



Journées techniques GC' 2013

ESTP Cachan

Mardi 26 Mars 2013

La conception des éoliennes en Béton Fibré à Ultra-haute Performance

FX. Jammes, X.Cespedes, J.Resplendino

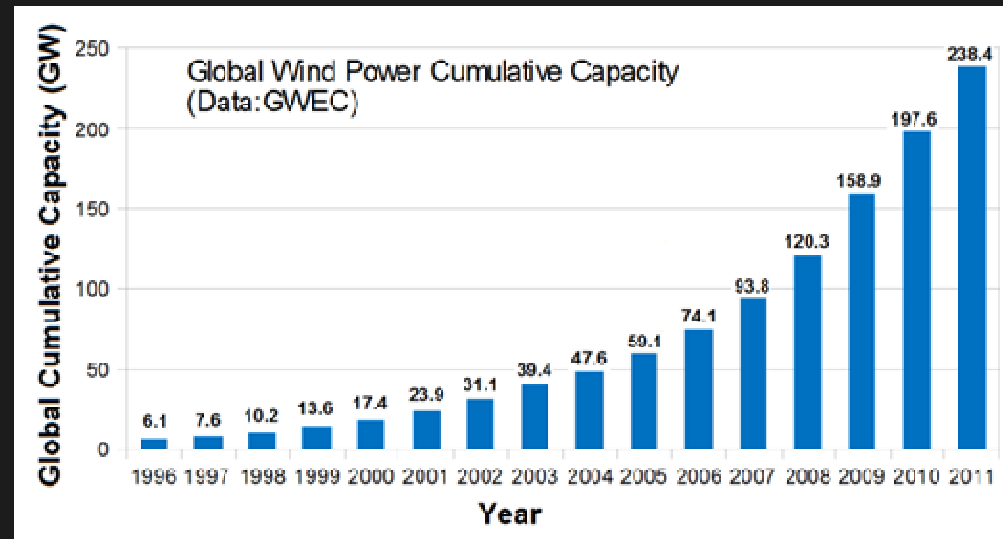


setec tpi

PYTHAGORE

Vue d'ensemble de l'énergie éolienne

- Evolution de la puissance éolienne mondiale installée: 240 GW fin 2011



- Compétitivité économique
 - Éoliennes *offshore* avec structures massives
 - Problème: conception délicate avec matériaux traditionnels
 - Le Béton Fibré à Ultra-haute Performance(UHPC) semble parfaitement adapté au challenge

Caractéristiques du BFUP

Durabilité

- Excellente adaptation du BFUP à son environnement (pénétration ion chlorure, abrasion, réaction alcali-silica, gel-dégel et résistance à l'écaillage)
 - Faible porosité expliquée par l'organisation compacte des C-S-H
 - Fort taux en Portlandite qui engendre un retard à la carbonatation
- Excellentes propriétés en terme de durabilité
- Doit être confirmé par des études supplémentaires

Caractéristiques du BFUP

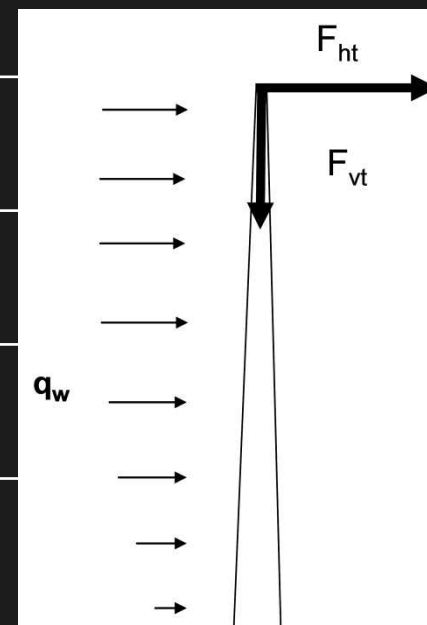
Fatigue

- Compression:
Excellent comportement jusqu'à la valeur de calcul de la résistance en compression du BFUP
 - Traction:
Problématique en fatigue seulement lorsque la contrainte excède 0,5 à 0,6 fois la valeur de calcul de la résistance en traction du BFUP
 - Bon comportement entre les joints entre deux sections préfabriquées
- ➔ Très bonne résistance à la fatigue lorsque le matériau réagit essentiellement en compression

Hypothèses

Cas de charges

Description des chargements	Valeurs
Masse volumique	$d_{UHPC} = 2500 \text{ kg/m}^3$
Poids de la nacelle et du rotor F_{vt}	4000 kN
Effort de poussée au niveau du rotor F_{ht}	1200 kN
Charge horizontale de vent le long du mât q_w	$1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C.B \text{ kN/ml}$



→ Valeurs validées par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) et Det Norske Veritas (DNV)

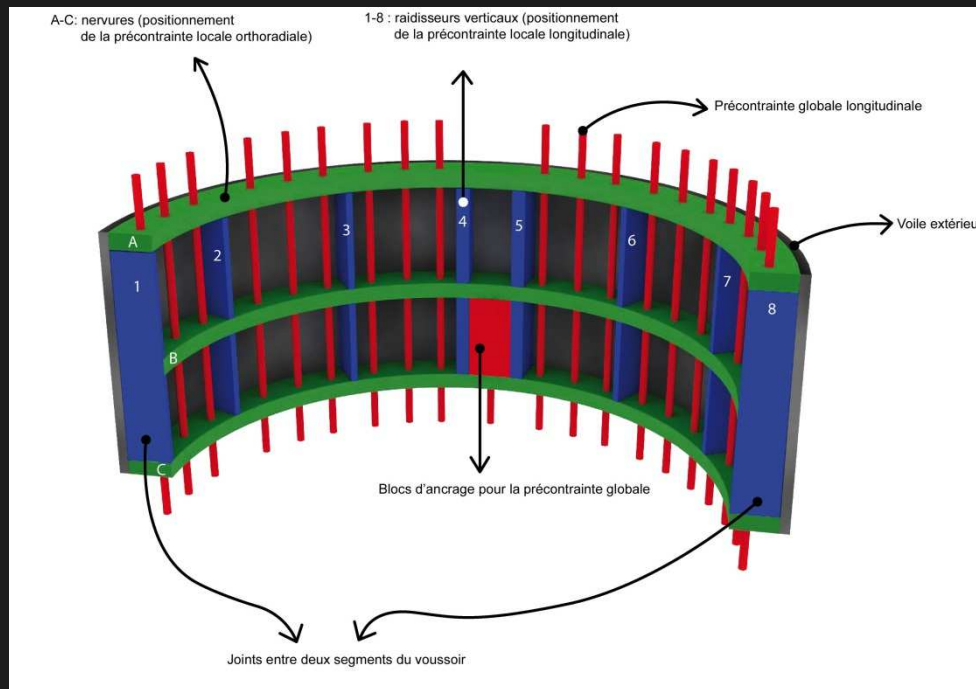
Hypothèses

Caractéristiques Physiques du BFUP

	Caractéristique du BFUP
Masse volumique	2500 kg/m ³
Contrainte admissible en compression	150 MPa
Contrainte de traction admissible en flexion	30 MPa
Contrainte admissible en traction	8 MPa
Module de Young	50 000 MPa
Coefficient de Poisson	0.2
Retrait	5,5 10 ⁻⁴ m/m
Coefficient de fluage	0.3
Coefficient d'expansion thermique	11.8 10 ⁻⁶ m/m/°C

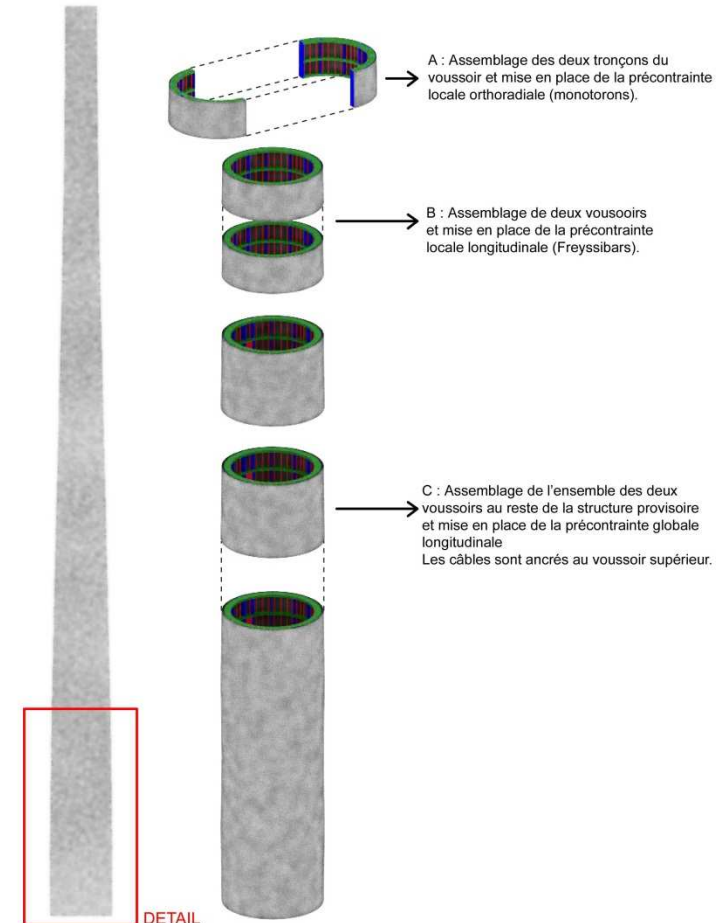
Hypothèses

Géométrie du mât



Mât d'éolienne

Détail du phasage de construction



Hypothèses

Géométrie du mât

- Défini par 5 paramètres

$$h = 120 \text{ m}$$

$$t_{w,\text{bottom}} = 0.12 \text{ m}$$

$$t_{w,\text{top}} = 0.06 \text{ m}$$

$$r_{o,\text{bottom}} = 4 \text{ m}$$

$$r_{o,\text{top}} = 2 \text{ m}$$

} Évolution linéaire des caractéristiques de bas en haut

- Composé de 40 segments (soit 2x40 voussoirs) de 3 m de haut reliés entre eux par:
 - Câbles de précontrainte globale longitudinale sur toute la hauteur du mât
 - Précontrainte locale longitudinale et orthoradiale au niveau des éléments

→ 3 types de précontrainte

Modélisation

Modèle Global (Poutre)

- Vérification globale de la structure
- Dimensionnement de la précontrainte longitudinale globale
- ELS: non décompression des sections
- ELU: équilibre des sections par compression uniquement

Modèle Local (Coque)

- Vérification locale d'un voussoir type (avec nervures, renforts et ancrages)
- Dimensionnement des précontraintes locales (orthoradiales et longitudinales)

→ 2 modèles complémentaires

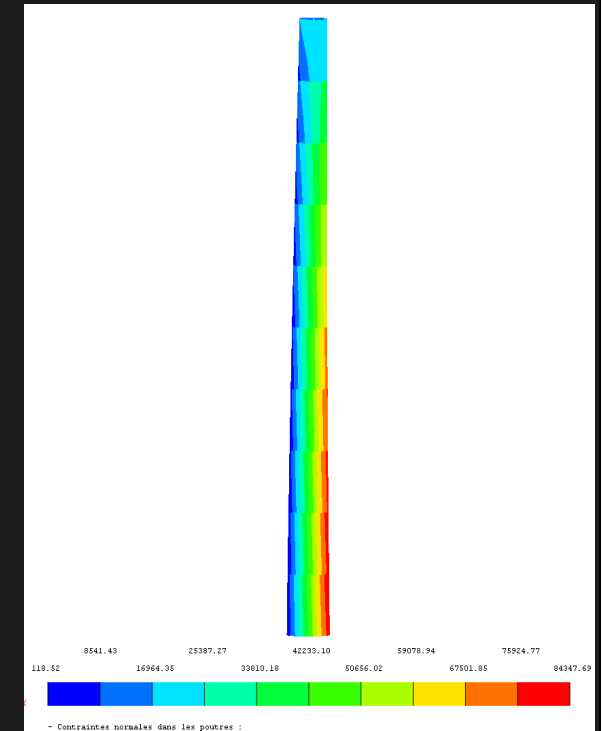
Modèle global

Caractéristiques du modèle

- Mât: modélisé par une poutre en console
- Force de précontrainte globale : Force extérieure centrée dont la valeur augmente linéairement selon la hauteur

Combinaison ELS

- Force de précontrainte F_p calculée pour éviter les décompressions à l'ELS
→ $F_p = 155\text{MN}$ i.e. 50 cables 13T15S en partie inférieure
- La contrainte normale demeure entre 0.3 MPa et 82 MPa ($<90\text{MPa}$).



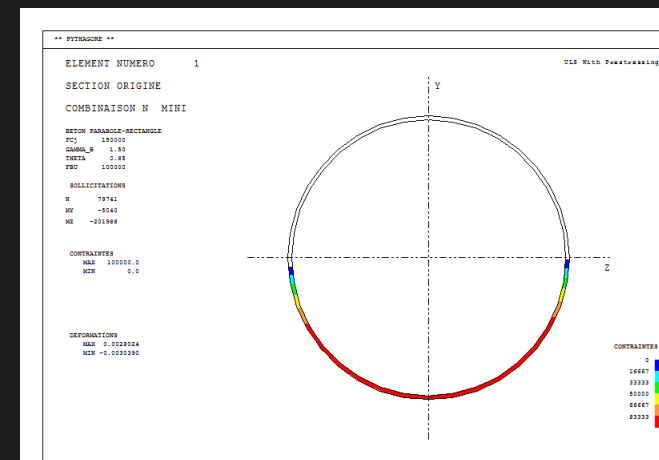
σ_{ELS} avec précontrainte

Modèle global

Combinaison ELU

- Le matériau n'a aucune résistance en traction à cause des joints entre voussoirs
→ Les sections équilibrent les charges extérieures par compression exclusivement

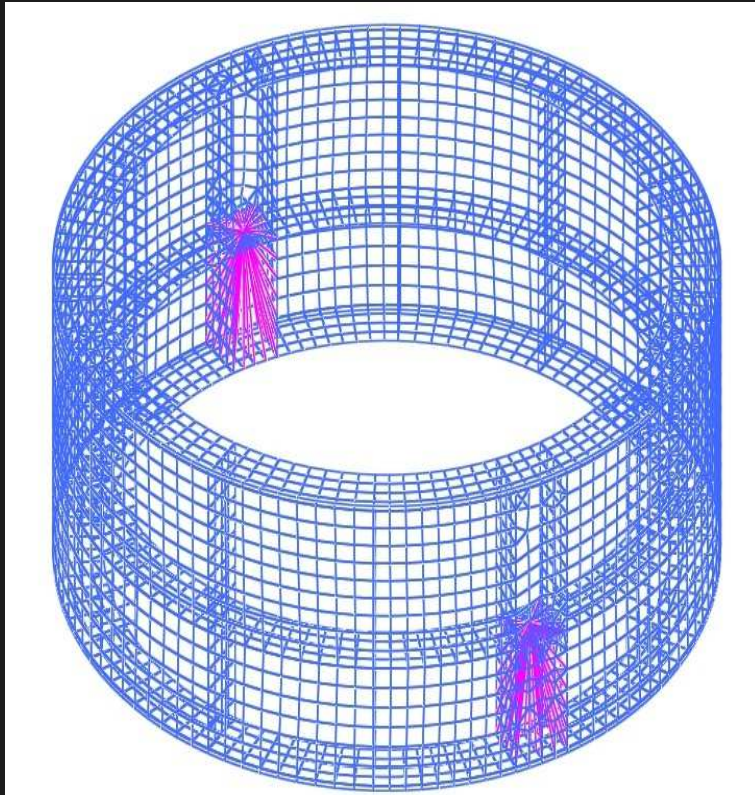
Loi constitutive du matériau prise conformément aux recommandations de l'AFGC (Loi Parabole-Rectangle)



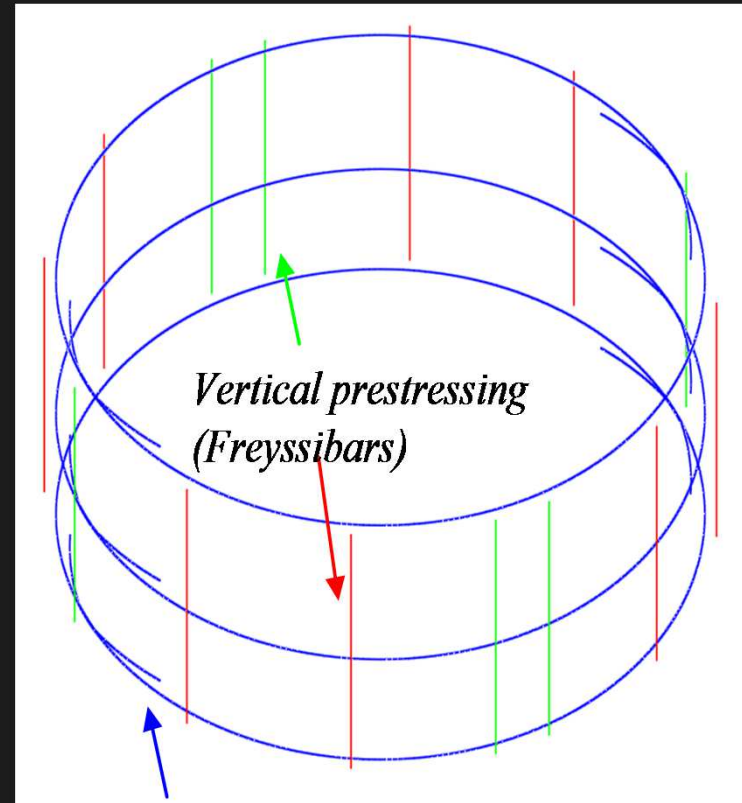
σ_{ELU} dans une section particulière

Modèle local

Caractéristiques du modèle EF



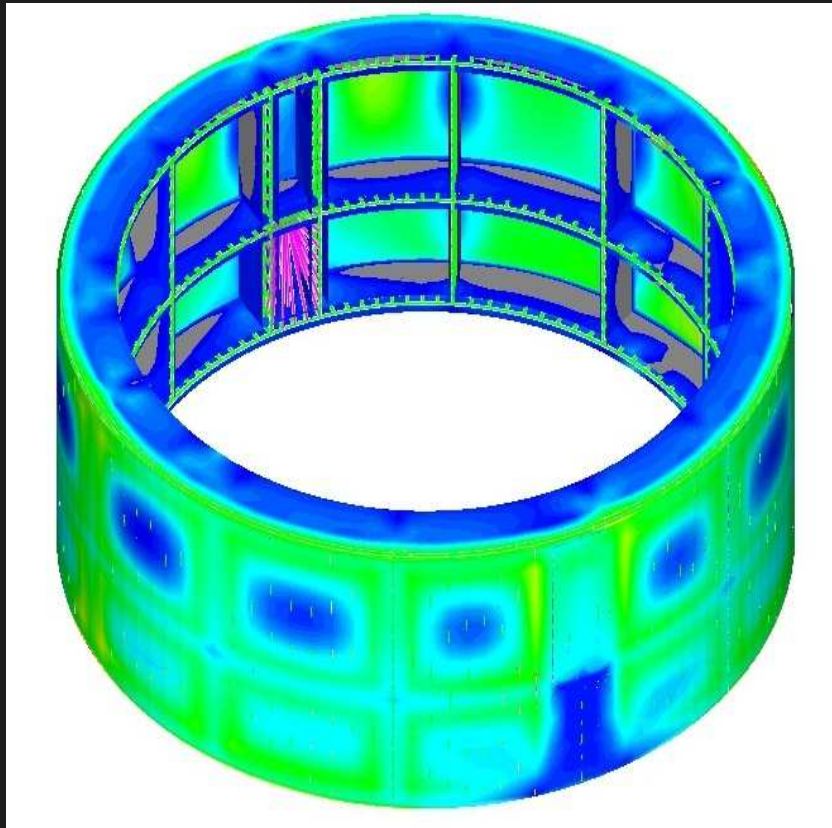
Géométrie d'un voussoir



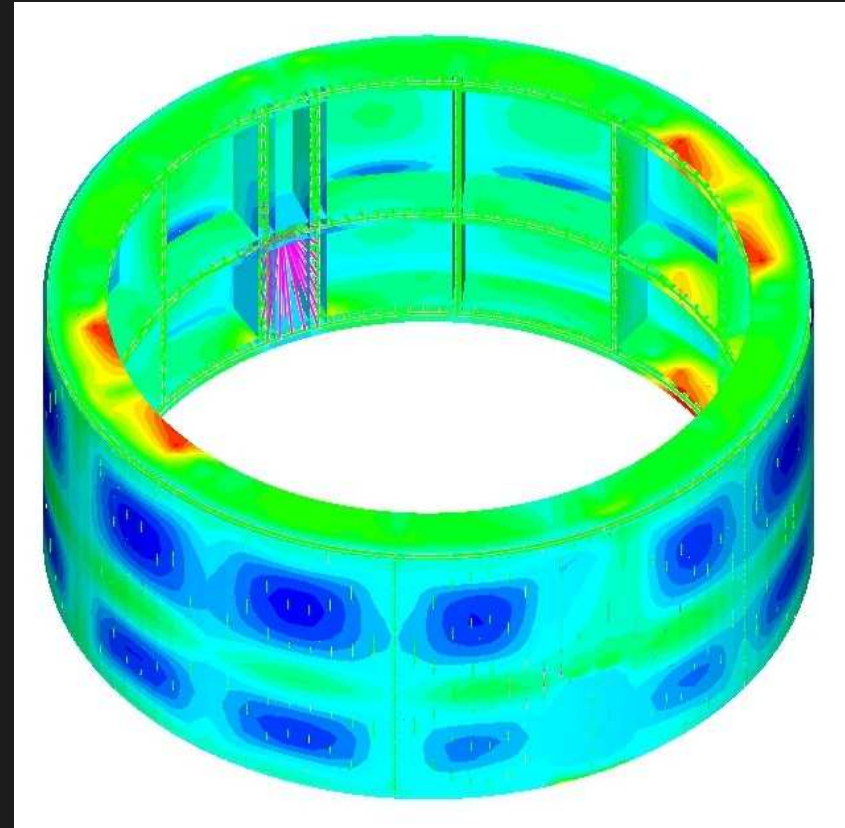
Disposition de la précontrainte locale

Modèle local

Phase de construction



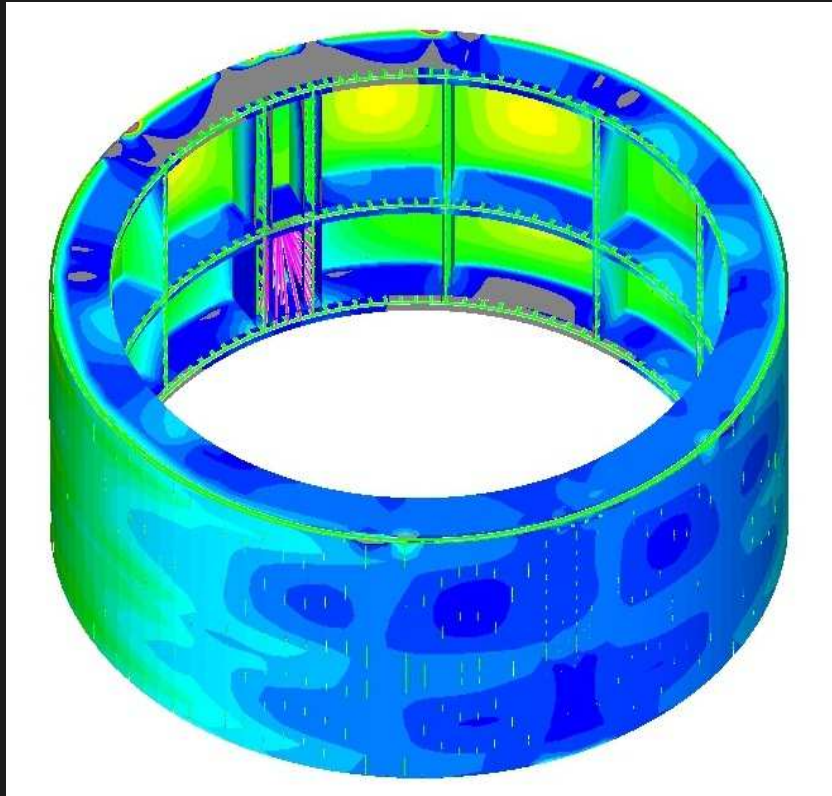
σ_{xx} en phase de construction



σ_{yy} en phase de construction

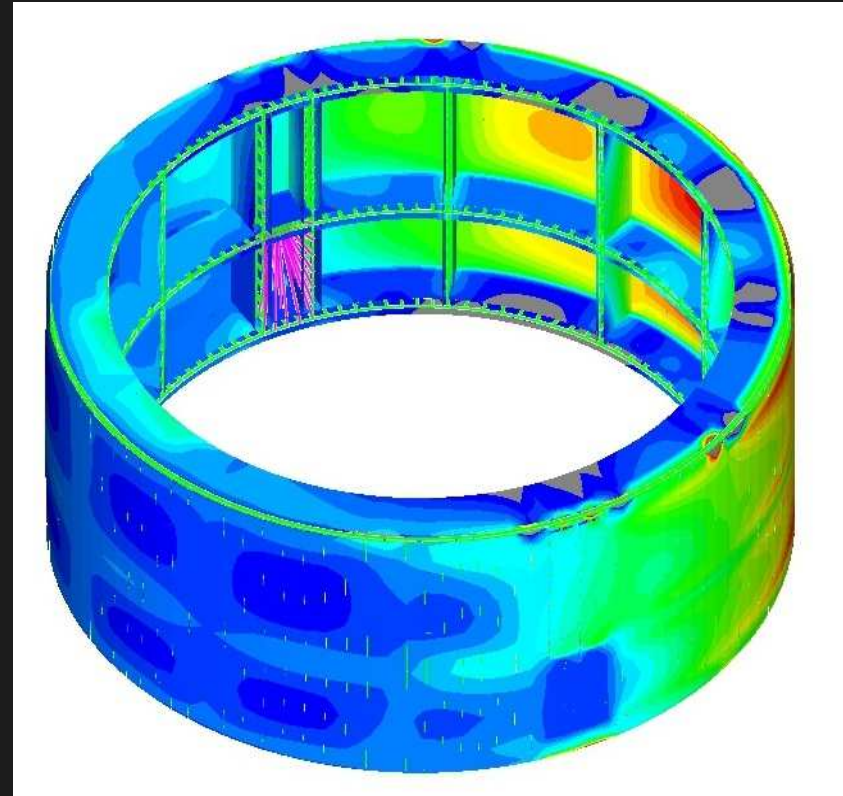
Modèle local

Phase finale (ELS et ELU)



σ_{xx} en phase finale

(Combinaison ELU- configuration 1)



σ_{xx} en phase finale

(Combinaison ELU- configuration 2)

Récapitulatif de la précontrainte

Dénomination de la précontrainte	Caractéristiques de la précontrainte
Précontrainte longitudinale globale	-de 50 câbles 13T15S en bas à 10 câbles 13T15S au sommet avec une répartition linéaire -2 ancrages par segment
Précontrainte longitudinale locale	-1 Freyssibar pour chaque renforcement vertical et pour chaque renfort d'ancrage (Freyssibars Φ 40 and Φ 26.5) -2 ancrages locaux par renforcement
Précontrainte orthoradial locale	-Monotorons gainées graissés pour chaque nervure (2x10 Monotorons T15S per rib for the lower final segment i.e. 60 T15S per section) -4 ancrages locaux par nervures

Récapitulatif du projet

Auteur à contacter

François-Xavier Jammes, Setec tpi
jammes@tpi.setec.fr

Récompenses

Mention d'honneur au concours Européen d'excellence des jeunes professionnels de l'EFCA (European Federation of Engineering Consultancy Associations), 2012

Conférences

Conférence SSCS, Aix-en-Provence, France, 29 Mai – 1er Juin 2012

18ème Congrès IABSE, Séoul, Corée, 19-21 Septembre 2012

Publications

Design of wind turbines with Ultra-High Performance Concrete, FX. Jammes and FJ. Ulm, MIT Thesis, Massachusetts Institute of Technology

L'avenir des éoliennes offshore passe par le Béton Fibré à Ultra-Haute Performance, FX. Jammes, L. Tosini, X. Cespedes, J. Resplendino, Revue Travaux, Mars 2012