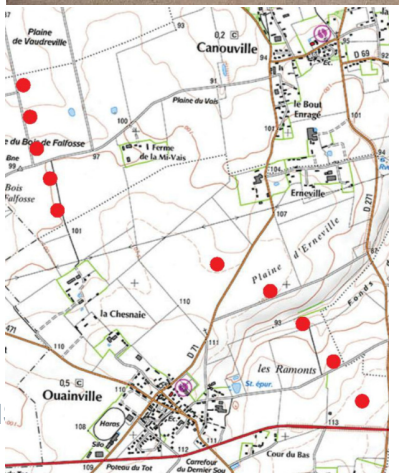
- Solution de renforcement de sol en combinant 2 procédés de renforcement,
- Prospection géotechnique dans un contexte karstique,
- Sollicitations particulières des éoliennes,
- L'organisation du chantier et la gestion des aléas géotechniques en cours de travaux

Le projet

Le projet prévoit la construction d'un parc éolien composé de 10 éoliennes sur la commune d'OUAINVILLE (76).
Il est prévu 2 champs de 5 éoliennes sur les lieux dits de Falfosse et des Ramonts.

- Eoliennes : rotor 92 m de diamètre
- Hauteur des éoliennes en bout de pale : 126 m
- Puissance totale 20 mégawatts.

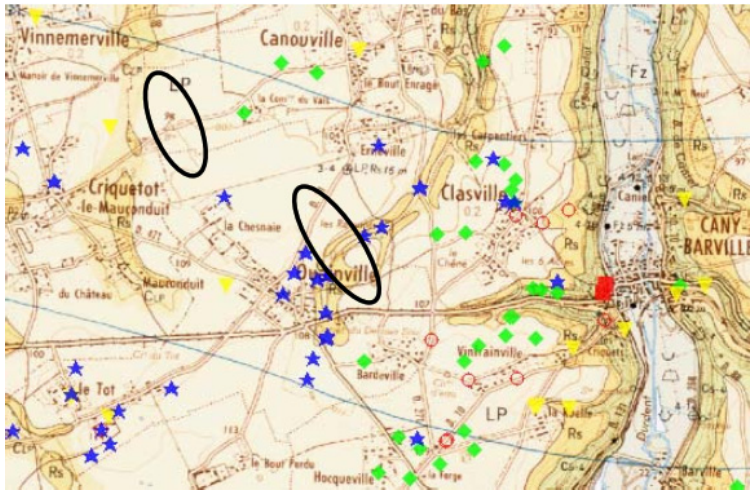
MO: CEOLFALRM 76
Moe: La COMPAGNIE DU VENT
Be SOL: Alios



Contexte géologique

- Limons des plateaux,
- Mélanges de silex, de limons et d'argiles (produit de décalcification de la craie),
- Sénonien inférieur qui correspond à une imposante série de craie à silex.

Feuille de Fécamp



Présence de vides anthropiques (carrés verts, cercles rouges et étoiles bleues sur la carte) ou naturels dans cette formation peut constituer un aléa important !

Les reconnaissances

En phase G2 AVP et G2 Pro:

- Une investigation géophysique par micro-gravimétrie selon 2 profils perpendiculaires au droit de chaque emplacement d'éolienne (682 points de mesures au totales),
- 14 sondages pressiométriques descendus entre 25 et 38,2 m,
- 41 sondages destructifs avec enregistrements de paramètres,

Le contexte géotechnique

L'étude de sol complémentaire G2 PRO a montré la présence d'horizon décomprimé à grande profondeur sous les éoliennes E4F et E2R.

Éoliennes E4F et E2R / modèles ESA/EAA :

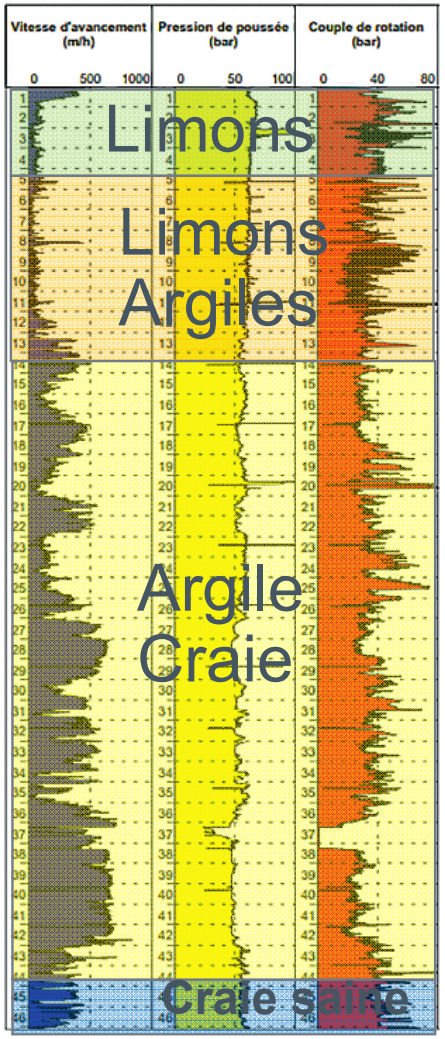
Sans anomalies

Catégorie de sol	Base (m/TN) [1]	pl (MPa)	E (MPa)	α	Ey (MPa)	C' (kPa)	φ' (°)	qs (kPa)
Limon / Argile A	11.0 [2]	0.60	7.0	0.67	6.5	5	20	négligé
Argile B (ancrage IR) [3]	20.0	1.50	17.0	0.67	15.9	20	25	75
Craie B/C au-delà	≥ 25	> 3.0	60.0	0.50	74.8	40	25	-

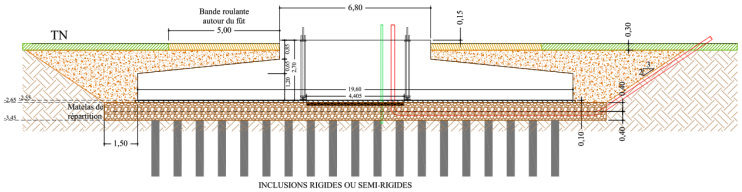
Avec anomalies

Catégorie de sol	Base (m/TN) [1]	pl (MPa)	E (MPa)	α	Ey (MPa)	C' (kPa)	φ' (°)	qs (kPa)
Limon / Argile A	5.0 [2]	0.60	7.0	0.67	6.5	5	20	négligé
Argile B	14.0	1.50	20.0	0.67	18.7	25	25	négligé
Argile A / Craie A [4]	44.0	0.30	5.0	0.67	4.7	3	15	négligé
Craie B (ancrage IR) [3]	≥ 46.85	1.50	20.0	0.67	18.7	25	25	100

Avec anomalies

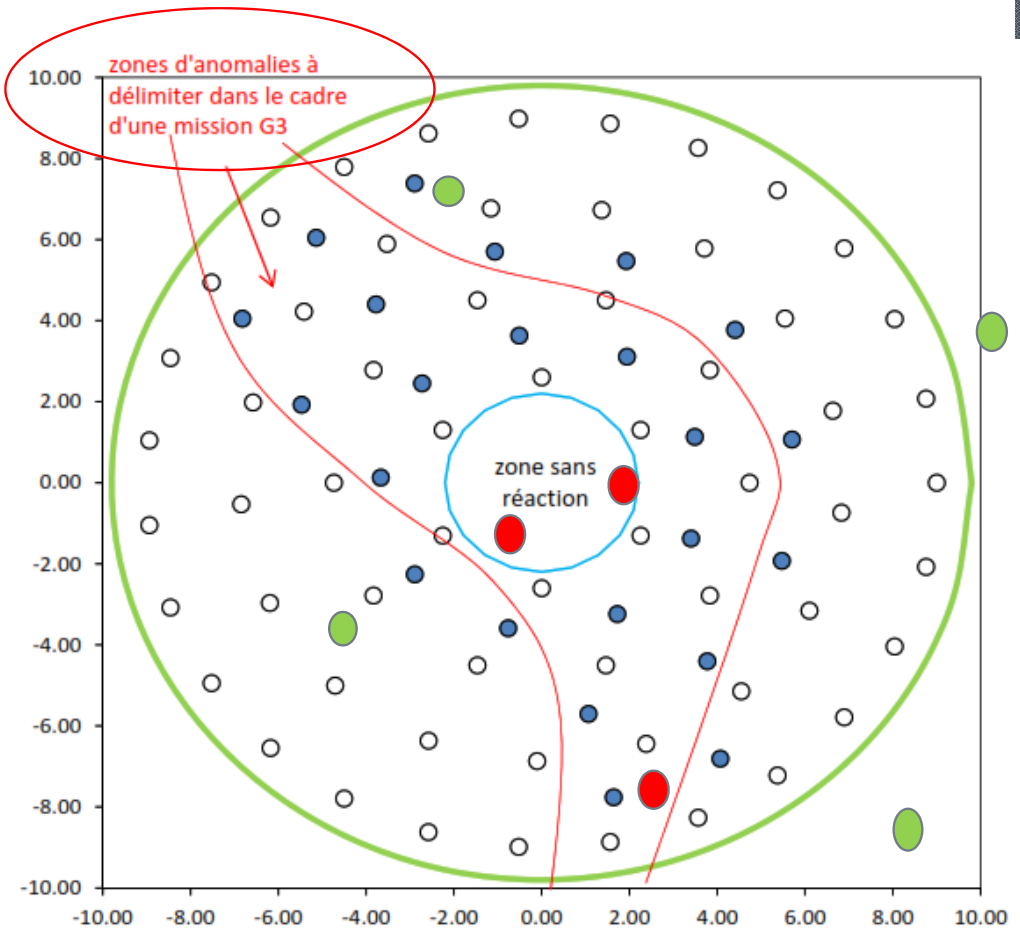


Solution de renforcement de sol proposée G2 Pro



Réf. éoliennes	Nbre.	Massif proposé (2)	Renforce. des sols (3)	Sol d'ancrage des IR	Z / TN des sols d'ancrage des IR (5)	Ancrage minimale des IR (6)
E4F & E2R (4)	2	Øext 19.60 m Øint 4.405 m ancrage 2.65 m/TN	60 à 100 IR IRØ340 mm & matelas 80 cm (5)	craies B/C & argiles B/C	10.0 à > 45.0 m/ TN	> 50 cm

- Sondages sans anomalie
- Sondages avec anomalies



Appel d’offre

Points particuliers du marché:

- Profondeur de plus de 45 m nécessite des foreuses particulières pas forcément disponibles pour de petits projets,

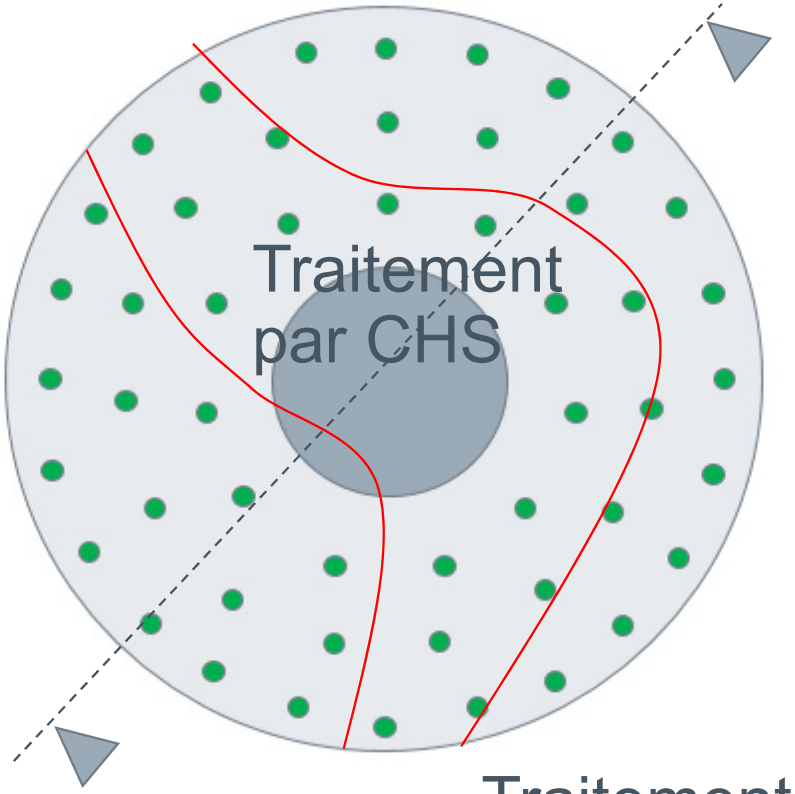
- Marché au métré

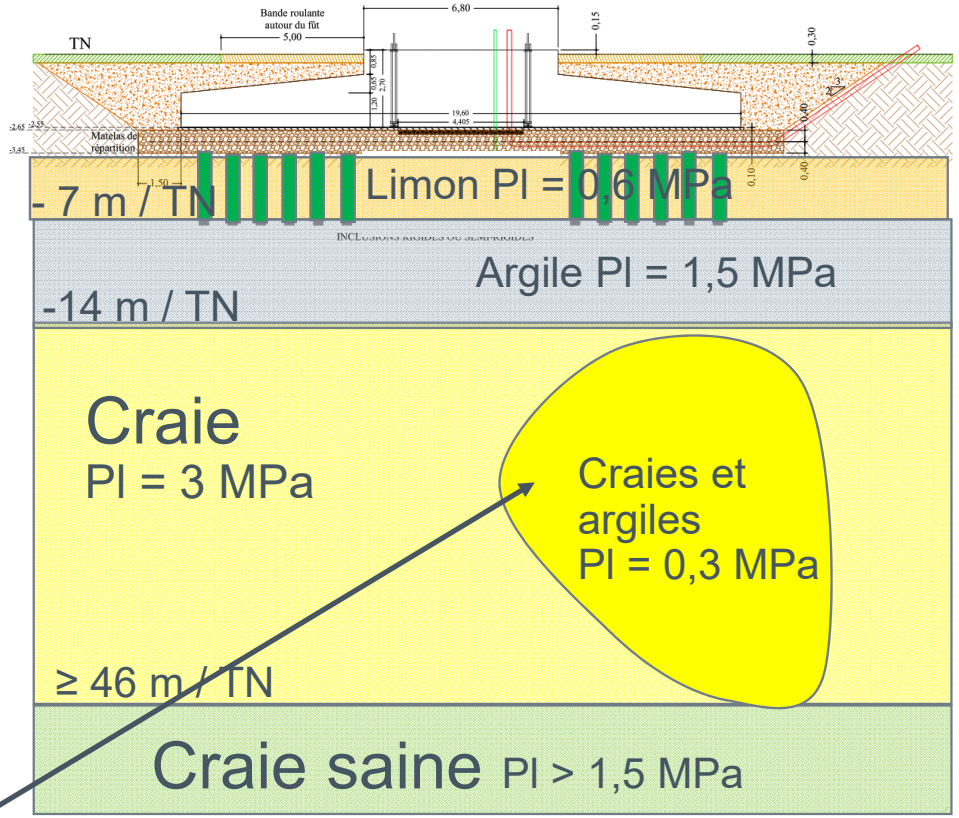
- Délimitation de la zone de traitement dans le cadre du mission G3

- Injection à réaliser uniquement dans les zones décomprimées définies par les enregistrements des sondages préliminaires ou les forages d’injection.

Solution de renforcement de sol proposée

- Inclusions rigides INSER

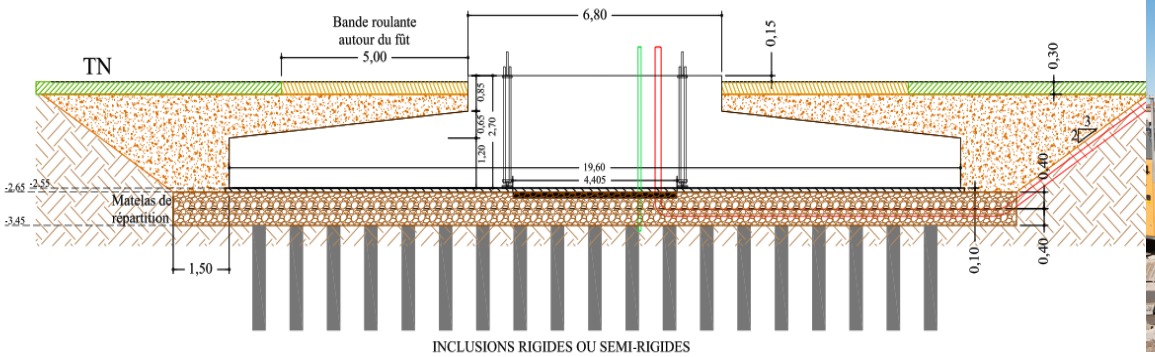




Traitement
par CHS

Solution de renforcement de sol proposée

Renforcement de sol par inclusions rigides INSER®



Inclusions rigides ancrées dans la formation argileuse à – 5 m/TN

Réduction de la charge supportée par le sol

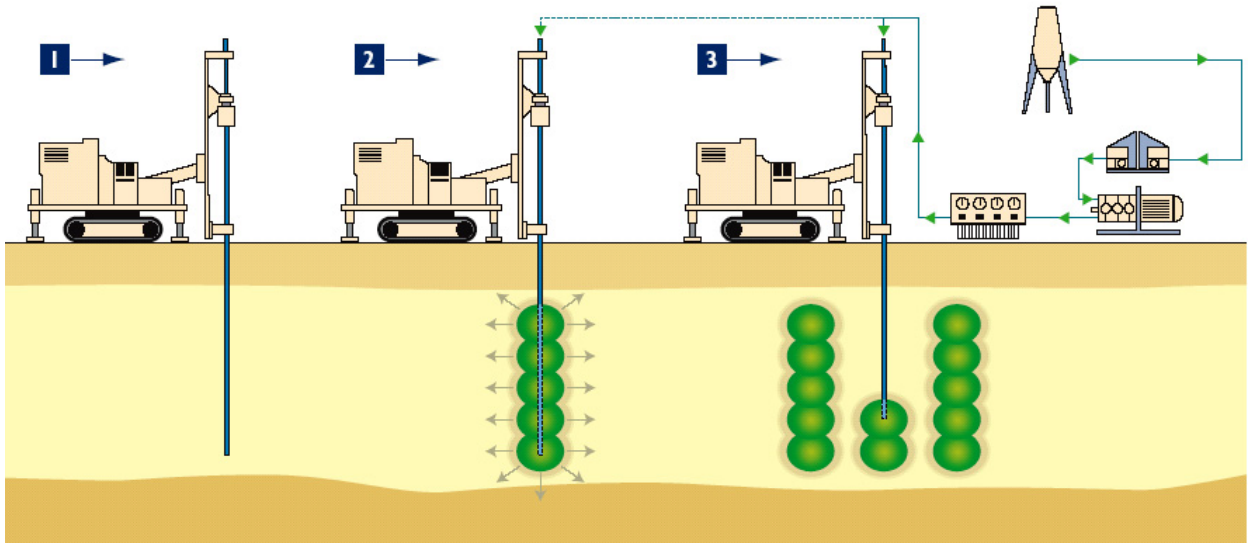
- Réduction des déformations;
- Augmentation de la capacité portante;

Matelas de répartition

- Répartition des contraintes entre le sol et les inclusions;
- Dissipation des efforts horizontaux et des vibrations

Solution de renforcement de sol proposée

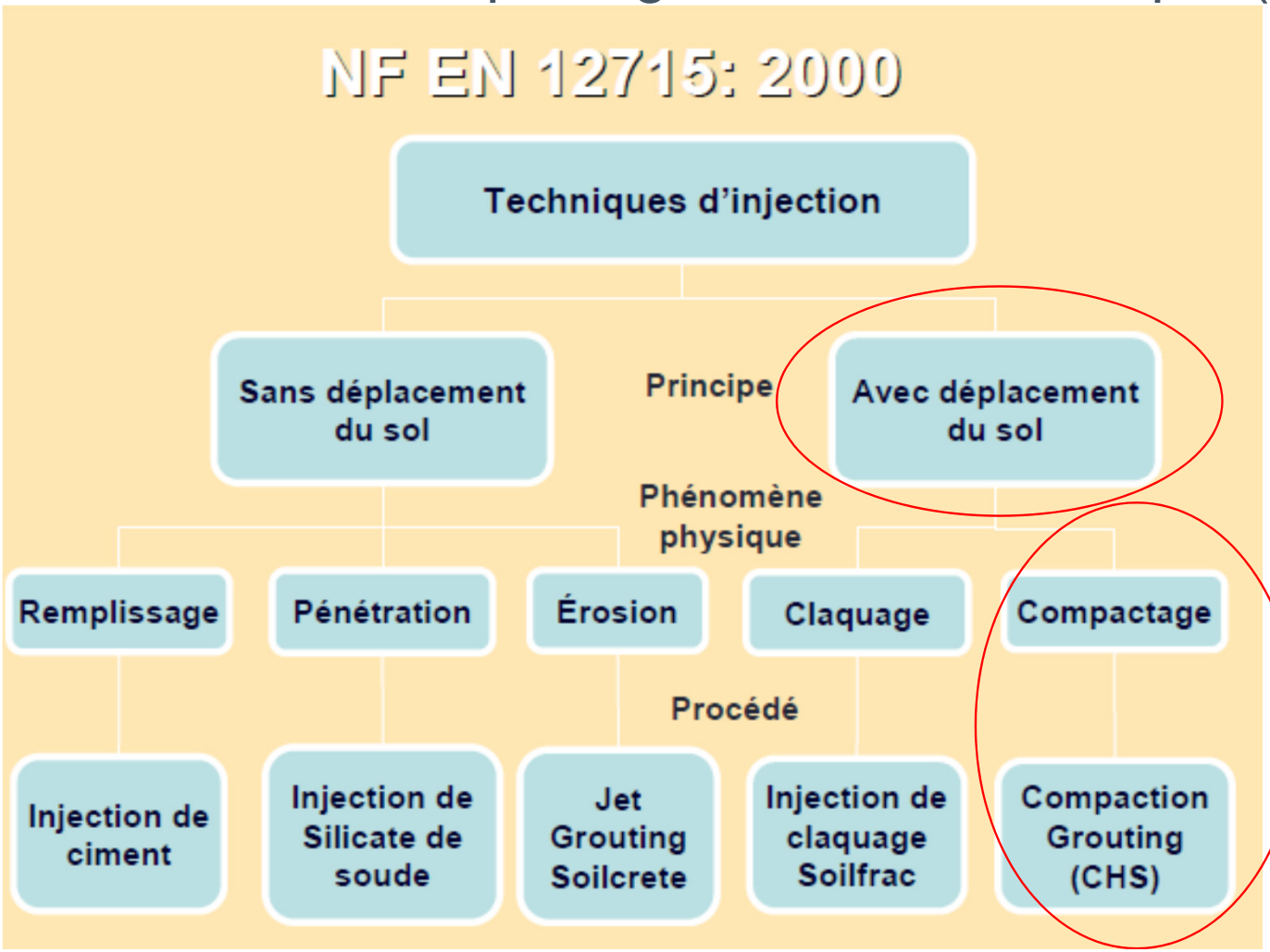
L'injection solide ou Compactage Horizontal Statique (CHS®)



un slump < 10 cm

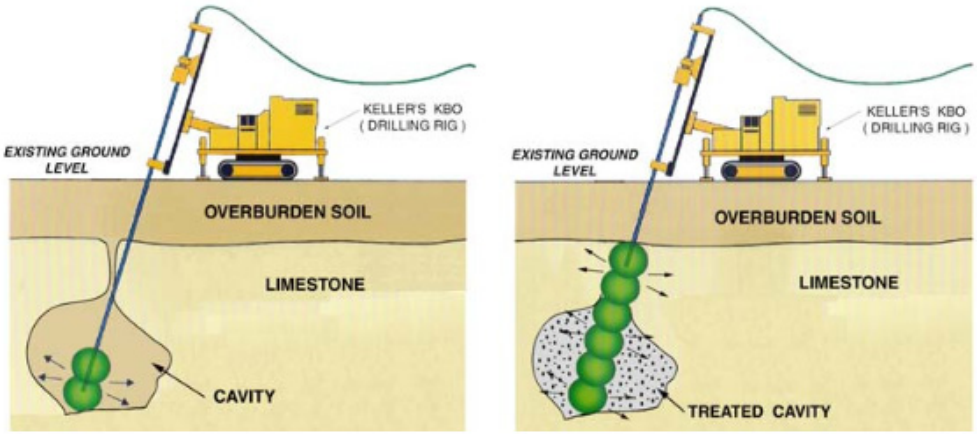
Solution de renforcement de sol proposée

L'injection solide ou Compactage Horizontal Statique (CHS®)



Solution de renforcement de sol proposée

L'injection solide ou Compactage Horizontal Statique (CHS®)



Description	Paramètres	Remarques
Maille	1 à 3 m	liée à la nature des sols, à la pression d'injection et au refoulement du sol
Passe d'injection	0,5 m en moyenne	les passes peuvent être atteindre 1 m maximum
Pression d'injection	1 à 2 Mpa	La pression doit compenser les pertes de charges dans les flexibles et permettre le refoulement du mortier dans le sol
Débit d'injection	1 à 6 m3/heure	1 à 2 m3/h pour de faible profondeur et 3 à 6 m3/h à grandes profondeurs

Tab. 17.1. Rayons d'influence en fonction des types de sol

Désignation sol	Rayon d'influence R_i (m)
Argiles	0,2 à 0,3
Limons	0,5 à 1,0
Sables ou graviers	1,5 à 3,0

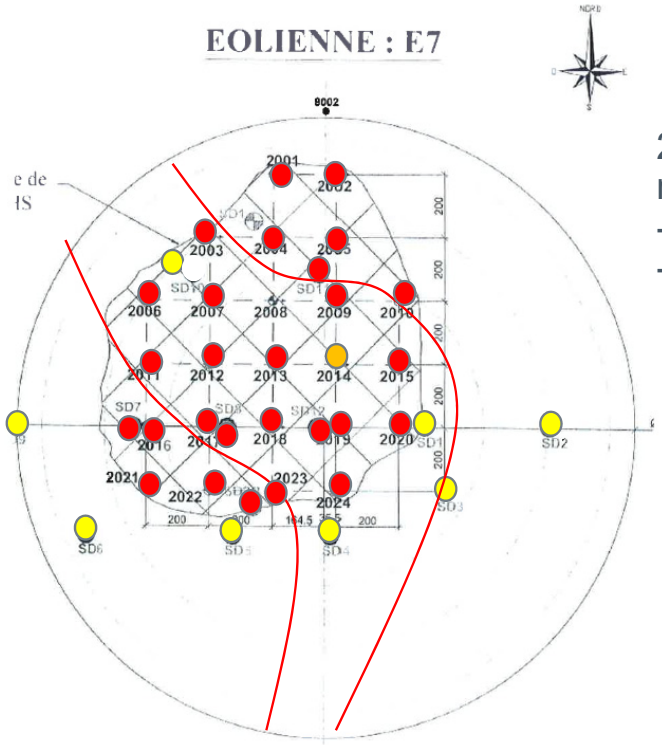
Cf. Améliorations et renfocement des sols L. Briançon P. Liausu, C. Plumelle, B. Simon)

Tab. 17.2. Mailles utilisées et taux d'incorporation obtenus sur divers chantiers d'amélioration de sols

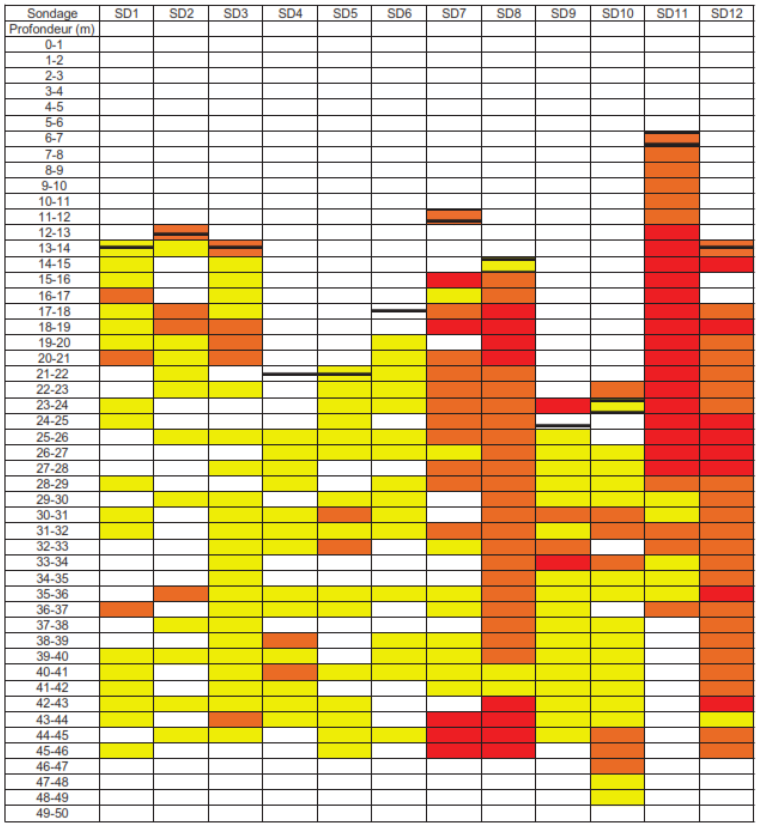
Désignation des sols	Ouvrages traités	Mailles (m^2)	Taux d'incorporation (plages et moyennes) (%)	
Fontis ou zones karstiques	Tunnels et divers	4 à 9 Moyenne : 6,75	4 à 14	8,5
	Bâtiments, ponts	4 à 6,25 Moyenne : 4,65	6 à 12	
Sables ou remblais sableux	Divers	4 à 9	3,8 à 6,3	4
	Traitements sous bâtiments	6 à 9	2,4 à 4,4	
Remblais marneux ou divers	Bâtiments	4 à 6	1,4 à 8 Moyenne : 4,3	5,3
	Tunnels, routes, etc.	6 à 9	1,9 à 8,1 Moyenne : 5,5	

Cf. Améliorations et renfocement des sols L. Briançon P. Liausu, C. Plumelle, B. Simon)

Délimitation de la zone dans le cadre d'une G3 (avant démarrage des travaux)



2 campagnes de reconnaissance
- Novembre 2015
- Janvier 2016



Anomalie	Critère de vitesse (m/h)
faiblement altéré à altéré	300<VA<500
altéré à décomprimé	500<VA<700
décomprimé à vide	VA>700

Profondeur du toit de la craie

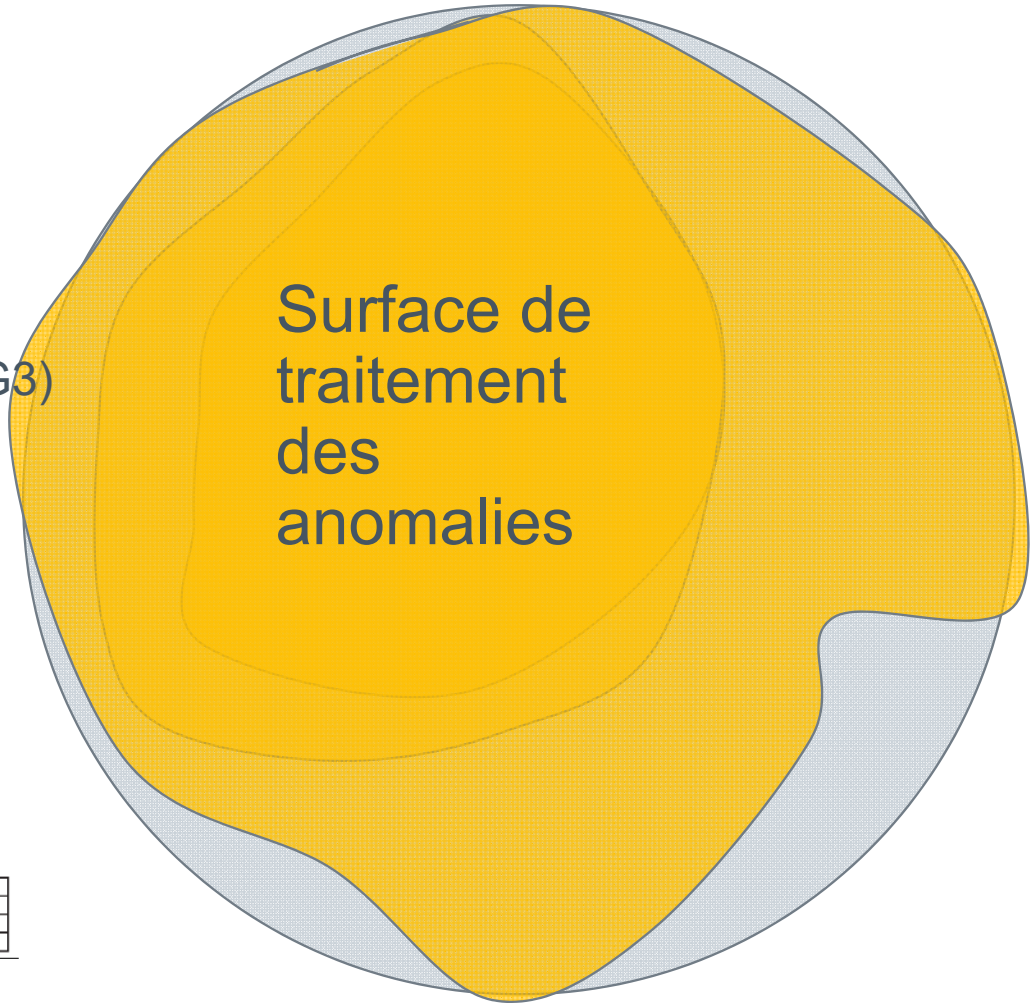
Anomalie	Critère de vitesse (m/h)
faiblement altéré à altéré	300<VA<500
altéré à décomprimé	500<VA<700
décomprimé à vide	VA>700

Profondeur du toit de la craie

Les travaux de CHS

Procédure d'exécution des injections:

- Réalisation des préforages avec enregistrement de paramètres
- Analyse des enregistrements avec détermination des zones à injecter (G3)
- Validation du contrôleur (G4)
- Injection dans les zones identifiées uniquement.



Sondages Keller

	vitesse < 200 m/h passages sains
	vitesse 200 à 400 m/h vitesse d'avancement dans les passages faiblement altérés à altérés
	vitesse 400 à 600 m/h vitesse d'avancement dans les passages altérés à décomprimés
	vitesse > 600 m/h vitesse d'avancement dans les passages décomprimés

Sondages CEBTP :

Anomalie	Critère de vitesse (m/h)
faiblement altéré à altéré	300<VA<500
altéré à décomprimé	500<VA<700
décomprimé à vide	VA>700

Sondages Alios :

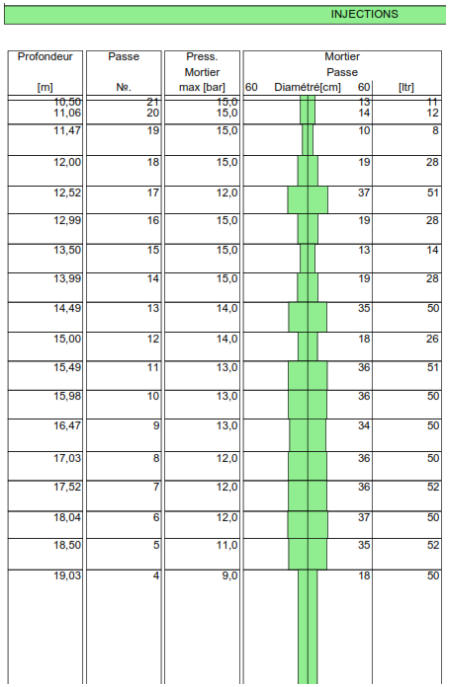
Critères valables pour les sondages SD1 à SD10	
Anomalie	Critère de vitesse (m/h)
faiblement altéré à altéré	150<VA<250
altéré à décomprimé	250<VA<350
décomprimé à vide	VA>350

KELLER

Les travaux en quelques chiffres

Au droit de l'éolienne E2R:

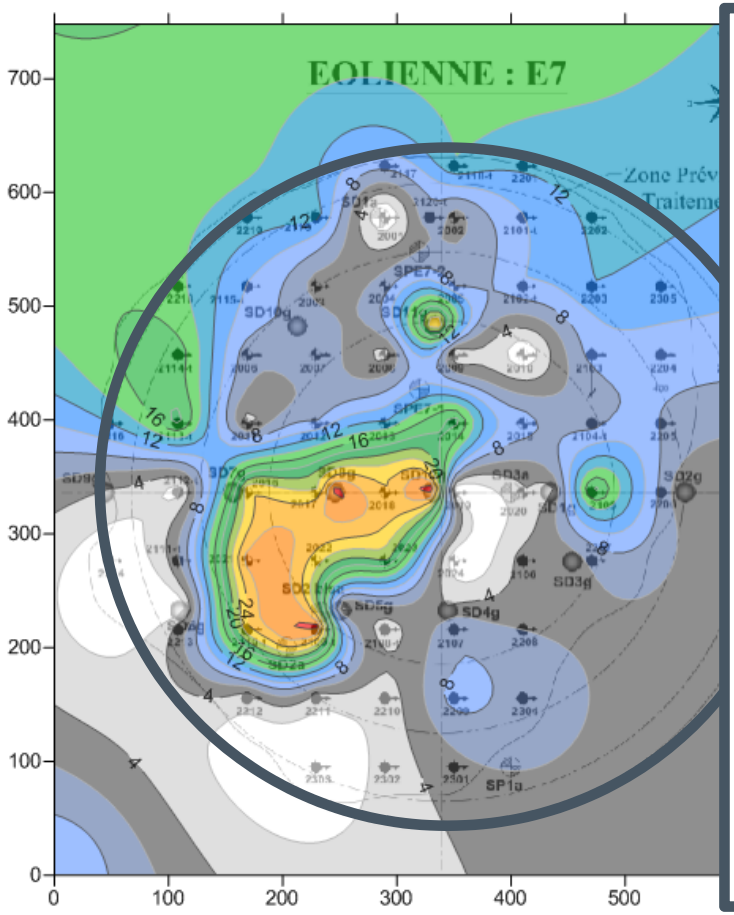
- 76 points de compactage CHS
- Profondeurs de 20 à 45 m
- 150 m3 de mortier injecté (pas de vide détectée)
- 55 inclusions INSER prof. Moyenne 4 m

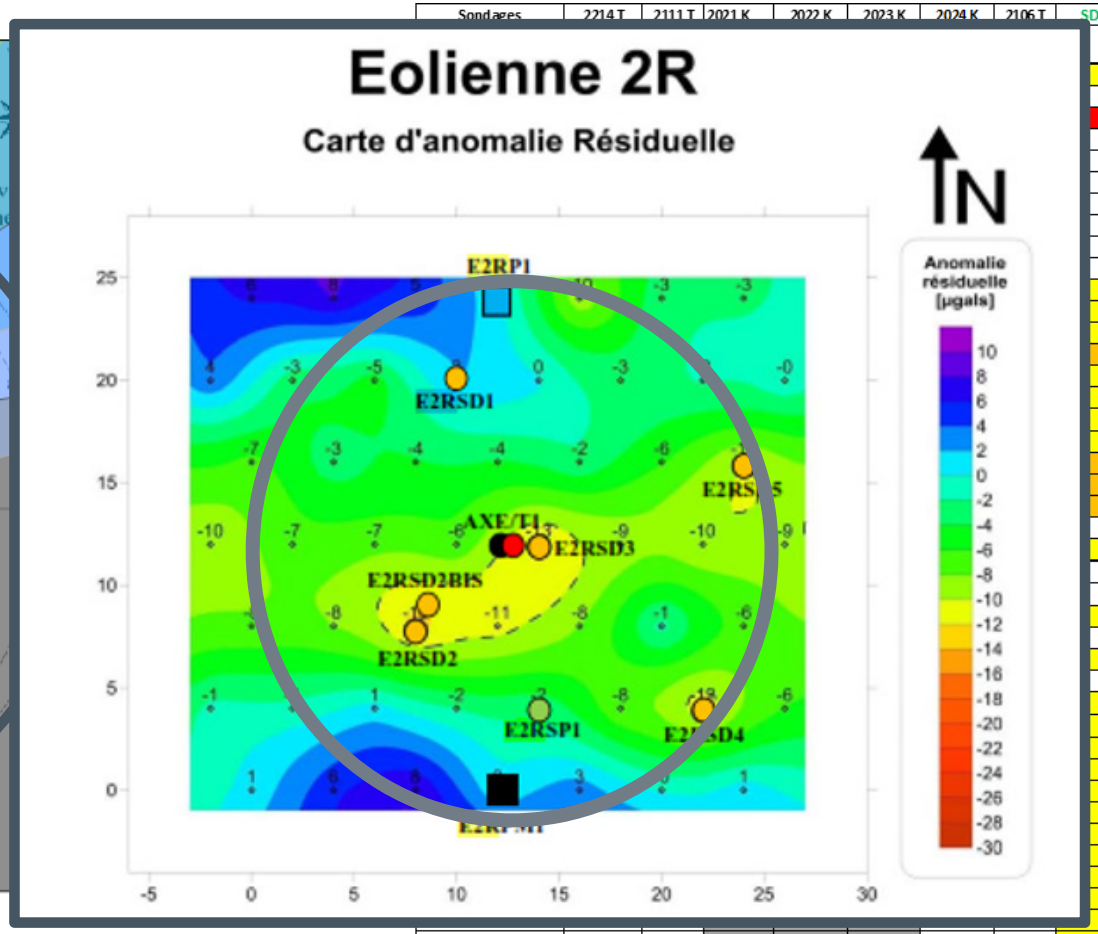


INJECTIONS

Profondeur [m]	Passe №.	Press. Mortier max [bar]	Mortier Passe 60 Diamétré[cm] 60	[ltr]
10,50	21	15,0	13	11
11,06	20	15,0	14	12
11,47	19	15,0	10	8
12,00	18	15,0	19	28
12,52	17	12,0	37	51
12,99	16	15,0	19	28
13,50	15	15,0	13	14
13,99	14	15,0	19	28
14,49	13	14,0	35	50
15,00	12	14,0	18	26
15,49	11	13,0	36	51
15,98	10	13,0	36	50
16,47	9	13,0	34	50
17,03	8	12,0	36	50
17,52	7	12,0	36	52
18,04	6	12,0	37	50
18,50	5	11,0	35	52
19,03	4	9,0	18	50

Travaux de CHS: Analyse enregistrements de paramètres

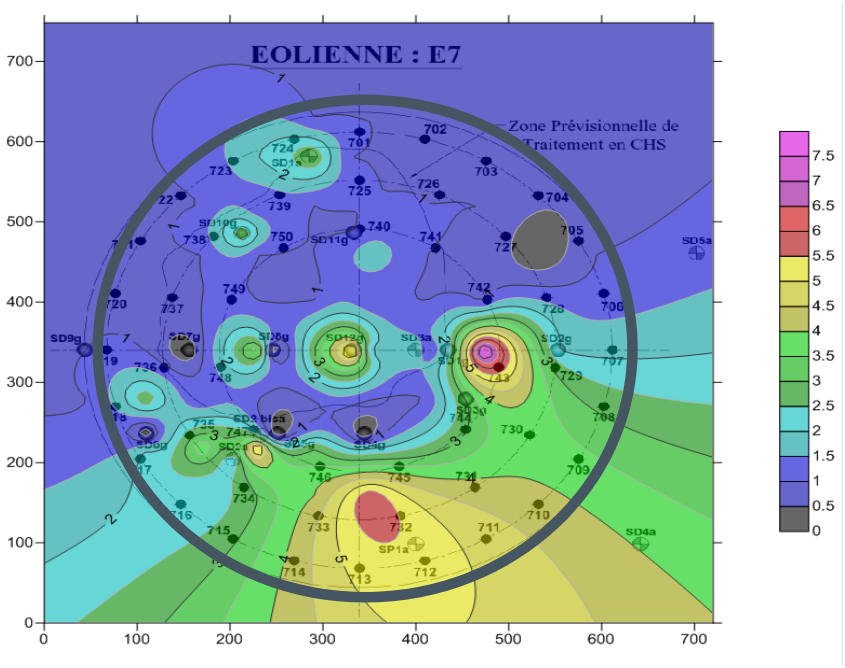




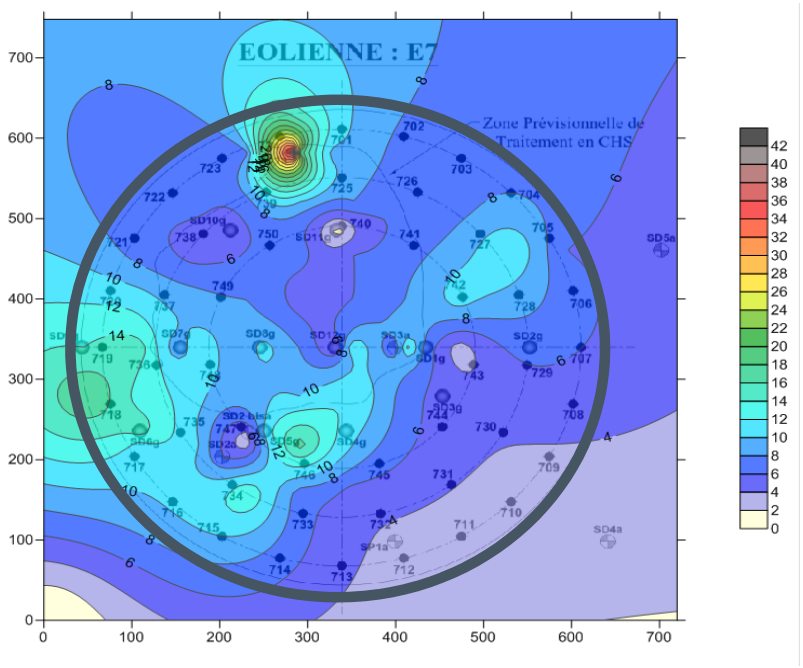
Epaisseurs cumulées des anomalies

Travaux de CHS: Analyse enregistrements de paramètres

Vérification de l'épaisseur et la profondeur de la couche d'assise des inclusions INSER®



Toit de la couche en moyenne 2 m / PFT avec des profondeurs maximales de 7,5 m



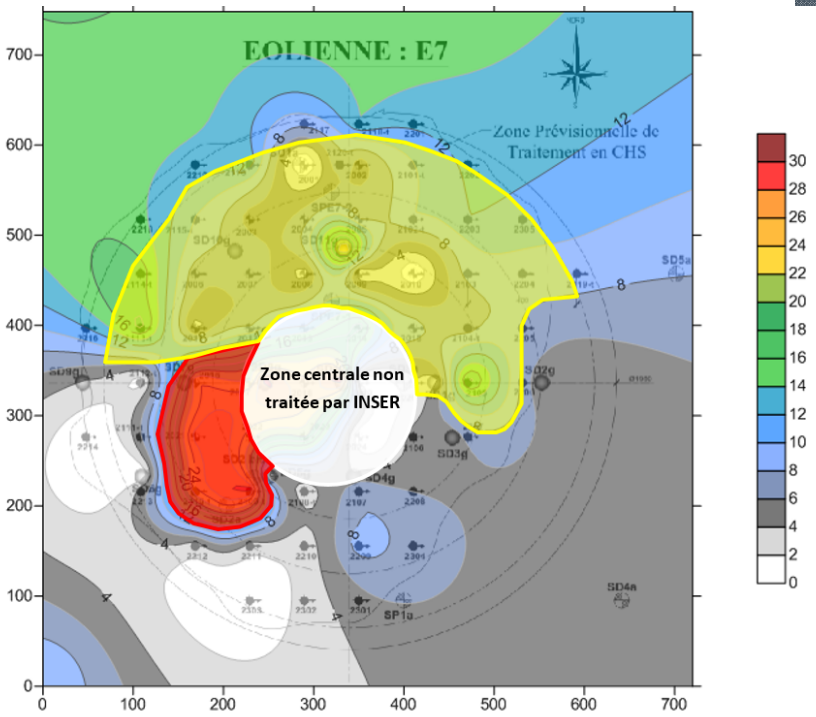
Epaisseur de la couche d'ancrage des INSER est de 4 m minimum à plus de 14 m.

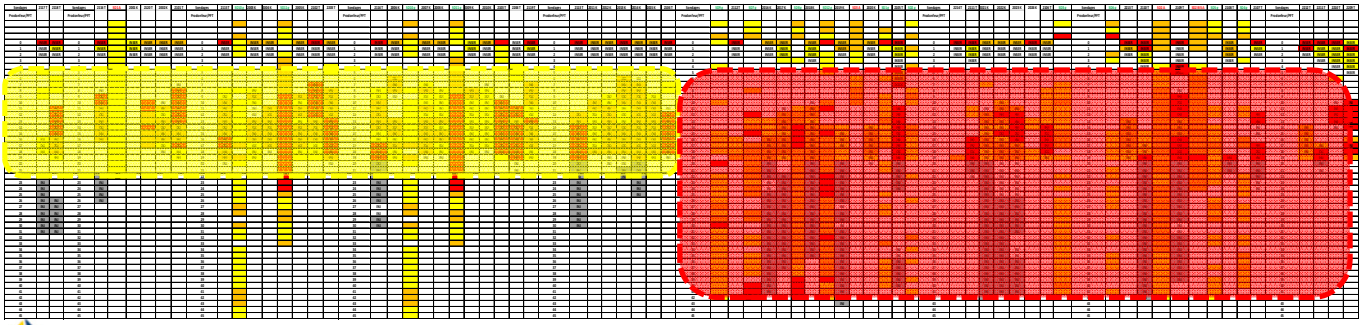
KELLER

Nouvelles synthèses géotechniques

3 zones d'anomalies:

- en rouge épaisseurs moyennes de l'ordre de 30 m,
- En jaune épaisseurs moyennes de l'ordre de 12 m,
- En gris/bleu épaisseur moyennes de l'ordre de 4 m.





Modélisation de l'éolienne

Performances à atteindre:

- Capacité portante du sol: 155 kPa aux ELS,
- Une raideur statique en rotation $K_{\phi,stat}$ > 5 000 MNm/rad
- Rotation < 3 mm/m.
- Une raideur dynamique en rotation Kϕ,dyn > 40 000 MNm/rad de manière à éviter la résonnance du système.

Modélisation de l'éolienne

Approche analytique

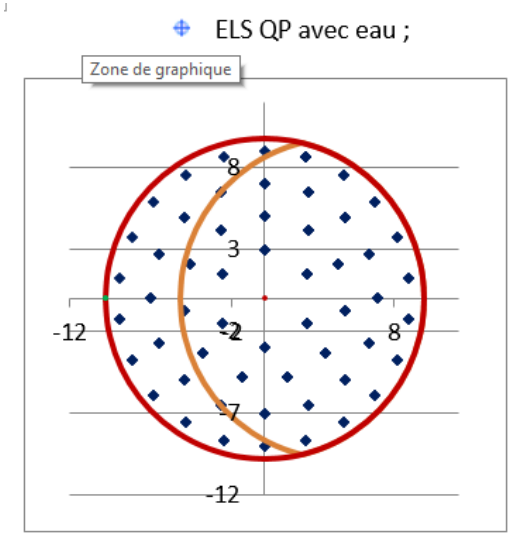
1) **Vérification de la portance** (domaine 2 dans notre cas)

2) **Déformée:** les calculs par l'intermédiaire du logiciel Foxta sont réalisés de la façon suivante :

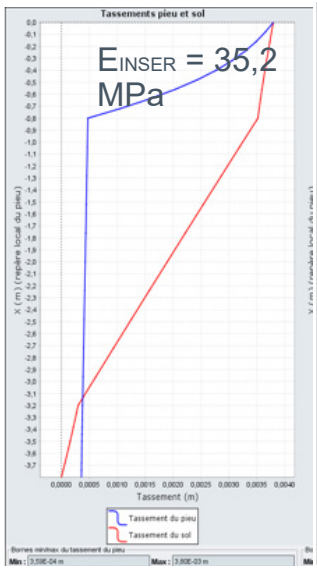
- Calcul des modules équivalents sous Taspie+ pour les couches traitées par IR et CHS ;
- Calcul des déformées sous Tasplaq à partir des modules équivalents déterminés sous Taspie+.

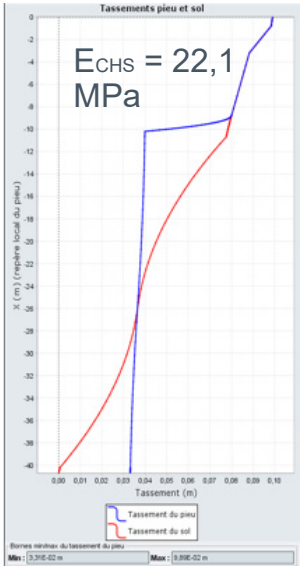
- 55 Inclusions INSER phi 340 mm sur quatre anneaux. La maille globale est de 5,5 m²,

- Colonnes de CHS maille de 4 m² dans les zones traitées diamètre 250 mm dans les couches molles en moyenne.



100 % de surface comprimée, 70% des IR mobilisées

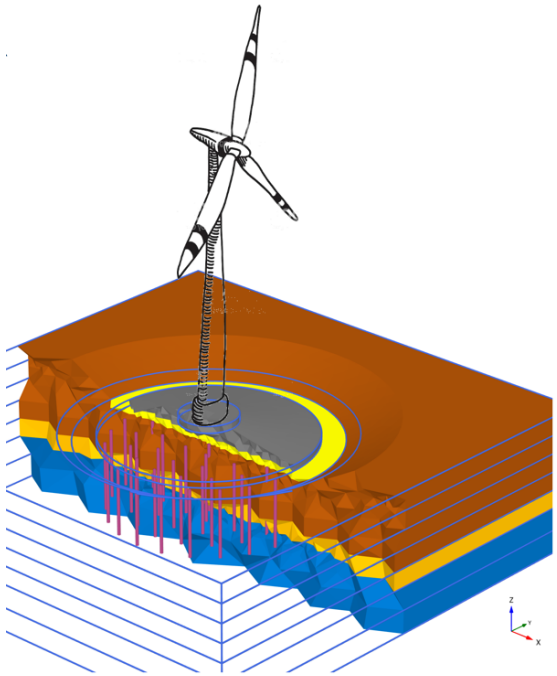




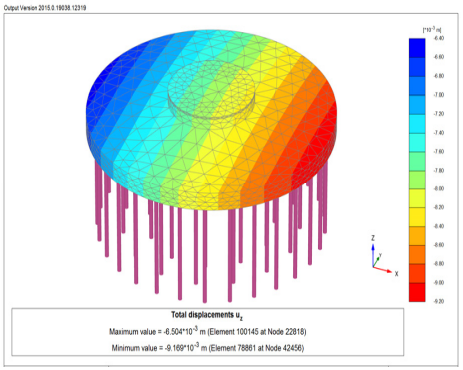
Modélisation de l'éolienne

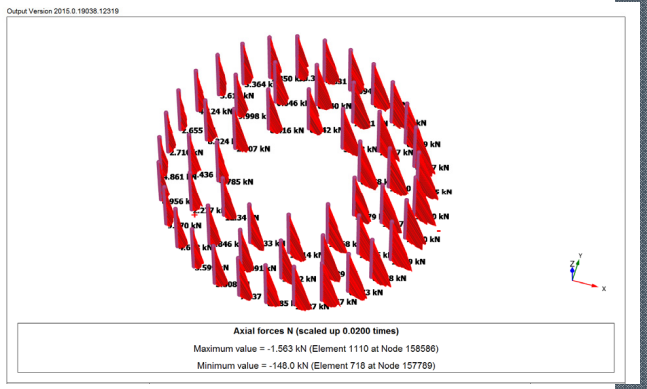
Approche sur Plaxis 3D

- Modèle de comportement HS small
- Inclusions INSER et les colonnes CHS ont été modèlisées par des « Embedded Beams »
- Aucune densification entre colonnes de CHS
- Cas de charges étudiées (ELS QP; ELS Rares;ELU Fond)



Raideur dynamique en rotation $K_{\phi\ dyn}$	Raideur statique en rotation $K_{\phi\ stat}$	Δs	Δs
[MN.m/rad]	[MN.m/rad]	[mm]	[mm/m]
72 000	150 000	25	1





Les contrôles

Délimitations de la zone d'anomalies

- 24 sondages destructifs avec enregistrement de paramètres jusqu'à 45 m
- 2 sondages pressiométriques jusqu'à 45 m

Travaux de CHS® et inclusions INSER®

- Enregistrements de paramètres,
- Ecrasements des éprouvettes béton
- 1 essai de chargement par éolienne sur INSER
- 3 essais d'impédance par éolienne sur INSER

Conclusion

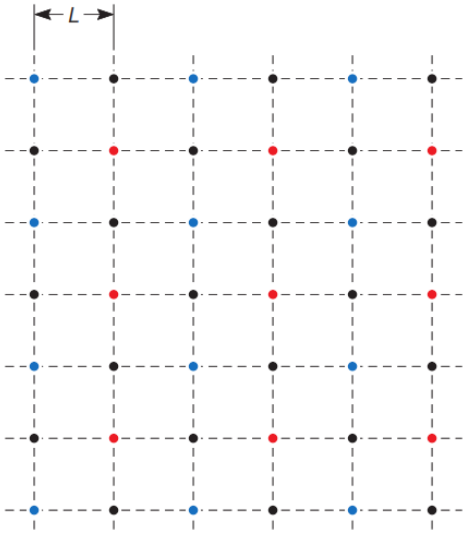
- Malgré un contexte géologique complexe, le renforcement de sol réalisé a été un succès,

- La principale difficulté a été de définir les zones à injecter à partir des enregistrements de paramètres:
    - Critères de vitesses différents à chaque changements de foreuses (étalonnage,
    - Interprétation subjective sans un étalonnage pour le vide et sans un sondage de type CPT ou PMT,
    - Délais d'interprètation incompatible avec le planning des travaux.

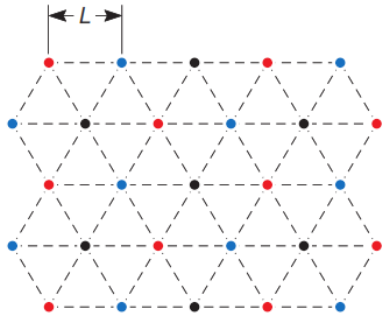
Conclusion

La procédure la mieux adaptée pour ce type de situation est la suivante:

- Une maille primaire lâche sur l'ensemble de la surface de 4 x 4 m,
- Une injection sur toute la hauteur du forage avec des passes de 1 m dans les zones sans anomalie et réduites à 0,50 m dès qu'une anomalie est rencontrée,
- Une maille secondaire voire tertiaire en intermaille dans les zones où une surconsommation est repérée.



Maille carrée



Maille triangulaire

- Forages Primaires
- Forages Secondaires
- Forages Tertiaires

L : distance finale entre forages

Cf. Améliorations et renfocement des sols L. Briançon P. Liausu, C. Plumelle, B. Simon)

Quelques photos

Forages de contrôle

Quelques photos

Travaux d’injection solide

Quelques photos

Travaux d’inclusions rigides