

LA CONCEPTION DES ÉOLIENNES EN BFUP

François-Xavier JAMMES, Xavier CESPEDES, Jacques RESPLENDINO

Setec tpi
42, 52 quai de la Râpée
75583 Paris Cedex 12, France



Source : Siemens AG, Siemens Press Picture

1. INTRODUCTION

Avec une puissance installée estimée à 240GW au niveau mondial fin 2011 (cf Figure 1), l'énergie éolienne poursuit désormais son développement sous la forme de fermes en haute mer composées de méga éoliennes (h>100m ; cf Figure 2). Ces dernières permettent de tirer parti des meilleures conditions climatiques disponibles. Cela néces-

site des structures massives soumises à des charges importantes dans des environnements complexes, ce qui rend la conception d'autant plus délicate lorsque l'on a recours à des matériaux traditionnels comme l'acier ou le béton armé. L'utilisation d'un Béton Fibré à Ultra Haute Performance (BFUP) pour la construction du mât, présentant des propriétés prometteuses en terme de fatigue et de corrosion, pourrait permettre une avancée majeure.

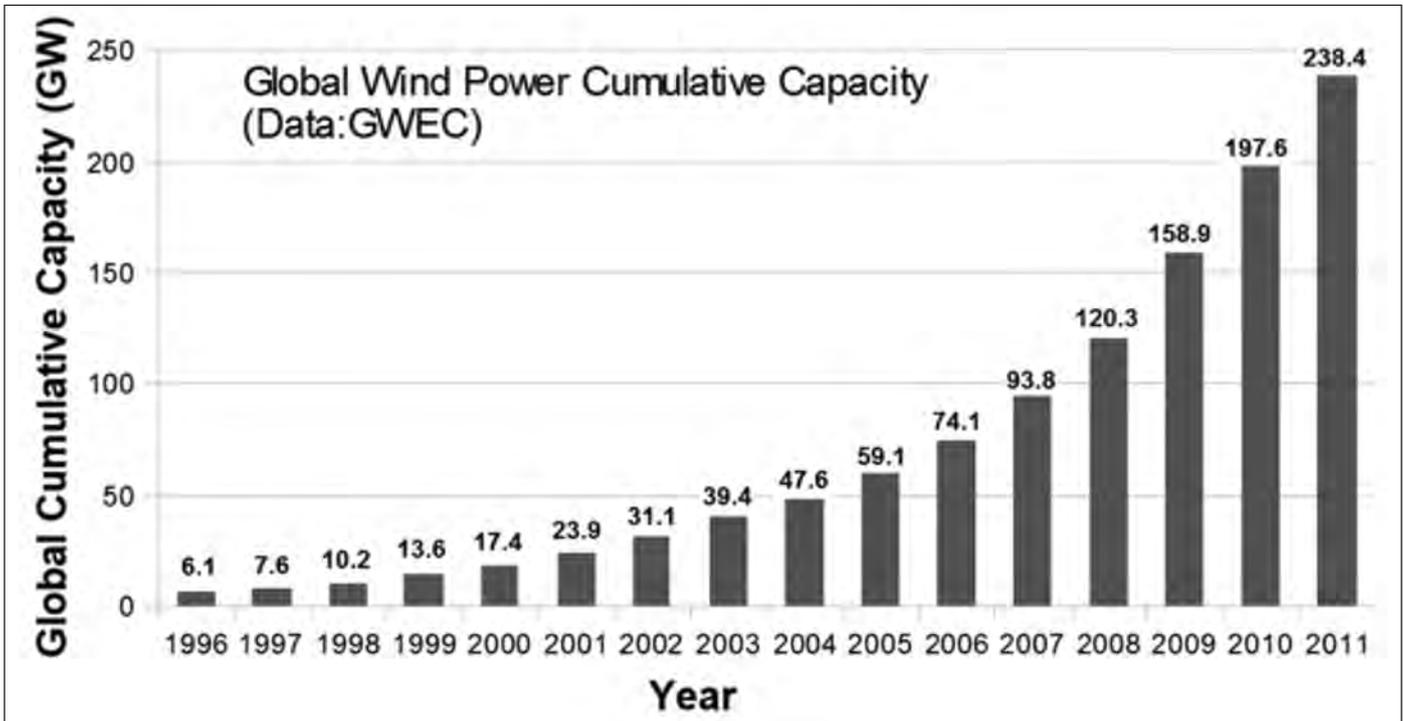


Figure 1 : Evolution de la puissance éolienne mondiale installée (source : Global Wind Energy Council)

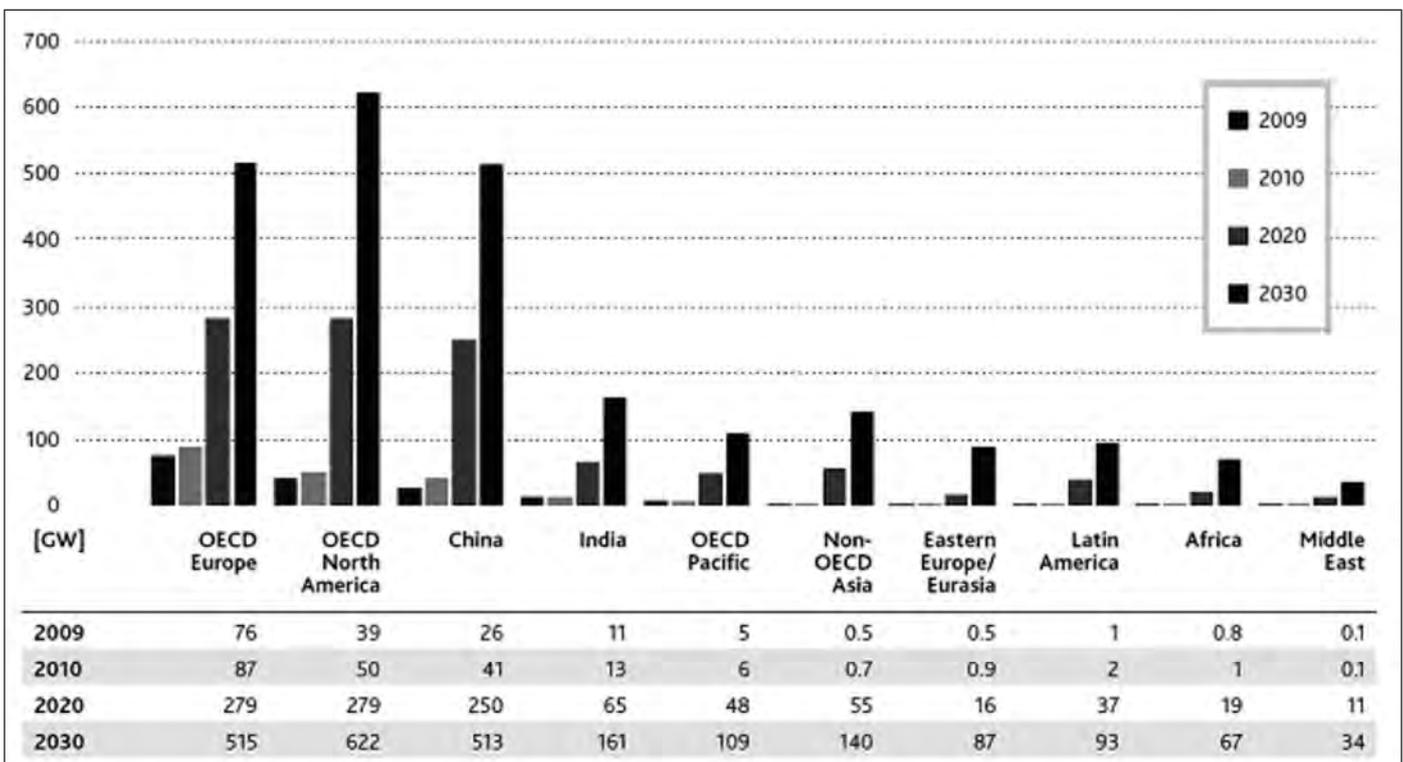


Figure 2 : Prévisions de développement de la puissance éolienne mondiale (source : Global Wind Energy Council)

2. LES AVANTAGES DU BFUP DANS LA CONCEPTION DE MÂTS D'ÉOLIENNES

L'environnement complexe en haute mer permet d'avoir un meilleur rendement énergétique mais implique des contraintes importantes en terme d'installation, de maintenance ainsi que des sollicitations intenses et répétées sur les mâts d'éoliennes. Une structure résistante à des efforts cycliques, dans des conditions extrêmes, aurait un avantage indéniable sur les structures actuelles en métal ou en béton armé soumises à la corrosion ou à la dégradation rapide.

2.1. Fatigue

Le comportement à la fatigue de structures en BFUP a fait l'objet d'études depuis de nombreuses années. Des recherches décisives sont toujours en cours, et quelques conclusions essentielles peuvent être tirées. En compression, le BFUP a un comportement à la fatigue considéré excellent jusqu'à la contrainte admissible. En traction, les anomalies dues à la fatigue apparaissent lorsque la contrainte atteint 0,5 à 0,6 fois la contrainte admissible. Enfin, au niveau des joints entre deux éléments préfabriqués, le BFUP se comporte de manière adéquate à condition que les coffrages soient parfaitement réalisés. Une structure en BFUP qui respecte les trois critères ci-dessus aura un meilleur comportement à la fatigue qu'une structure réalisée en matériaux traditionnels. Sa durée de vie sera donc augmentée.

2.2. Durabilité

Les agressions de l'environnement naturel sur les matériaux jouent sur la durabilité de la structure. Le BFUP présente des propriétés intéressantes dans des environnements hostiles similaires aux conditions au large des côtes. Des études ont été menées sur la pénétration de l'ion chlorure, l'abrasion, la réaction alcali silice ou le phénomène de gel-dégel. Toutes révèlent la grande adaptation du matériau à un environnement agressif. Certaines montrent même que le BFUP a la capacité d'accroître ses propriétés en milieu défavorable. De surcroît, le BFUP est un matériau en partie hydraté. Soumis à un environnement marin, son hydratation augmente, diminuant ainsi sa porosité. Or, cette dernière est déjà faible, du fait d'une matrice cimentaire ultra dense. Enfin, le haut taux en portlandite du BFUP retarde la carbonatation du matériau qui est la source de sa dégradation dans le temps. Ainsi, en remplaçant l'acier ou le béton conventionnel par le BFUP, une partie des pathologies dues à la corrosion de l'acier ou à la dégradation du béton serait résolue et la durabilité des structures en mer prolongée.

Le travail présenté ici est une étude de faisabilité dans le cas d'un mât d'éolienne terrestre qui ne traite pas l'ensemble des problèmes rencontrés pour les éoliennes en haute mer. De nouvelles études techniques seraient nécessaires pour étudier, par exemple, les effets du vent turbulent ou de la houle.

3. PROPOSITION DE CONCEPTION D'UN MÂT D'ÉOLIENNE EN BFUP

3.1. Description de l'étude

Les caractéristiques du BFUP utilisées dans cette étude sont récapitulées dans le Tableau 1 et correspondent à des valeurs courantes pour ce type de matériau.

	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

Tableau 1 : Caractéristiques du BFUP

La géométrie du mât d'éolienne a été choisie pour être comparable aux plus puissantes éoliennes actuelles en acier. La forme est délibérément simple et seuls cinq paramètres définissent la géométrie de la structure dans son ensemble.

hauteur du mât d'éolienne	$h = 120 \text{ m}$
épaisseur à la base	$t_{w,base} = 0.12 \text{ m}$
épaisseur en tête	$t_{w,tête} = 0.06 \text{ m}$
rayon à la base	$r_{0,base} = 4 \text{ m}$
rayon en tête	$r_{0,tête} = 2 \text{ m}$

Tableau 2 : Caractéristiques géométriques du mât

La structure est composée de 40 voussoirs de 3 m de haut, assemblés par des câbles non adhérents précontraints par post-tension. Pour des raisons constructives, chaque voussoir est lui-même composé de deux segments précontraints à la fois longitudinalement et de manière orthoradiale (cf. Figure 7 et Figure 13).

Bien que le modèle de chargement utilisé soit sommaire, il a été choisi de manière conservatrice pour permettre un dimensionnement correct de la structure. Il ne prend pas en compte les effets du vent turbulent ni les sollicitations de houle. La modélisation de ces phénomènes nécessite des études plus poussées. Néanmoins, les valeurs du Tableau 3 ont été validées par des experts du Laboratoire des Énergies Renouvelables du Département de l'Énergie des États-Unis (NREL) et permettent de décrire, sommairement, les sollicitations que subissent les mâts d'éoliennes. Les

valeurs de ce tableau définissent la combinaison à l'état limite de service (ELS). La combinaison à l'état limite ultime (ELU) est obtenue en multipliant les charges permanentes par 1.35 et les autres charges par 1.5.

3.2. Analyse globale

Un modèle de calcul global est réalisé pour dimensionner la précontrainte longitudinale globale. Le mât est encasté à la base et la précontrainte est prise en compte comme une force centrée. La précontrainte est dimensionnée de manière à garantir la compression de toutes les sections pour le scénario ELS. Après prise en compte des pertes instantanées et différées, la force de précontrainte maximum nécessaire est $F_p=155$ MN et peut être obtenue avec 50 câbles 13T15S. Les contraintes normales obtenues pour le scénario ELS sont représentées

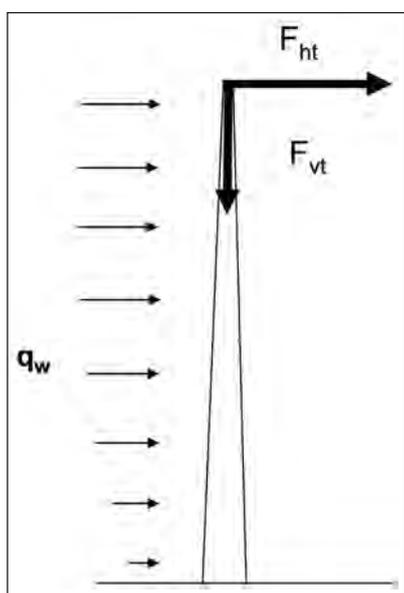


Figure 3 : Géométrie du mât

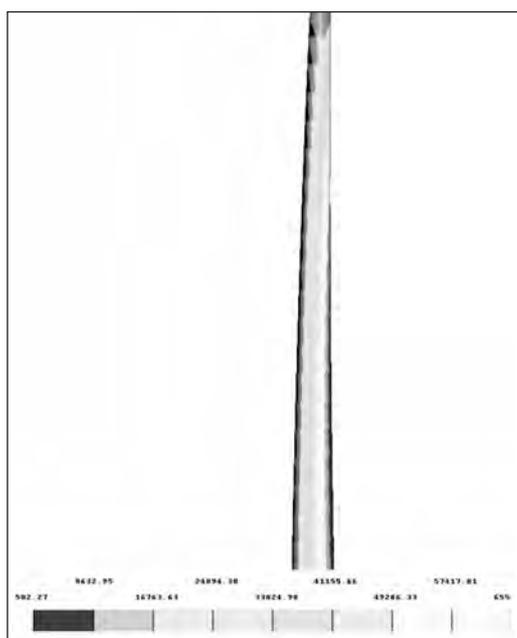


Figure 4 : Contraintes normales ELS

Figure 4 et sont comprises entre 0.3 MPa et 82 MPa. Or, la contrainte admissible de compression du BFUP, avec les valeurs du Tableau 1 est égale à 98 MPa. À l'ELU une analyse a été conduite au niveau des joints entre voussoirs. Aucune traction n'est permise entre les voussoirs et le comportement en compression est caractérisé par une loi conventionnelle pour le BFUP, conforme aux recommandations de l'AFGC. Cette loi prévoit un comportement élastique linéaire jusqu'au palier plastique de 98 MPa. La vérification sur chaque section est satisfaite et un exemple de répartition de contrainte normale est fourni Figure 5.

3.3. Analyse d'un voussoir

Un modèle local d'un voussoir a été réalisé pour en étudier sa précontrainte. Ce modèle est composé d'éléments de

Description des chargements	Valeurs
Masse volumique	$d_{UHP} = 2500 \text{ kg/m}^3$
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	$1/2 \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C.B \text{ kN/ml}$
$V = 1.5 \times \overline{V_{50}(h)}$; $\overline{V_{50}(h)} = \overline{V_{50}(10)} \ln(h/h_0) / \ln(10/h_0)$; $h_0 = 0.05 \text{ m}$; $\overline{V_{50}(10)} = 26 \text{ m/s}$	

Tableau 3 : Valeurs de chargement conformes au NREL

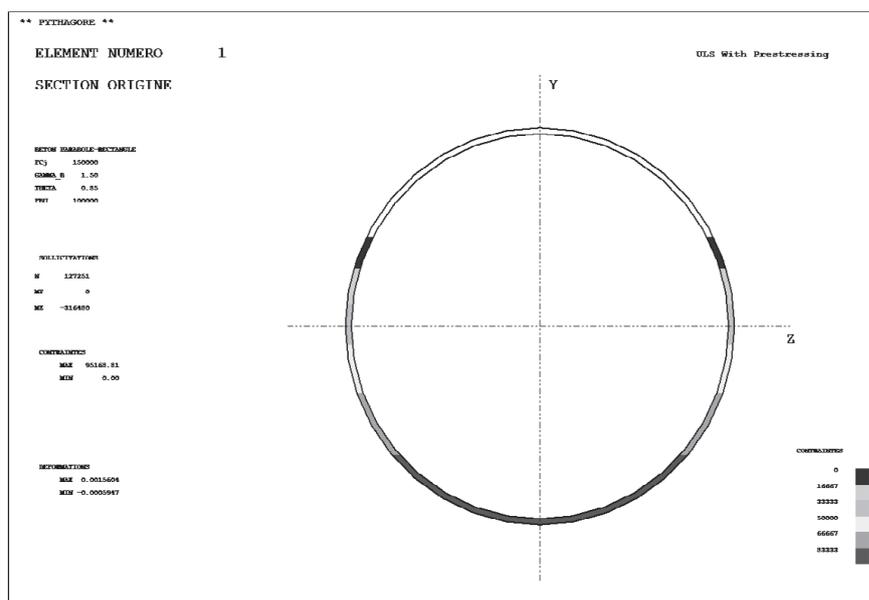


Figure 5 : Contraintes normales ELU dans une section

Note: les contraintes sont données en kPa. Les conventions sont celles utilisées en Génie Civil: les compressions sont positives.

coques et prend en compte les nervures verticales et horizontales mesurant 20 cm d'épaisseur pour 50 cm de profondeur. Celles-ci permettent de renforcer le voussoir et sont utilisées pour la mise en place de la précontrainte locale. Les ancrages de la précontrainte globale sont modélisés en groupant plusieurs éléments de coques dans une zone rigide gouvernée par un noeud maître. La géométrie et le maillage du modèle sont représentés Figure 6 (on repère les deux zones rigides autour des ancrages). La précontrainte locale est décrite Figure 7. Cette dernière est composée de barres verticales de type Freyssibar et de monotorons horizontaux pour lier les segments du voussoir entre eux. Plusieurs analyses sont effectuées sur le modèle local. La première concerne la phase de mise en place du voussoir en tête de la structure provisoire. La précontrainte locale est mise en tension ainsi que la précontrainte globale à travers les blocs d'ancrage. Cette phase est critique car la mise en tension de la précontrainte globale entraîne des

tractions. Lors de cette étape le voussoir ne bénéficie pas encore de la compression apportée par les voussoirs en tête de mât. Cependant les résultats Figure 8 et Figure 9 montrent que les tractions restent inférieures à la contrainte admissible en traction, égale à -8 MPa.

Une analyse de la structure en service est également menée prenant en compte la construction complète du mât et les sollicitations statiques du vent. Le torseur à appliquer aux extrémités du modèle local découle de l'étude sur le modèle global. Deux configurations ont été étudiées, considérant la flexion globale suivant deux axes perpendiculaires, ceci afin de mettre en relief l'effet bénéfique ou non de la précontrainte globale (configuration 1 et 2 respectivement). Les résultats de cette analyse montrent que la configuration 2 est la plus défavorable, lorsque la flexion du mât se fait suivant l'axe des ancrages et que la précontrainte n'exerce pas d'effet bénéfique sur les tractions du matériau. Les contraintes minimales obtenues en traction sont de -9 MPa,

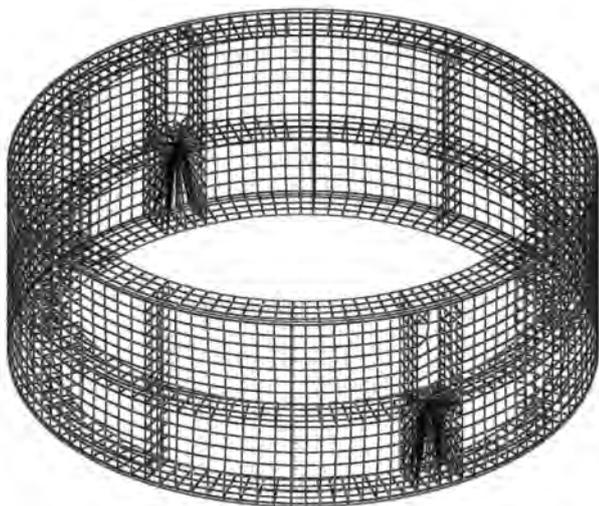


Figure 6 : Géométrie et maillage du modèle de calcul d'un voussoir

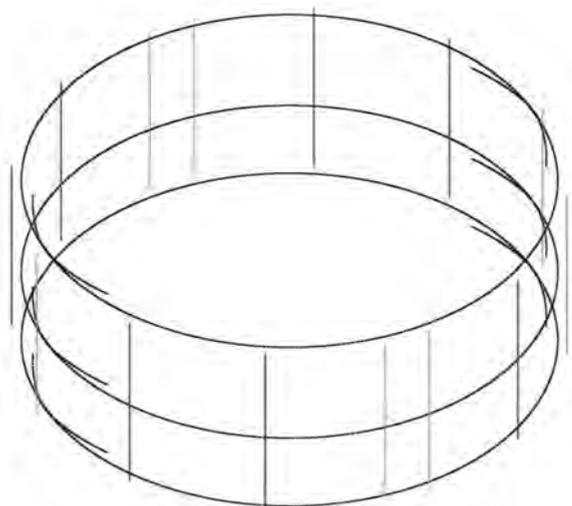


Figure 7 : Description de la précontrainte locale



Figure 8 : Contrainte normale circonférentielle (phase provisoire)



Figure 9 : Contrainte normale longitudinale (phase provisoire)

et correspondent à 30 % de la contrainte de traction admissible en flexion (-30 MPa) garantissant ainsi un comportement correct vis à vis de la fatigue de la structure. Le schéma d'un segment de voussoir est détaillé Figure 12. Cette figure précise l'ensemble des nervures verticales et

horizontales dans lesquelles sont positionnées la précontrainte locale. Le bloc d'ancrage est mis en évidence ainsi que la précontrainte longitudinale globale. Le Tableau 4, quant à lui, récapitule la précontrainte présente dans la structure.



Figure 10 : Contrainte normale longitudinale (combinaison ELS -configuration 1)



Figure 11 : Contrainte normale longitudinale (combinaison ELU -configuration 2)

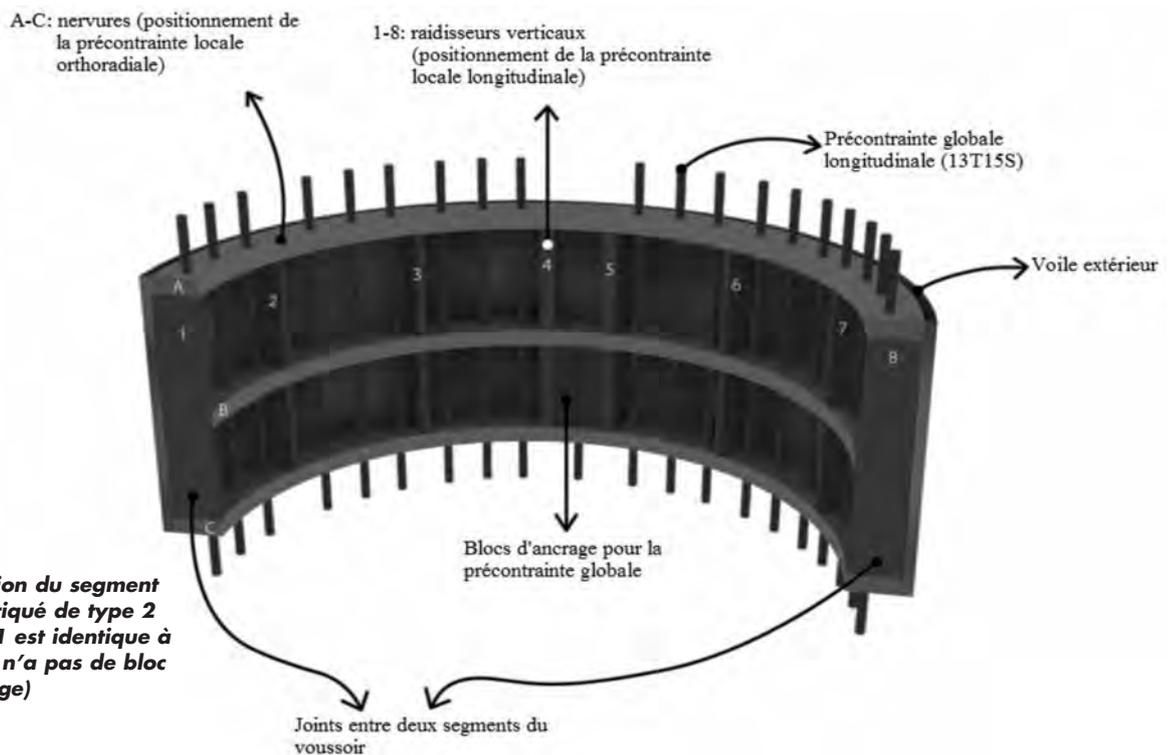


Figure 12 : Description du segment de voussoir préfabriqué de type 2 (le segment de type 1 est identique à celui de type 2 mais n'a pas de bloc d'ancrage)

Type de précontrainte	Caractéristiques de la précontrainte
Précontrainte globale longitudinale	- 50 unités 13 T15S à la base et 10 unités 13 T15S en tête de mât avec une répartition linéaire le long du mât. - 2 ancrages globaux par voussoir de type 2
Précontrainte locale longitudinale	- 1 barre précontrainte de type Freyssibar pour chaque renfort vertical (diamètres Φ 26,5 pour les renforts intermédiaires et Φ 40 pour les renforts au droit des ancrages et des jointures des demi voussoirs) - 2 ancrages locaux par renfort vertical
Précontrainte locale orthoradiale	- 10 monotorons T15S pour chaque nervure horizontale ancrés aux jointures des demi voussoirs (soit 60 T15S par voussoir) - 2 ancrages locaux par nervure

Tableau 4 : Récapitulatif des caractéristiques de la précontrainte

3.4. Phasage de construction

Il est important de bien étudier le phasage de construction d'une structure précontrainte en BFUP. En particulier,

lorsque la structure est très grande, il faut pouvoir mettre en oeuvre un phasage simple, répétitif et rapidement exécutable. Le phasage proposé est composé de trois étapes détaillées Figure 13.

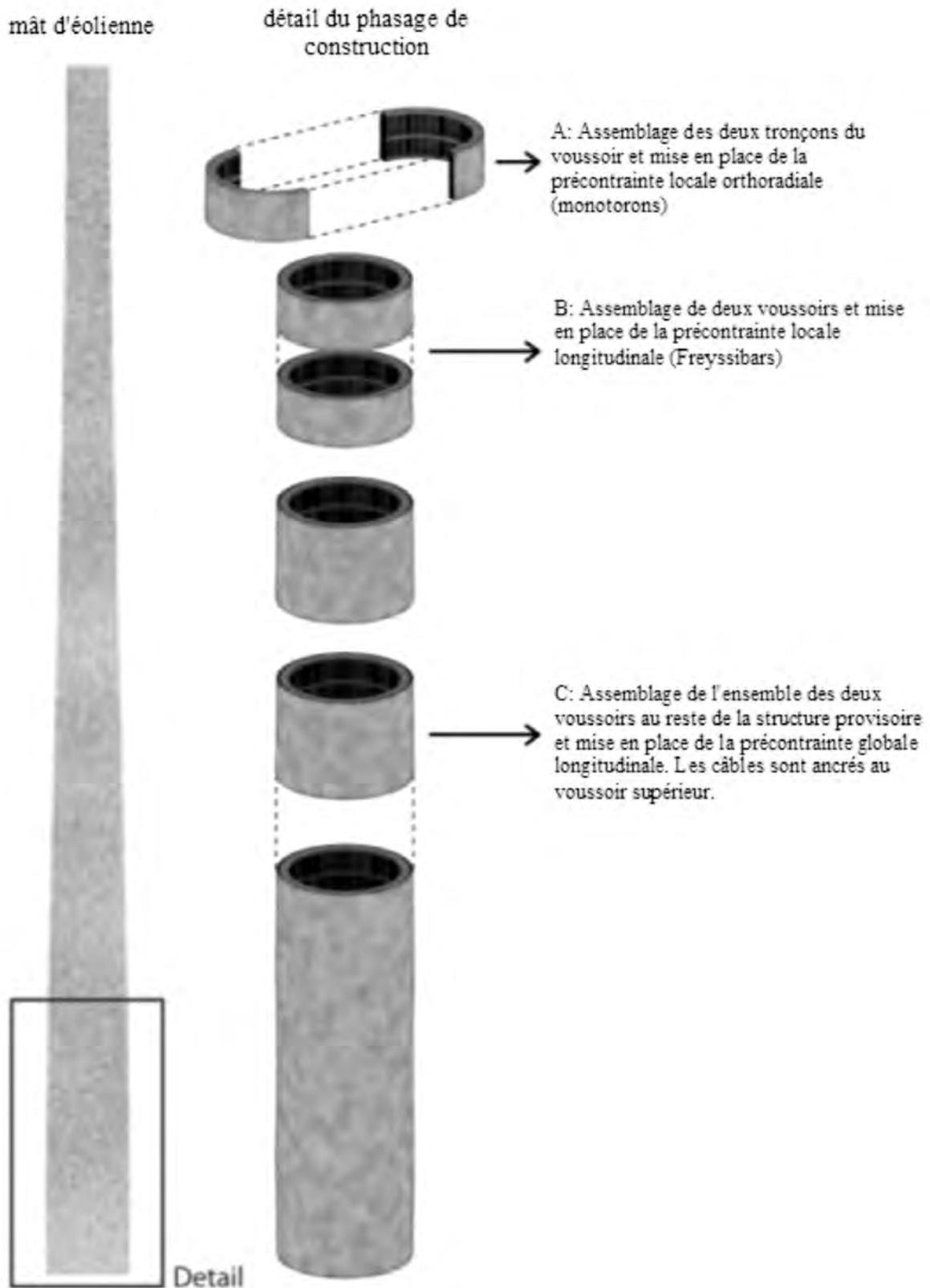


Figure 13 : Phasage de construction du mât d'éolienne

4. CONCLUSIONS

Le BFUP est un matériau qui a souvent été utilisé dans des projets innovants de génie civil. Il a été préféré aux autres matériaux traditionnels pour ses performances en terme de résistance et de rigidité. Cette étude de faisabilité a montré qu'il était possible de concevoir un mât de 120 m pour les fermes éoliennes et d'exploiter les autres caractéristiques prometteuses du BFUP pour les cas d'éoliennes en haute

mer. Le bon comportement à la fatigue du BFUP ainsi que sa faible dégradation même en milieu extrême font de ce matériau un concurrent direct des autres matériaux couramment utilisés pour les mâts d'éolienne. L'étude de faisabilité a été menée sur un modèle et des sollicitations simplifiées correspondant à une situation d'éolienne terrestre. Des études approfondies seraient nécessaires pour prendre en compte d'autres types de sollicitation comme celles dues, par exemple, au vent turbulent ou à la houle.