

19^e Edition des Journées scientifiques
du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton
(RF)²B

SIAME, Anglet, France
12 et 13 juillet 2018

INFLUENCE DE MOUVEMENT CYCLIQUE SUR LE DURCISSEMENT DE COULIS : CAS DES EOLIENNES OFFSHORES

B. Delsaute^A, R. Furnémont^B, M. Königsberger^A, S. Staquet^A

A Laboratoire de génie civil, BATir – Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgique

B Robotics and Multibody Mechanics (R & MM), Vrije Universiteit Brussel, Bruxelles, Belgique

RÉSUMÉ : Le but de ce papier est de présenter une nouvelle méthodologie expérimentale permettant de caractériser le comportement de coulis lorsque des déplacements cycliques sont appliqués depuis sa mise en place. Une première campagne d'essai permet de caractériser le comportement du coulis durant son durcissement et de définir les contraintes associées à l'entrave des déformations libres. Une deuxième campagne d'essai permet de caractériser le comportement du coulis sous déplacements cycliques depuis la mise en place. Les résultats des deux campagnes d'essai permettent ensuite de déterminer le potentiel endommagement induit par le mouvement des vagues durant le durcissement du coulis. Un dispositif TSTM a été utilisé afin de simuler l'influence du mouvement cyclique dans la direction horizontale en appliquant des déplacements et des chargements cycliques depuis la mise en place du coulis. Un dispositif de ségrégation a été utilisé afin de simuler l'effet des vagues dans la direction verticale.

1. INTRODUCTION

La construction des fondations d'éolienne offshore représente toujours un défi technique pour les ingénieurs. Plusieurs types de constructions ont été développés, la fondation de type monopieu est la solution la plus souvent retenue pour les projets récents. Les fondations sont réalisées en plusieurs étapes. Premièrement, un trou est foré jusqu'à une certaine profondeur, ensuite un monopieu est placé et battu jusqu'à la profondeur visée. Afin d'assurer la stabilité de l'éolienne, l'anneau se trouvant entre le monopieu en acier et le sol marin est rempli d'un coulis. Avant la mise en place du coulis, une structure est placée sur le monopieu à hauteur du fond marin et est ancrée dans le fond marin afin de minimiser le déplacement horizontal du monopieu induit par le mouvement des vagues. Selon les spécifications de la norme DNVGL-ST-0126 (DNV GL AS 2016), si le mouvement relatif de l'interface entre le monopieu et le coulis excède 1 mm avant que le coulis ait atteint une résistance significative, il y a alors lieu de réduire la résistance à long terme du coulis à une valeur raisonnable. Pour ce faire un facteur de sécurité additionnel, lié au mouvement induit par les vagues durant la phase de durcissement du coulis, doit être défini et doit être prouvé par des résultats expérimentaux. Dans le cadre du parc éolien de Saint Nazaire, des simulations numériques ont montré qu'il est pratiquement impossible d'obtenir un déplacement relatif à l'interface monopieu-coulis inférieur à 1 mm lorsque les vagues appliquent des charges au monopieu. Il est dès lors nécessaire de définir quels sont les potentiels d'endommagements du coulis durant son durcissement lorsque des mouvements cycliques lui sont appliqués. Pour répondre à cette question, le laboratoire de génie civil du Service BATir de l'Université Libre de Bruxelles a été chargé de définir expérimentalement quelles sont les performances de plusieurs coulis sous chargement cyclique depuis leur mise en place.

Afin de fournir une réponse détaillée à ce problème, il y a tout d'abord lieu de considérer les cas de charges suivants :

- Entrave des déformations endogènes et thermiques durant le durcissement du coulis.
- Effet du mouvement cyclique induit par les vagues.

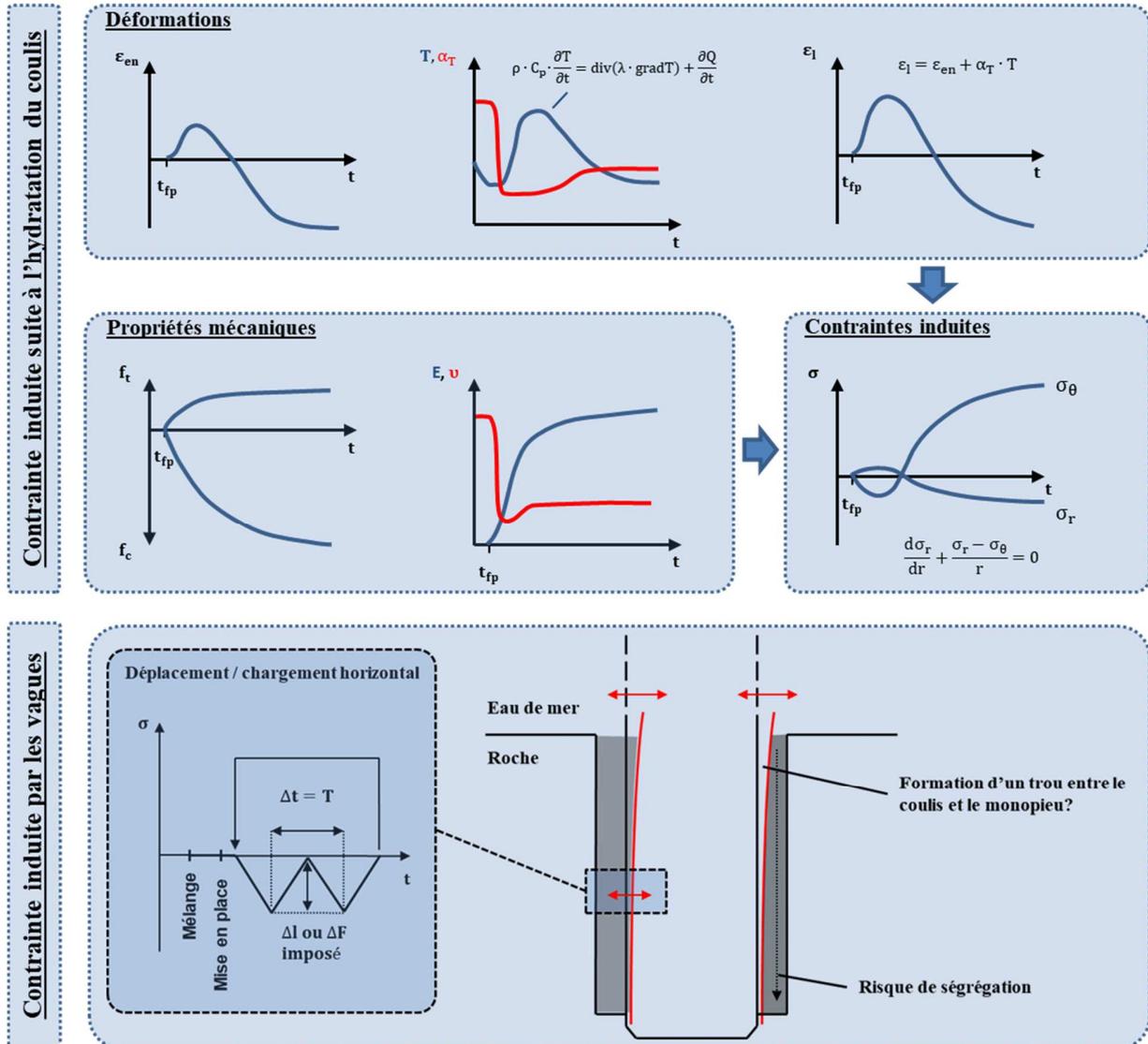


Figure 1. Ensemble des cas de charges à considérer pour définir le potentiel endommagement du coulis.

Les contraintes résultant de ces deux cas de charge doivent ensuite être comparées à la résistance du coulis durant tout le durcissement du matériau. Si le ratio contrainte/résistance est élevé, un potentiel endommagement du coulis peut avoir lieu. Cet endommagement peut s'accumuler dans le temps et peut éventuellement mener à une réduction des propriétés mécaniques et de la durabilité du coulis. Les contraintes induites par l'entrave des déformations endogènes et thermiques par le monopieu sont influencées par la nature viscoélastique du coulis. L'évolution des déformations restreintes est composée de deux périodes : une période de chauffe suivie par une période de refroidissement (voir Figure 1). La période de chauffe débute aux environs du début de la prise du coulis lorsque les propriétés mécaniques commencent à se développer. Durant et après la prise, une grande quantité de chaleur est dégagée lors de l'hydratation du liant. La température augmente dans le coulis et par conséquent les déformations thermiques augmentent. En parallèle, les déformations endogènes se développent aussi. Il n'existe pas de

tendance systématique pour l'évolution des déformations endogènes car durant les premières heures ou jours après la prise du matériau, les déformations endogènes peuvent résulter en un gonflement ou en un retrait selon les proportions et la nature des matériaux utilisés. Cependant, les déformations thermiques sont généralement plus importantes que les déformations endogènes pour des coulis à haute performance utilisés pour les fondations d'éoliennes offshore. Un gonflement est donc attendu durant la période d'échauffement du matériau. Ensuite, le dégagement de chaleur du coulis décroît fortement résultant en une diminution de la température du coulis. Durant cette période, les déformations thermiques et endogènes diminuent. Suite à l'entrave des déplacements du coulis par le monopieu, le coulis est d'abord en compression et ensuite en traction dans le sens circonférentiel. Dans le sens radial les contraintes sont de signe opposé et de plus faible amplitude. Lorsque les déformations entravées induisent des contraintes de traction dans le béton, il y a alors un risque de fissuration. Pour correctement caractériser ce risque il est nécessaire de connaître les propriétés thermo-chimiques (dégagement de chaleur, coefficient de dilatation thermique, conductivité thermique, capacité calorifique spécifique et déformations endogènes) afin de déterminer les déformations libres du coulis et les propriétés mécaniques (résistance mécanique, module d'élasticité et fonction de fluage) du coulis afin de déterminer les contraintes associées à l'entrave des déformations libres depuis la fin de prise t_{fp} . Dans le cadre de cette étude, les phénomènes de fluage et de relaxation n'ont pas été considérés. Ces phénomènes ont pour effet de globalement diminuer l'amplitude des contraintes. Les contraintes induites par le mouvement des vagues sont calculées selon les spécifications de la norme DNVGL-ST-0126. Le mouvement du monopieu durant les 24 premières heures après le début du placement du coulis est déterminé en considérant l'état de la mer avec les conditions les plus sévères (hauteur de vague maximale et période associée selon l'emplacement de l'éolienne). Par simulation numérique, il est ensuite possible de définir les déplacements du coulis (avant prise) ou les contraintes reprises par le coulis (après prise). Mais d'autres effets sont aussi induits par le mouvement des vagues tel que le risque de ségrégation du coulis (Lohaus et al. 2015), la possibilité d'ovaliser l'anneau en coulis suite à une accumulation des déformations irréversibles prenant place lors de chaque déplacement/chargement cyclique. L'ensemble de ces phénomènes sont schématisés dans le bas de la Figure 1.

Dans ce papier, une nouvelle méthodologie expérimentale est présentée pour caractériser la performance de coulis lorsque des cycles de déplacement sont imposés et que les déformations thermiques et endogènes du matériau sont entravées depuis la mise en place du coulis.

2. MATERIAUX

Dans le cadre de cette étude, plusieurs coulis provenant de différents fournisseurs ont été testés et comparés. Cependant la composition et les performances de ces coulis sont confidentielles et aucun résultat expérimental ne peut être présenté. Seule la méthodologie d'essai permettant de caractériser la performance des coulis sous déplacements/chargements cycliques est présentée dans ce papier.

3. MÉTHODES

Deux campagnes d'essais ont été réalisées afin de déterminer l'influence de mouvement cyclique sur le durcissement de coulis. Une première campagne d'essai permet de caractériser la performance du coulis en condition scellée durant son durcissement et de définir les contraintes associées à l'entrave des déformations endogènes et thermiques. Une deuxième campagne d'essai est ensuite réalisée afin de caractériser le comportement du coulis sous déplacements/chargements cycliques depuis sa mise en place. Les résultats des deux campagnes d'essai permettent ensuite de déterminer le potentiel endommagement induit par le mouvement des vagues durant le durcissement du coulis.

3.1 Suivi du risque de fissuration suite à l'entrave des déformations libres

Pour définir les contraintes induites par l'entrave des déformations libres, il y a lieu de considérer la géométrie du problème. Les déformations libres de l'anneau en coulis sont entravées par le monopieau en acier (retrait) et la roche (gonflement) comme indiqué sur la Figure 2.

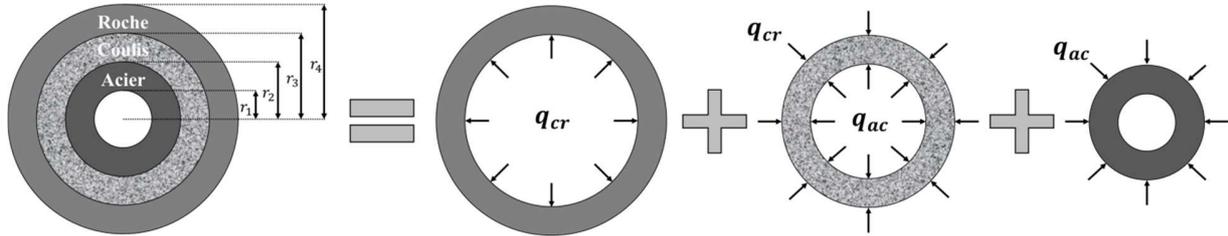


Figure 2. Schéma de principe du calcul de l'entrave des déformations libres de l'anneau en coulis.

Les contraintes radiales σ_r et tangentielles σ_θ sont définies en satisfaisant les conditions d'équilibre données à l'Equation 1 tout en considérant les relations contrainte-déformation pour un état plan de contrainte données aux Equations 2 et 3.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad 1$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_r + \mu\varepsilon_\theta - (1 + \nu)\varepsilon_l) \quad 2$$

$$\sigma_r = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_\theta + \mu\varepsilon_r - (1 + \nu)\varepsilon_l) \quad 3$$

Après avoir effectué la résolution analytique et considéré les conditions aux limites du problème, il est possible de déterminer l'évolution de σ_r et σ_θ en connaissant les modules d'élasticité et coefficients de Poisson de la roche, du coulis et de l'acier du monopieau. Les déformations libres ε_l doivent aussi être définies. Pour ce faire, il est nécessaire de définir l'évolution des déformations endogènes ε_{en} , du coefficient de dilatation thermique α_T et de la température T (Equation 4). L'évolution de la température est définie en résolvant l'équation de la chaleur (Equation 5) où ρ , C_p , λ et Q sont respectivement la densité, la chaleur spécifique, la conductivité thermique et le dégagement de chaleur du coulis.

$$\varepsilon_l = \varepsilon_{en} + \alpha_T \cdot T \quad 4$$

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \cdot \text{grad}T) + \frac{\partial Q}{\partial t} \quad 5$$

Plus d'information concernant la détermination de σ_r et σ_θ pour de telle configuration géométrique est fournie dans (Herve' & Zaoui 1995). En résumé, il est nécessaire de connaître les propriétés suivantes du coulis pour déterminer le risque de fissuration suite à l'entrave des déformations libres du coulis : E , ν , ε_{en} , α_T , ρ , C_p , λ , Q ainsi que la résistance à la compression f_c et à la traction f_t . L'ensemble des méthodes utilisées pour caractériser ces propriétés depuis le plus jeune est présenté ci-dessous. Seules les évolutions de C_p et λ n'ont pas été caractérisées depuis la mise en place du coulis au laboratoire de génie civil du service BATir à l'ULB.

3.1.1 Détermination du temps de prise

Le temps de début et fin de prise sont déterminés au moyen du dispositif FreshCon qui permet de suivre l'évolution de la vitesse des ondes de compression P et de cisaillement S . Les échantillons sont complètement scellés pendant l'essai pour éviter le séchage. Les essais sont réalisés dans une enceinte climatique dans laquelle la température est contrôlée à $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Le temps de début de prise correspond au temps où le maximum de la dérivée temporelle des ondes S est atteint et le temps de fin de prise correspond au temps où le maximum de la dérivée temporelle du module d'élasticité dynamique (basé sur la mesure

simultanée de la vitesse des ondes P et S) est atteint. Une description complète du dispositif, du protocole d'essai et du traitement des données est indiquée dans les références (Carette & Staquet 2015; Saleh et al. 2017).

3.1.2 Suivi du flux de chaleur et de la température adiabatique

Le flux de chaleur du coulis est mesuré de manière continue avec deux types de dispositifs. Un calorimètre quasi-adiabatique (QAB) permet de mesurer l'évolution de la température du coulis en condition quasi-adiabatique et de définir à la fois le flux de chaleur et l'évolution de la température en condition adiabatique (Boulay et al. 2010). Les essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 16 cm de diamètre et 32 cm de hauteur. Un calorimètre isotherme TAM-Air composé de 8 canaux de mesures a été utilisé pour mesurer le dégagement de chaleur en condition isotherme (Instruments 2017). 4 échantillons par composition sont testés et ont une masse totale d'environ 20 g.

3.1.3 Suivi des déformations endogènes et du coefficient de dilatation thermique

Les déformations libres du coulis ont été mesurées en utilisant le dispositif Autoshrink (Mejlhede Jensen & Freiesleben Hansen 1995). Les éprouvettes sont disposées horizontalement sur le banc d'essai juste après la mise en place du coulis dans un moule en forme de soufflet. Les déformations endogènes peuvent alors être définies depuis la mise en place du coulis. Durant l'essai, des cycles de température de $\pm 3^\circ\text{C}$ sont appliqués à l'échantillon afin de déterminer le coefficient de dilatation thermique. Une description complète du dispositif ainsi que de la méthodologie d'essai est donnée dans les références (Delsaute 2016; Delsaute & Staquet 2017).

3.1.4 Détermination du module d'élasticité et du coefficient de Poisson depuis la prise

Le suivi des propriétés élastiques est réalisé sur des éprouvettes cylindriques de 97 mm de diamètre et de 550 mm de hauteur. Pour le suivi simultané des déformations libres et de la température, un deuxième échantillon, ayant la même géométrie, est produit. Deux feuilles autocollantes en aluminium entourent les éprouvettes afin de les garder en condition scellée durant l'essai. Les essais sont réalisés avec une presse électromécanique d'une capacité de ± 100 kN. La mesure des déformations longitudinales et latérales est réalisée avec des extensomètres en Invar®. Chaque extensomètre est composé de deux couronnes espacées de 350 mm et de 3 barres placées à 120° sur lesquelles des capteurs de déplacement sont fixés. Trois ancrages à lame élastique sont placés sur chacune des couronnes pour assurer une bonne mesure des déplacements du coulis lorsque des chargements répétés sont appliqués. L'entièreté du dispositif se trouve dans une salle climatisée contrôlée en température et en humidité. Pour le suivi du module d'élasticité et du coefficient de Poisson, des chargements répétés sont appliqués toutes les 30 minutes après la fin de prise du coulis durant les 24 premières heures. Chaque chargement correspond à 20% de la résistance en compression du coulis lors du chargement. Ensuite des chargements sont appliqués à des âges de 2, 3, 7, 14 et 28 jours. Une description complète du dispositif, du protocole d'essai et du traitement des données est indiquée dans les références (Boulay et al. 2014; Delsaute, Boulay, et al. 2016; Delsaute, Torrenti, et al. 2016).

3.1.5 Détermination de l'énergie d'activation

Les variations de température dans le coulis et, par conséquent, son vieillissement sont dépendants de la température de la mer lors de sa mise en place. Pour connaître l'influence de la température de la mer sur l'évolution des propriétés du coulis, des essais ont été effectués à 3 températures de cure. Ces 3 températures correspondent aux températures minimales, moyennes et maximales relevées durant les années précédant l'installation des éoliennes. Il est ensuite possible de déterminer l'impact de la température de cure sur l'évolution des propriétés du coulis en considérant le temps équivalent. Le temps équivalent est basé sur la loi d'Arrhenius (Equation 6) et est fonction de l'âge du coulis t , de l'évolution de la température du coulis T ($^\circ\text{C}$), d'une température de référence T_r (généralement 20°C), de la constante des gaz parfait R ($=8.314$ J/mol/K) et de l'énergie d'activation apparente E_a (J/mol).

$$t_{eq}(t, T) = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{273 + T(s)} - \frac{1}{273 + T_r}\right)\right) \cdot ds$$

Pour chaque type d'essai, la température du coulis est mesurée depuis la fin du malaxage jusqu'à la fin de l'essai.

3.2 Suivi des propriétés mécaniques lors de l'application de chargement cyclique

La résistance du coulis et par conséquent la capacité portante de l'anneau en coulis peuvent être altérées par des déplacements cycliques depuis la mise en place. Trois phénomènes majeurs doivent être considérés selon Lohaus, et al. (Lohaus et al. 2015). Horizontalement, l'application de déplacements/chargements cycliques peut mener à un endommagement de la matrice du coulis et à des déformations irréversibles (plastiques) pouvant induire la formation d'un trou à l'interface coulis-roche et coulis-monopieu. Verticalement, l'application cyclique de déplacement/chargement peut mener à un risque de sédimentation et de ségrégation du coulis. Chacun de ces phénomènes est fonction de l'amplitude du déplacement/chargement cyclique, de leur fréquence et de la composition du coulis. Deux types de dispositif ont été utilisés pour définir l'influence de ces chargements cycliques. Un dispositif TSTM a été utilisé afin de simuler l'influence du mouvement/chargement cyclique horizontalement. Un deuxième dispositif a été développé pour simuler l'effet des vagues dans la direction verticale. Ces deux dispositifs sont présentés ci-dessous.

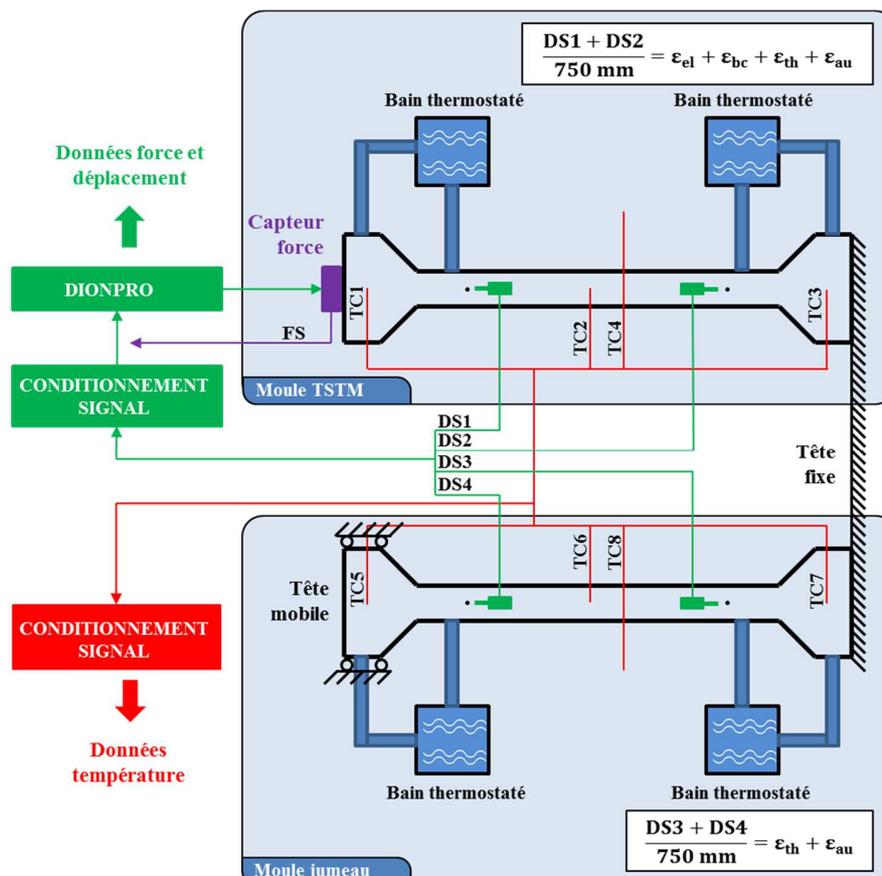


Figure 3. Schéma de principe de fonctionnement du dispositif TSTM

3.2.1 TSTM (Temperature Stress Testing Machine)

Le dispositif TSTM permet de réaliser le suivi du retrait empêché. Une version revisitée a été développée à l'ULB pour d'autres applications telles que l'étude du fluage et de la relaxation (Staquet et al. 2012). Le dispositif est composé d'une presse électromécanique permettant de réaliser des chargements en traction et en compression allant jusqu'à 400 kN. La presse est totalement programmable et pilotable (en force ou déplacement) par ordinateur. Le schéma de fonctionnement du dispositif TSTM se trouve à la Figure 3. L'éprouvette a une forme d'os et est composée d'une travée centrale d'un mètre de long et d'une section carré de 100 mm de côté. Le suivi de la température est réalisé avec un thermocouple se trouvant au milieu de la travée. Le moule est entouré par une régulation thermique et contrôlé en température. Le moule est couvert d'une couche de feuille de PTFE (poly-tetra-fluoroéthylène) et d'un film plastique (en contact avec le béton) afin de réduire le frottement entre le moule et le béton. La salle d'essai est climatisée à 20°C et 50% HR. Les déplacements sont mesurés avec deux capteurs de déplacement à courant de Foucault sans contact placés sur des supports en Invar© qui sont eux-mêmes fixés sur des barres en acier. Les capteurs sont espacés de 750 mm et mesurent les déplacements sur la travée centrale (là où le champ de déplacement est uniforme). Le suivi des déformations libres est réalisé sur une éprouvette jumelle possédant exactement les mêmes dimensions que la première. La seule différence provient du mouvement libre d'une des têtes du moule.

3.2.1 Essai de ségrégation

Le dispositif d'essai développé à l'ULB est inspiré des travaux de Lohaus, et al. (Lohaus et al. 2015). Ce dispositif a été développé pour permettre de simuler l'effet des mouvements cycliques du monopieu induits par les vagues sur le durcissement du coulis jusqu'à sa fin de prise. Le bâti est réalisé en bois de coffrage et est séparé en deux parties égales par une planche en bois. Deux échantillons de 1,2 m de hauteur ; 0,8 m de largeur et 0,23 m d'épaisseur sont coulés durant l'essai et représentent un volume total de 442 dm³. La plaque en bois se trouvant au milieu du bâti est fixée au bas du moule avec deux joints permettant une rotation libre. Le haut de la planche en bois est attaché à une barre reliée à un moteur lui-même fixé au bâti. Le moteur a une capacité de 75Nm. De cette manière, le mouvement du coulis causé par les déplacements du monopieu peut être simulé. Le dispositif d'essai est représenté à la Figure 4.

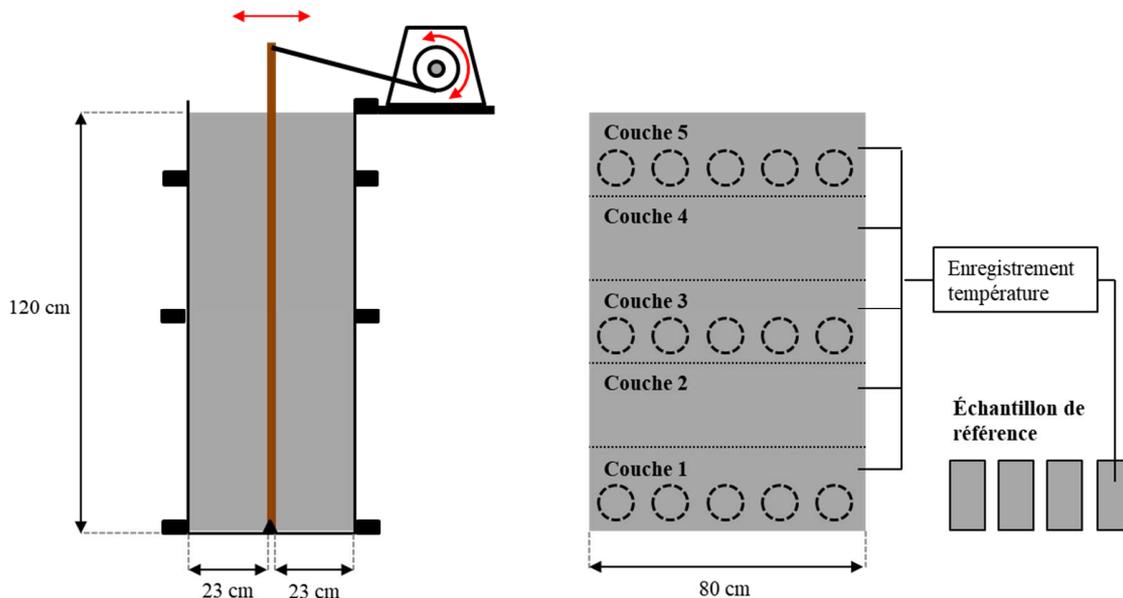


Figure 4. Schéma de principe du dispositif de ségrégation

4. PROTOCOLE D'ESSAI ET ANALYSE DES DONNEES

Pour définir l'amplitude et la fréquence des déformations/contraintes du coulis résultant du mouvement du monopieu induit par les vagues, une simulation numérique de l'entièreté de la fondation a été effectuée

(roche, coulis et monopie). La fréquence et l'amplitude des vagues sont définies à l'aide de relevés réalisés durant les années précédant l'installation de l'éolienne. Ces données sont ensuite utilisées comme donnée d'entrée des protocoles d'essai présenté ci-après.

4.1 Suivi des déformations libres et du module d'élasticité sous déplacement cyclique depuis la mise en place du coulis

Des essais de déplacement et chargement cyclique ont été réalisés sur un échantillon depuis un âge de 1 heure jusqu'à un âge de 24 heures à 3 températures de cure correspondant aux températures minimales, moyennes et maximales relevées sur site. Pour chaque essai, une seconde éprouvette est produite. Cette dernière possède exactement la même géométrie et les mêmes conditions que l'éprouvette chargée. Le protocole d'essai a été développé afin d'être représentatif de la situation du coulis en condition réelle. Des cycles de déplacement d'amplitude d_s sont appliqués à des intervalles p à partir d'un âge de 1h jusqu'à ce qu'une force F_s soit atteinte. Le déplacement d_s correspond au déplacement relatif maximum à l'interface coulis-monopieu. La force F_s correspond à la force maximale que le coulis reprend durant son durcissement. Les paramètres d_s et F_s ont été calculés par simulation numérique. Ensuite le dispositif TSTM est contrôlé en force et des cycles de chargement d'une amplitude F_s sont appliqués au coulis à intervalles p . À ce moment, les capteurs de déplacement sont placés sur le dispositif afin de suivre le déplacement des barres ancrées sur la partie prismatique des éprouvettes. Ces mesures permettent ensuite de définir le module d'élasticité du coulis à chaque période p . À un âge de 24h00, l'essai TSTM est arrêté. Le protocole d'essai est représenté à la Figure 5.

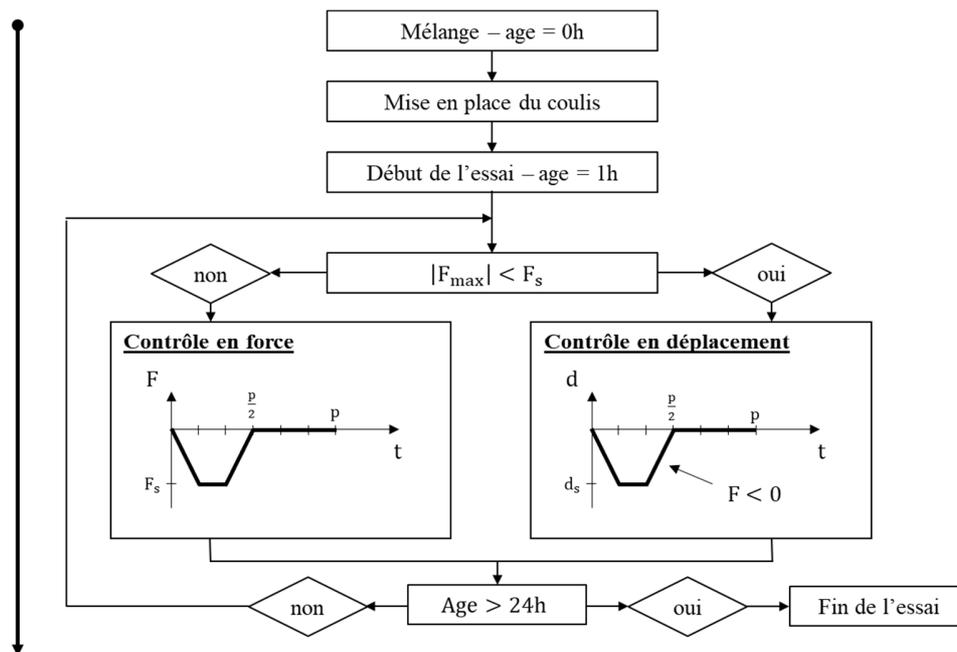


Figure 5. Protocole d'essai du dispositif TSTM

Les éprouvettes sont ensuite enlevées du dispositif et sont découpées en plusieurs cubes afin de tester la résistance du coulis lorsque des déplacements/chargements cycliques sont appliqués (éprouvette TSTM) et lorsqu'aucun déplacement ou chargement n'ait été imposé (éprouvette jumelle). Ces résultats permettent de déterminer si la résistance en compression du coulis est altérée après un âge de 24h00. Avant un âge de 24h00, l'enregistrement de la force et du déplacement du coulis sont utilisés afin de déterminer l'évolution du module d'élasticité. Ces résultats sont ensuite comparés aux résultats de module d'élasticité obtenus avec les chargements répétés (section 2.1.4) afin de définir le potentiel endommagement du coulis. De plus, les déformations de l'éprouvette chargée en chaque fin de cycle sont comparées aux déformations de l'éprouvette jumelle. Cette comparaison permet de quantifier les déformations irréversibles induites par l'application de chargements cycliques.

4.2 Suivi du durcissement du coulis lors de l'application de déplacement cyclique

Lors de la réalisation d'éolienne offshore, la production du coulis est effectuée de manière continue. Pour correspondre expérimentalement à ce procédé, le remplissage du dispositif d'essai de ségrégation est réalisé en 5 phases. Après la mise en place de la première couche de coulis, le moteur est démarré et des déplacements cycliques sont appliqués. Les autres couches se succèdent ensuite à intervalle régulier jusqu'au remplissage complet du moule. La durée totale du remplissage correspond au temps de mise en place du coulis sur site. Cinq thermocouples ont été insérés dans le moule à mi-hauteur de chacune des couches afin de suivre l'évolution de la température du coulis. Lorsque la dernière couche de coulis est placée, cinq éprouvettes cylindriques sont produites. L'essai est arrêté lorsque la dernière couche de coulis a fait prise. Durant l'entièreté de l'essai, la position θ et le couple appliqué par le moteur T_m sont enregistrés chaque 0,2 seconde. Exactement, 24 heures après le début de l'essai, le dispositif est démonté et 5 cylindres sont extraits sur la première, la troisième et la cinquième couche (Figure 4). Deux cylindres sont testés en compression à un âge de 3 jours et 2 autres cylindres sont testés en compression à un âge de 7 jours. Le dernier cylindre est découpé sur sa hauteur en dix morceaux. Chacun des morceaux est ensuite photographié à un âge de 3 et 7 jours pour évaluer la teneur en sable, en liant et en vide du coulis.

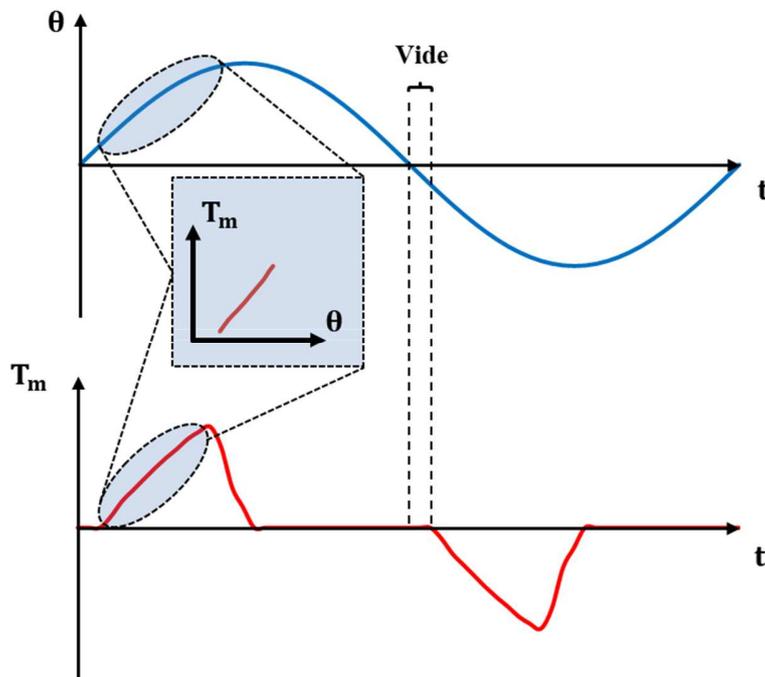


Figure 6. Évolution de la position et du couple moteur durant un cycle.

Les enregistrements de la position et du couple fourni par le moteur sont utilisés afin de caractériser la formation d'un potentiel trou entre la plaque en bois amovible et le coulis et l'évolution de la rigidité de l'ensemble des couches de coulis. Pour chaque cycle, l'épaisseur du trou formé par les déplacements cycliques est déterminée en considérant l'intervalle de temps entre une position $\theta = 0$ et le début de l'augmentation du couple moteur. La rigidité de l'ensemble des couches de coulis est définie sur base de l'évolution de la relation couple moteur – position lors de chaque chargement comme indiqué à la Figure 6. Les cylindres extraits de l'essai de ségrégation permettent de comparer la résistance à la compression et la teneur en sable, liant et vide des couches 1, 3 et 5. Ces résultats sont ensuite comparés aux résultats obtenus sur les cylindres de référence afin de caractériser le potentiel phénomène de ségrégation ayant lieu dans le coulis lorsque des déplacements cycliques sont appliqués au coulis depuis sa mise en place. De plus, les mesures de la température peuvent être utilisées afin de valider les résultats provenant de simulations numériques de la température basée sur les résultats dégagement de chaleur (section 2.1.2).

5. CONCLUSIONS

Une nouvelle méthodologie expérimentale est présentée et permet de caractériser le comportement de coulis lorsque des déplacements/chargements sont appliqués depuis la mise en place. Une première campagne d'essai permet de caractériser la performance du coulis en condition endogène durant son durcissement et de définir les contraintes associées à l'entrave des déformations endogènes et thermiques. Une deuxième campagne d'essai permet de caractériser le comportement du coulis sous déplacements/chargements cycliques depuis sa mise en place. Les résultats des deux campagnes d'essai permettent ensuite de déterminer le potentiel endommagement induit par le mouvement des vagues durant le durcissement du coulis. Un dispositif TSTM a été utilisé afin de simuler l'influence du mouvement/chargement cyclique horizontalement en appliquant des déplacements et chargements cycliques depuis la mise en place du coulis. Cet essai permet de définir l'évolution du module d'élasticité lorsque des chargements cycliques sont appliqués. Un dispositif de ségrégation a été utilisé afin de simuler l'effet des vagues dans la direction verticale.

REMERCIEMENTS

Le développement de la méthode d'essai a été financé et réalisé avec la contribution de l'équipe de la société d'ingénierie DEME : V. Nelko, B. Reggers, N. Gunst, and S. Dumortier.

REFERENCES

- Boulay, C. et al., 2014. How to monitor the modulus of elasticity of concrete, automatically since the earliest age? *Materials and Structures*, 47(1–2), pp.141–155.
- Boulay, C. et al., 2010. Quasi-adiabatic calorimetry for concretes: Influential factors. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (december), pp.19–36.
- Carette, J. & Staquet, S., 2015. Monitoring the setting process of mortars by ultrasonic P and S-wave transmission velocity measurement. *Construction and Building Materials*, 94, pp.196–208.
- Delsaute, B., 2016. *New approach for Monitoring and Modelling of the Creep and Shrinkage behaviour of Cement Pastes, Mortars and Concretes since Setting Time*. Université Libre de Bruxelles (BATir) and Université Paris Est (IFSTTAR).
- Delsaute, B., Boulay, C., et al., 2016. Testing Concrete E-modulus at Very Early Ages Through Several Techniques: An Inter-laboratory Comparison. *Strain*, 52(2), pp.91–109.
- Delsaute, B. & Staquet, S., 2017. Decoupling Thermal and Autogenous Strain of Concretes with Different Water/Cement Ratios During the Hardening Process. *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(2), p.22.
- Delsaute, B., Torrenti, J.-M. & Staquet, S., 2016. Monitoring and modeling of the early age properties of the Vercors Concrete. In *TINCE 2016*. Paris, p. 12.
- DNV GL AS, 2016. *Support structures for wind turbines*,
- Herve´, E. & Zaoui, A., 1995. Elastic behaviour of multiply coated fibre-reinforced composites. *International Journal of Engineering Science*, 33(10), pp.1419–1433.
- Instruments, T., 2017. Tam air isothermal calorimetry. , p.23. Available at: http://www.tainstruments.com/pdf/brochure/TAM_AIR_brochure.pdf [Accessed February 14, 2017].
- Lohaus, L. et al., 2015. Experimental and Numerical Investigations of Grouted Joints in Monopiles Subjected to Early-Age Cycling. *Journal of Ocean and Wind Energy*, 2(4).
- Mejlhede Jensen, O. & Freiesleben Hansen, P., 1995. A dilatometer for measuring autogenous deformation in hardening portland cement paste. *Materials and Structures*, 28(7), pp.406–409.
- Saleh, M. et al., 2017. Applicability of ultrasonic measurement on the monitoring of the setting of cement pastes: effect of water content and mineral additions. *Advances in Civil Engineering*.
- Staquet, S. et al., 2012. Design of a Revisited Tstm System for Testing Concrete Since Setting Time Under Free and Restraint Conditions . In *Concrack 3 - RILEM-JCI International Workshop on Crack Control of Mass Concrete and Related Issues Concerning Early-Age of Concrete Structures*. p. 12.

