

# L'amélioration des sols par inclusions rigides Retours d'expérience depuis ASIRI

Le point de vue du bureau d'étude

Société Antea Group  
Eric ANTOINET et Maxime MARTHE



21 SEPT 2016

CFMS

# Sommaire de la présentation

## Partie 1 – Eléments généraux

- Exemples d'ouvrages géotechniques comportant fréquemment des améliorations de sols par inclusions rigides
- Un coup d'œil dans le rétroviseur (avant ASIRI)
- Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique
- Evolutions apportées par ASIRI pour la pratique de l'ingénierie géotechnique

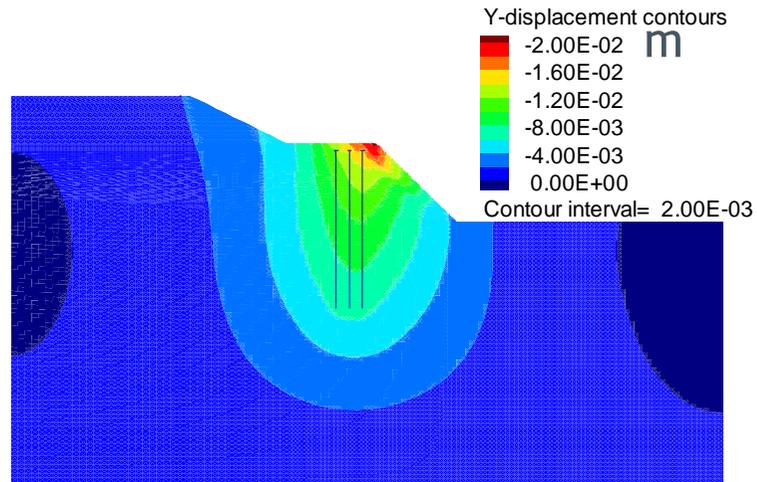
## Partie 2 : Exemple des fondations des éoliennes sur sol amélioré par inclusions rigides



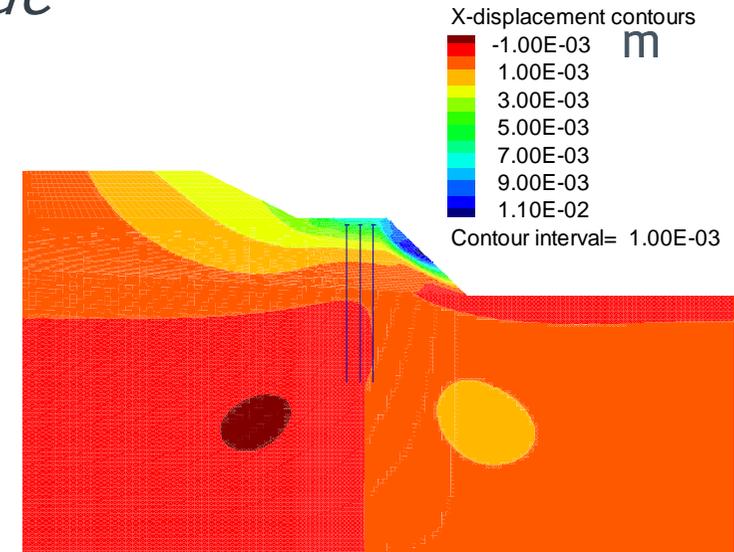
## Des inclusions rigides pour :

- fondations
  - bâtiments, hangars,
  - structures industrielles (STEP, centrales électriques, réservoirs...),
  - dallages,
- fondations des éoliennes terrestres,
- fondations d'ouvrages d'art et/ou de leurs blocs techniques,
- plateformes portuaires,
- remblais routiers/ferroviaires.

# Exemple d'un ouvrage d'art *culée fondée sur remblai technique*



Tassement estimé



Déplacement horizontal

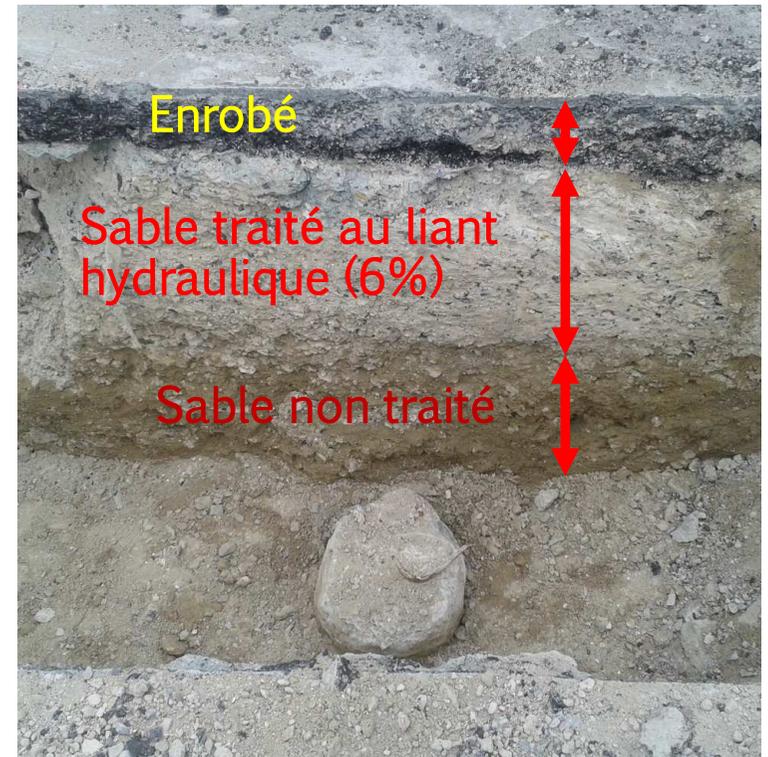


# Exemple d'une plate-forme portuaire



Réalisation d'inclusions pour une plate-forme portuaire

21 SEPT 2016



Dégarnissage dans le cadre d'une expertise

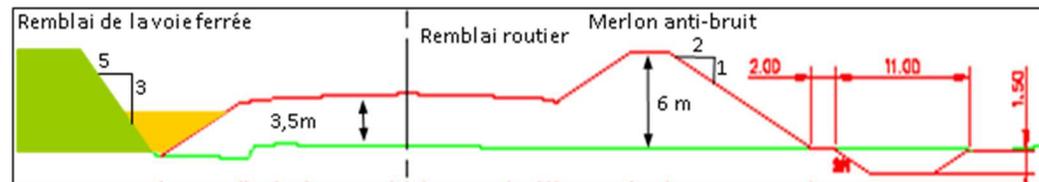
CFMS



# Comment faisons nous avant ASIRI ?

Exemple du remblai sur sol compressible de la Rocade nord-ouest de Tours (2003/2005)

- Le projet : remblai routier dans le fond d'une vallée (moyennement) compressible



- Référentiel technique
  - Publications, cahier des charges constructeurs...  
**amélioration des sols par inclusions rigides verticales  
application à l'édification de remblais sur sols médiocres**

O. COMBARIEU

Laboratoire régional des Ponts-et-Chaussées de Rouen \*

- puis « Etat des connaissances » L. Briançon et al (ASEP-GI 2004)

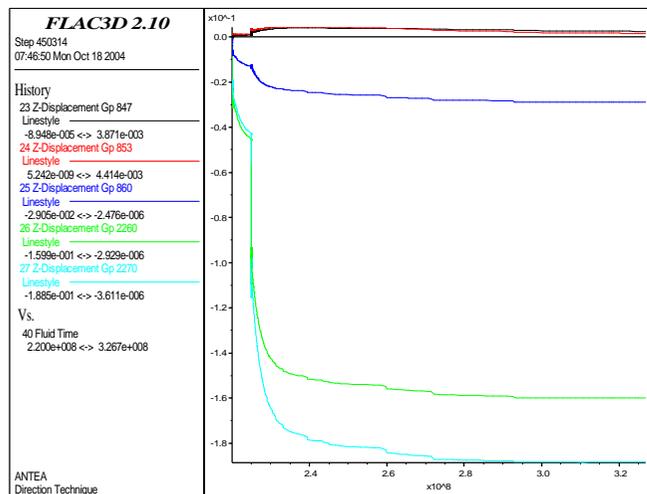


# Comment faisons nous avant ASIRI ?

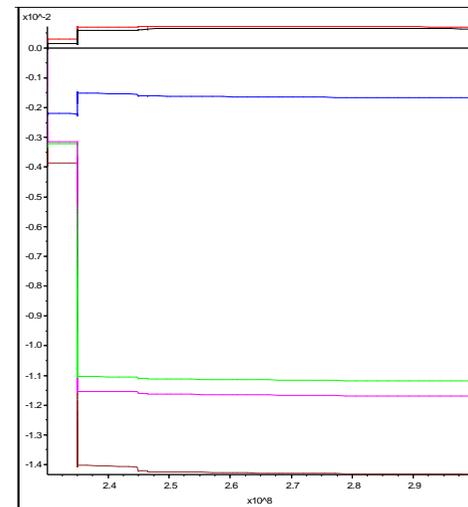
Résultats des calculs de tassement :

- modélisations numériques avec FLAC : 2 à 3 cm (avec dalles)
- méthode analytique d'O. Combarieu : 8 à 15 cm (sans dalle)

Difficulté à justifier les comportements et les déplacements (AMO, tiers experts...)



21 SEPT 2016



CFMS



# Comment faisons nous avant ASIRI ?

## Exemple de CCTP pour la réalisation d'inclusions rigides sous bâtiment (2005)

*« les travaux objets du présent appel d'offre portent sur la réalisation des travaux d'amélioration des sols par inclusions rigides qui permettront de conserver un mode de fondation « superficiel » de type semelle, radier ou dallage et de limiter les tassements absolus et différentiels sous les ouvrages. »*

*Les inclusions rigides seront positionnées sous les différents bâtiments listés précédemment (semelles isolées, radiers et dallages). Les inclusions rigides seront ancrées dans les Alluvions anciennes. Les inclusions sous les semelles ou radier soumis à des efforts horizontaux et/ou des moments de renversement seront armées (profilé métallique ou cage d'armature). Les autres inclusions soumises principalement à des efforts verticaux ne seront pas armées.*

*Un matelas de répartition sera mis en place entre la sous-face des radiers, dallages et structures de chaussées et la tête des inclusions rigides ».*



LE POINT DE VUE DU BUREAU D'ETUDE

# Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique (norme NF 94 500 – nov. 2013)

Phase d'étude	Mission Géotechnique	Utilisation ASIRI
Etudes géotechniques préalables	G1-ES	Très rare
	G1-PGC	Rare
Etudes géotechniques de conception	G2-AVP	Variable
	G2-PRO	Forte
	G2-DCE	Forte
Etudes géotechniques de réalisation	G3 (EXE/Suivi)	Forte <i>(BE entreprise)</i>
	G4 (VISA/DET)	Forte



# Les apports d'ASIRI pour le BE géotechnique

- un référentiel technique pour concevoir, dimensionner et contrôler les inclusions et le matelas de répartition,
- des recommandations générales de mise en œuvre,
- des considérations techniques pour comprendre et valider les modèles,
- des références au comportement réel d'ouvrages instrumentés (cf. ouvrages expérimentaux)



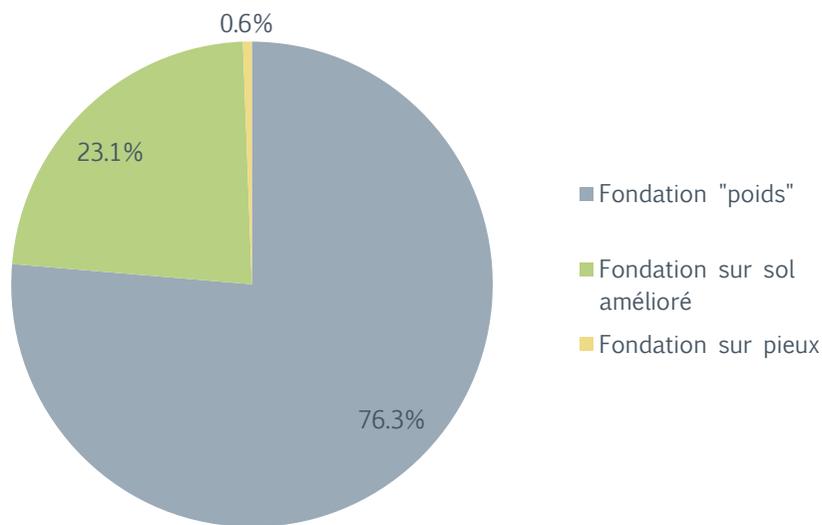
## Des compléments à ASIRI

- Des fiches de REX d'ouvrages réalisés (et instrumentés),
- La prise en compte des recommandations du Guide technique CMFS/AFPS « *Procédés d'amélioration et de renforcement de sols sous actions sismiques* »,
- L'adaptation aux nouvelles dénominations des missions d'ingénierie géotechnique,
- Un document simplifié pour une entrée plus rapide dans le document.

# Retour d'expérience dans l'éolien

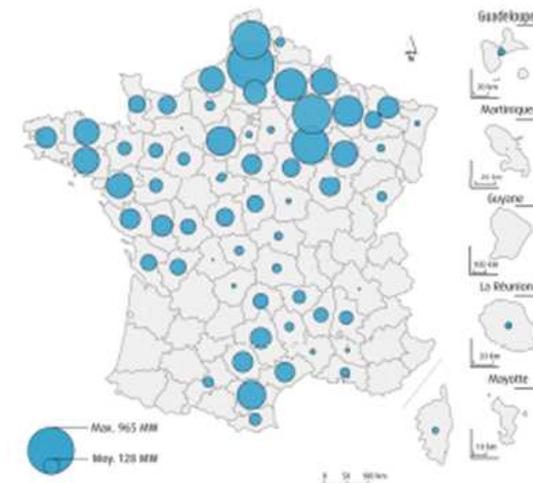
## Point sur l'activité éolienne

Modes de fondation - Statistiques  
Antea Group depuis 2013



\*Etude portant sur 511 éoliennes

Puissance éolienne totale raccordée par département au 31 mars 2016  
En MW



Champ : métropole et DOM.

Source : SOeS d'après ERDF, RTE, EDF-SEI, CRE et les principales ELD

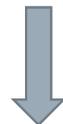
→ En France à ce jour, 10 500 MW raccordés, soit près de 5 000 éoliennes.

Cadence : ≈ 500 éoliennes installées par an

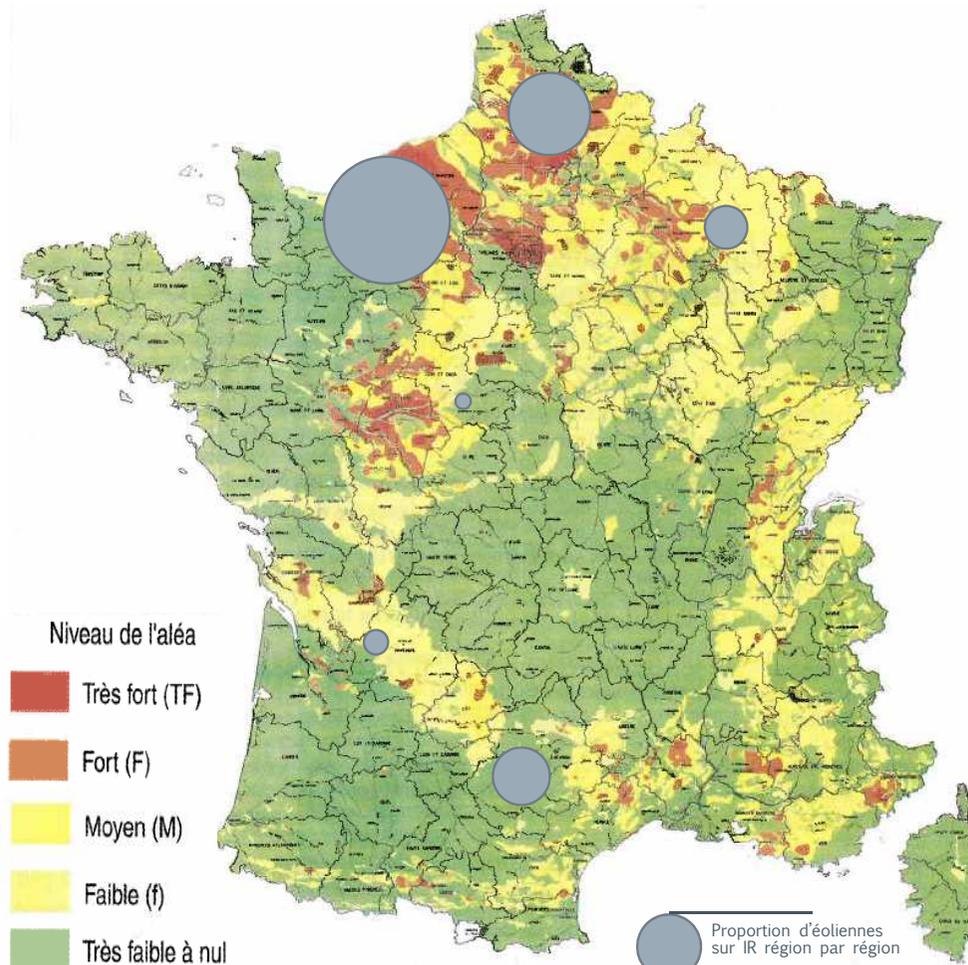
# Retour d'expérience dans l'éolien

## Point sur l'activité éolienne

Région	nb d'éoliennes	nb de fondations sur IR	Proportion d'éoliennes sur IR région par région	Sur 100 fondations sur IR, ratio région / France
Hauts de France	219	80	37%	68%
Grand-Est	144	18	13%	15%
Normandie	15	10	67%	8%
Nouvelle-Aquitaine	51	4	8%	3%
Occitanie	18	5	28%	4%
Centre Val de Loire	53	1	2%	1%
Bretagne	11	0	0%	0%
<b>Total</b>	<b>511</b>	<b>118</b>	<b>23%</b>	



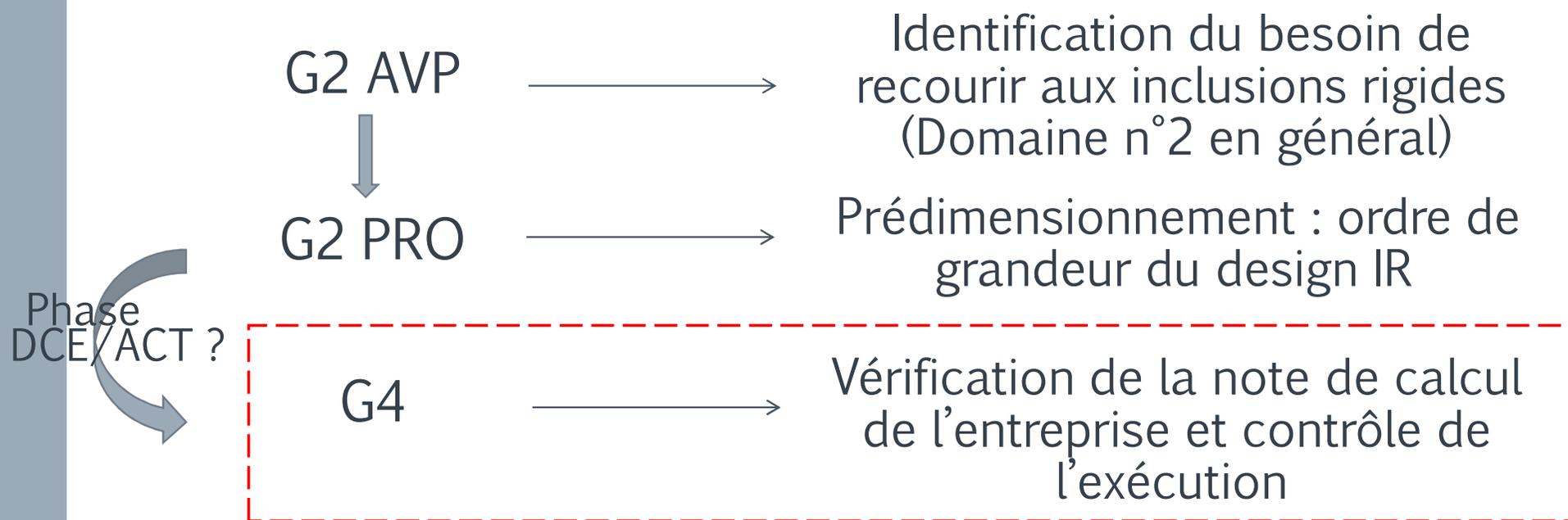
Relation entre l'aléa « cavité souterraine » et la propension des inclusions rigides ?





# Retour d'expérience dans l'éolien

## Les interventions du bureau d'étude géotechnique



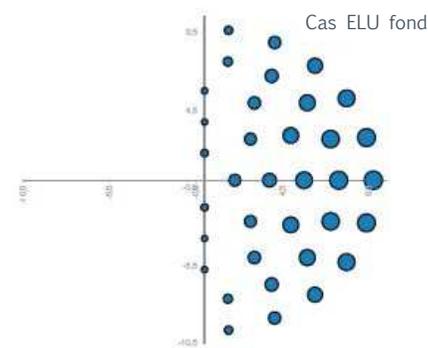
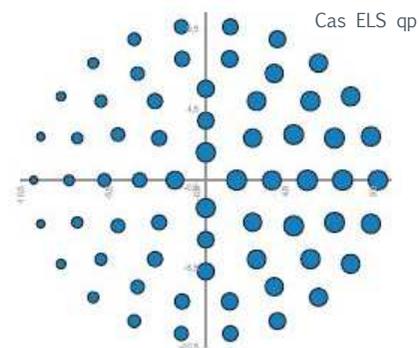
# Retour d'expérience dans l'éolien

## Le dimensionnement des inclusions rigides

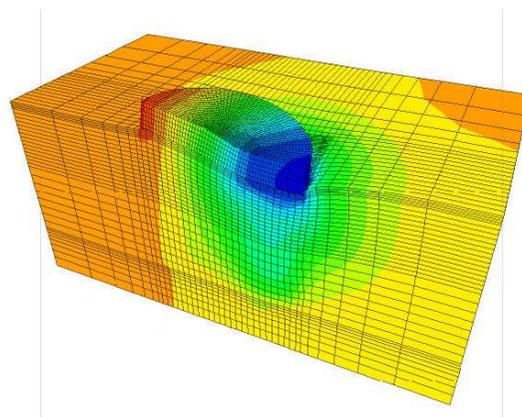
Problématique de l'éolien : Actions du vent (excentricité de la charge)

Bilan des contraintes à la sous-face de la fondation :

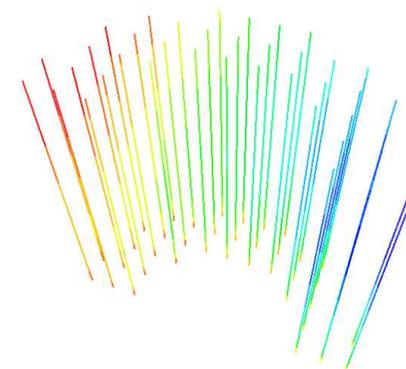
- Contraintes moyennes aux ELS : 50 à 100 kPa
  - Contraintes max à ELS<sub>rare</sub> : 200 à 450 kPa
  - Contraintes max aux ELU : 300 à 600 kPa
- } × 4 à 6  
} × 1,5



Source : Note de calcul MENARD



21 SEPT 2016



Source : Modélisations FLAC 3D Antea Group – Cas ELS rare  
Déplacements amplifiés x100



# Retour d'expérience dans l'éolien

## Le dimensionnement des inclusions rigides

Tendance  
2008 – 2009

Nombre d' IR :  
90 à 100 par  
fondation

Maille IR :  
1,5 à 2 m<sup>2</sup>

Fck béton :  
10-12 MPa



Tendance  
2010 – 2011

Nombre d' IR :  
70 à 80 par  
fondation

Maille IR :  
3 à 4 m<sup>2</sup>

Fck béton :  
12-16 MPa



Tendance  
2012 – 2013

Nombre d' IR :  
36 à 70 par  
fondation

Maille IR :  
4 à 8 m<sup>2</sup>

Fck béton :  
16-20 MPa



Tendance  
2014 – 2016

Nombre d' IR :  
60 à 80 par  
fondation

Maille IR :  
4 à 5 m<sup>2</sup>

Fck béton :  
16 MPa



# Retour d'expérience dans l'éolien

## Le dimensionnement des inclusions rigides

Effet ASIRI : Les contraintes maximales sont bornées :

→ ELU : contrainte max admissible :  $\text{Min}(f_{cd} ; 7 \text{ MPa})$

→ ELS : contrainte max admissible :  $\text{Min}(0.6 k_3 f^*ck ; 0.6 fck)$

### Double effet

Résistance structurelle de l'IR,  
Auparavant :  
 $f_c^*ELU = 1.5 \times \beta_c \times f_{ck28}$   
 $f_c^*ELS = \beta_c \times f_{c28}$

→ *Tentation de jouer sur la résistance du coulis pour réduire le nombre de colonnes*

Portance du sol amélioré:

$$\sigma_{adm} = \frac{(Q_{IR-ELS}) + (q_{SOL})_{ELS} \times (S_{Maille} - S_{IR})}{S_{Maille}}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{(Q_{IR-ELU}) + (q_{SOL})_{ELU} \times (S_{Maille} - S_{IR})}{S_{Maille}}$$

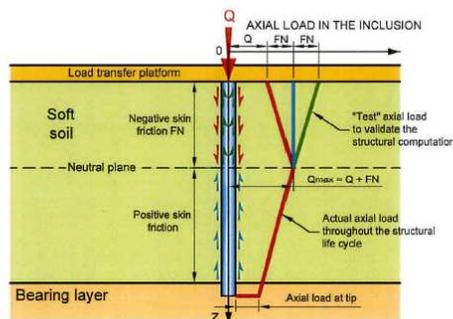
# Retour d'expérience dans l'éolien

## Autres apports ASIRI

Effet ASIRI : Apparition de calculs visant spécifiquement le dimensionnement du matelas de répartition.

Usage dans l'éolien :  $H_{\text{Matelas}} = 0,8 \text{ m}$

↳ Hauteur confortée par les recommandations ASIRI



<b>Service situation :</b>	Load at the inclusion head $Q$ Maximum load $Q_{\text{max}} = Q_{\text{ELS}} = (Q + FN)$
<b>Quality test:</b>	Inclusion solely serving to reduce settlement Test load $Q_{\text{ELS}} + FN = Q + 2FN$
<b>Load-bearing test :</b>	Inclusion solely serving to stabilize the structure (ULS) Test load : $\alpha_q \times Q + 2 \alpha_{FN} FN$ with $\alpha_q = 1.5$ et $\alpha_{FN} = 1.5$

Source ASIRI

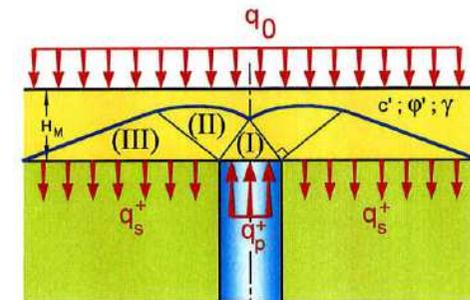


Diagramme de Prandtl : Source ASIRI

→ Clarification des modalités pour les essais de chargement

→ Un chapitre « contrôle » synthétique et clair dans ASIRI, facilitant la validation des PAQ entreprises



# Retour d'expérience dans l'éolien

## Conclusions

- Bonne application d'ASIRI, depuis 2014,
- Effet perceptible du plafonnement des contraintes maximales sur le dimensionnement des inclusions rigides,
- Un chapitre « contrôle » apprécié dans le cadre des missions G4 menées par le bureau d'étude géotechnique.

# Merci pour votre attention



21 SEPT 2016

CFMS