

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR
TRAVAUX PUBLICS

E3 – U32
Sciences physiques appliquées

SESSION 2023

Durée : 2 heures

Coefficient : 2

Matériel autorisé :

- L'usage de calculatrice, avec mode examen actif, est autorisé.
- L'usage de calculatrice sans mémoire, type « collègue », est autorisé.
- Tout autre matériel est interdit.

La clarté des raisonnements et la qualité de la rédaction interviendront dans l'appréciation de la copie.

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Le sujet se compose de 11 pages, numérotées de 1/11 à 11/11.

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 1 sur 11

L'éolienne FLOATGEN



L'éolienne *Floatgen* demeure à ce jour la première et seule éolienne en mer installée en France.

Cette éolienne flottante de 2,00 MW est installée sur le site d'essais de Sem-Rev, au large du Croisic (44).

Sa production d'électricité a augmenté de près de 14 % par rapport à 2019, pour atteindre 6,8 GWh en 2020, soit un total de 12,8 GWh en deux ans.

L'excellente performance et la tenue à la mer de la technologie brevetée Damping Pool® d'Ideol (*fondation en anneau carré avec ouverture centrale*) sont confirmées.

Quatre autres projets d'éolien flottant devraient être opérationnels en 2022 : un en Bretagne et trois en mer Méditerranée.

Sources : d'après *floatgen.eu* et *revolution-energetique.com*

Après des études autour de l'ancrage de l'éolienne *Floatgen*, puis de son flotteur, dans les deux premières parties, la troisième traite de la corrosion des matériaux ferreux utilisés pour ce dernier.

Ces trois parties sont indépendantes et peuvent être traitées dans n'importe quel ordre.

Six annexes apportent des éléments d'information pour la résolution des questions du sujet.

Les résultats des calculs seront donnés avec un nombre de chiffres significatifs cohérent.

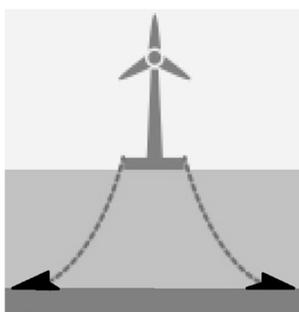
Partie 1 – Ancrage de l'éolienne *Floatgen* (6,5 points)

Partie 2 – Étude du flotteur de l'éolienne *Floatgen* (7 points)

Partie 3 – Protection des armatures du flotteur de l'éolienne *Floatgen* (6,5 points)

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 2 sur 11

Partie 1 – Ancrage de l'éolienne *Floatgen*



L'éolienne *Floatgen* est maintenue par six lignes semi-tendues, reliées chacune à une ancre de 16 tonnes reposant au fond de la mer (deux lignes sont représentées sur le dessin ci-contre).

Ces lignes d'ancrage, qui maintiennent l'éolienne de manière très précise, sont essentiellement composées de nylon, plus précisément le PA 6, ou nylon 6.

Ce polymère est utilisé pour ses caractéristiques d'élasticité.

Il absorbe les mouvements de la houle et les efforts générés par le flotteur en surface. La fibre nylon n'est également pas sujette à la corrosion.

Données :

- Masses molaires atomiques :
 $M(O) = 16,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(H) = 1,00 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(C) = 12,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$; $M(N) = 14,0 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$
- Masse volumique du nylon 6 : $\rho_{\text{nylon}} = 1,14 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Diamètre d'une ligne d'ancrage en nylon 6 : $D = 220 \times 10^{-3} \text{ m}$

- 1.1 Indiquer l'intérêt majeur que présente le nylon sur l'acier, dans un environnement marin.
- 1.2 Définir le terme « polymère ».
- 1.3 Indiquer, avec justification, si des précautions particulières doivent être prises lors de la synthèse du nylon 6.
- 1.4 Pour un degré moyen de polymérisation de 500, montrer que la masse molaire moyenne du nylon 6 est de $56,5 \times 10^3 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Le recours à l'acier pour fabriquer les lignes d'ancrage offshore, qu'il s'agisse d'éoliennes ou de plateformes de prospection énergétique, est fréquent. Ces lignes ont des masses importantes : une ligne d'ancrage en acier de 600 m de longueur a, par exemple, une masse estimée à 200 t.

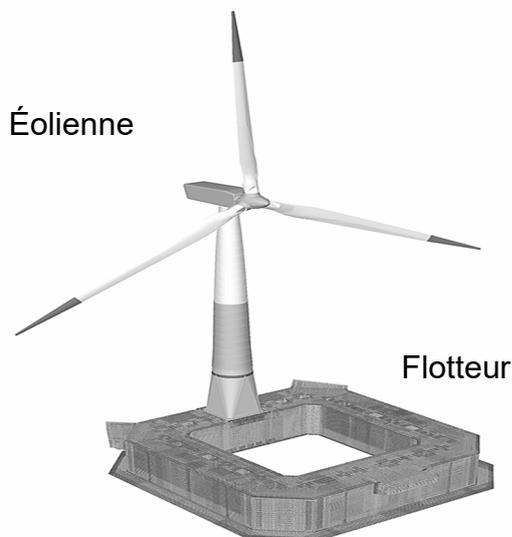
En réduisant la masse des lignes d'ancrage par le choix du nylon, le constructeur de l'éolienne *Floatgen* en réduit également le coût global de fabrication, leur transport étant moins onéreux.

- 1.5 Montrer que le recours au nylon à la place de l'acier, réduit de 87,0 % la masse de la ligne d'ancrage.

Remarque : pour cette question, la ligne d'ancrage est assimilée à un cylindre homogène.

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 3 sur 11

Partie 2 – Étude du flotteur de l'éolienne *Floatgen*



L'ensemble de l'éolienne *Floatgen* est constitué d'un **flotteur en béton armé** sur lequel repose **une éolienne**.

Le flotteur est modélisé par un « anneau », parallélépipède rectangle à base carrée, ouvert en son centre.

La partie centrale creuse est aussi assimilable à un parallélépipède rectangle à base carrée, de 26,0 m de côté.

Source : d'après www.tekla.com

*Dans cette partie, les lignes d'ancrage évoquées dans la partie 1 du sujet sont supposées ne pas intervenir sur la flottabilité de l'ensemble de l'éolienne *Floatgen*.*

Données :

- Intensité de la pesanteur $g = 9,81 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau de l'océan $\rho_{\text{eau océan}} = 1,03 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
- Masse de l'éolienne posée sur le flotteur $M_{\text{éolienne}} = 227 \times 10^3 \text{ kg}$
- Masse du flotteur $M_{\text{flotteur}} = 4,56 \times 10^6 \text{ kg}$

2.1 Donner deux avantages à utiliser l'éolien *flottant* à la place de l'éolien *posé*.

2.2 Calculer la valeur du poids de l'ensemble de l'éolienne *Floatgen*, noté P_F .

2.3 Exprimer la poussée d'Archimède qui s'exerce sur l'ensemble de l'éolienne *Floatgen*, notée F_A , en fonction notamment de son volume immergé, noté $V_{\text{immergé}}$.

Lorsque l'éolienne *Floatgen* fonctionne sur son site d'exploitation, son volume immergé est de $4,65 \times 10^3 \text{ m}^3$.

2.4 Vérifier la flottabilité de l'ensemble de l'éolienne *Floatgen* sur son site d'exploitation.

Afin de garantir la stabilité de l'ensemble de l'édifice, le flotteur sur lequel repose l'éolienne ne doit jamais être totalement immergé. Se pose alors au constructeur le choix de l'éolienne et de ses caractéristiques, dont sa masse.

2.5 Montrer que, pour le flotteur de l'éolienne *Floatgen*, la masse de l'éolienne seule, notée $m_{\text{éolienne}}$, ne peut être supérieure à $1,51 \times 10^3 \text{ t}$.

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 4 sur 11

Une éolienne flottante est le siège de phénomènes vibratoires, notamment dus à la rotation de ses pales et à l'effet de la houle sur son flotteur. Selon les conditions hydrodynamiques sur son site d'exploitation, la fréquence de la houle (considérée ici comme une onde mécanique sinusoïdale) est dans un intervalle compris entre 0,05 Hz et 0,2 Hz.

2.6 Le constructeur a prévu un dispositif permettant d'assurer une fréquence propre minimale f_0 de l'édifice à 0,3 Hz ou plus. Justifier ce choix.

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 5 sur 11

Partie 3 – Protection des armatures du flotteur de l'éolienne *Floatgen*

Un rapport préliminaire du projet de l'éolienne *Floatgen*, précise qu'« une protection cathodique par anode sacrificielle sera appliquée pour protéger [de la corrosion] l'acier d'armatures [du flotteur], aux fissures et zones de carbonatation ».

Source : report on the requirements of the floating structure, *floatgen.eu*

Données :

Potentils standard d'oxydoréduction de quelques métaux :

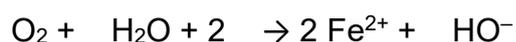
Nom du métal	Fer	Zinc	Nickel	Magnésium	Cuivre	Aluminium
Couple d'oxydoréduction	Fe ²⁺ /Fe	Zn ²⁺ /Zn	Ni ²⁺ /Ni	Mg ²⁺ /Mg	Cu ²⁺ /Cu	Al ³⁺ /Al
Potentiel standard à 25 °C E° (V)	- 0,44	- 0,76	- 0,23	- 2,36	+ 0,34	- 1,66

3.1 Définir la corrosion d'un métal.

3.2 Expliquer pourquoi le fer présent dans les armatures du béton du flotteur est soumis à la corrosion.

La corrosion du fer en milieu marin est une transformation chimique complexe en plusieurs étapes.

3.3 Recopier, en la complétant correctement, l'équation de réaction qui suit et qui modélise l'une des étapes de la corrosion du fer :



3.4 Expliquer le principe de la protection cathodique par anode sacrificielle.

Les anodes sacrificielles retenues pour protéger l'acier des armatures du flotteur de l'éolienne sont composées d'un alliage métallique.

3.5 Justifier, parmi les métaux du tableau des données (voir ci-dessus), ceux qui pourraient être retenus pour la fabrication des anodes sacrificielles.

Pour modéliser la protection cathodique en laboratoire, un courant de corrosion I_c est mesuré entre une électrode en fer à protéger et une électrode en zinc, placées dans un électrolyte s'approchant des conditions environnementales du site de l'éolienne (même salinité de l'eau que celle de l'océan Atlantique).

3.6 Schématiser et légender le montage réalisé en laboratoire, pour cette modélisation.

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 6 sur 11

3.7 Placer correctement sur le schéma de la question précédente le sens du courant, ainsi que les termes « anode » et « cathode ».

Pour protéger l'acier des armatures, les projets actuels de parcs éoliens « flottants » privilégient de plus en plus, le recours « au courant imposé » à la place « d'anodes sacrificielles ».

3.8 Justifier ce changement de méthode de protection.

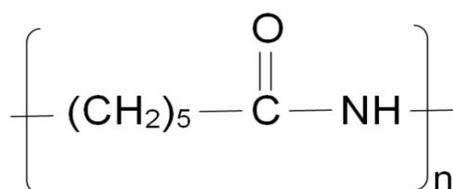
BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 7 sur 11

Annexe 1 – Quelques rappels

- Volume d'un cylindre : $\pi \times r^2 \times L$, avec r le rayon du cylindre et L sa longueur (ou hauteur). Le produit $\pi \times r^2$ est l'aire de la base du cylindre.
- Volume d'un parallélépipède rectangle « ouvert » à base carrée : $(a^2 - b^2) \times h$, avec a^2 l'aire de la base carrée sans l'ouverture, b^2 l'aire de l'ouverture carrée et h la hauteur du parallélépipède.
- Le degré moyen de polymérisation (sans unité) est le quotient de la masse molaire moléculaire moyenne du polymère par la masse molaire moléculaire du motif élémentaire.

Annexe 2 – Quelques données concernant la synthèse du nylon 6 ou PA 6

- Le polyamide 6 (PA 6), également appelé polycaprolactame, est obtenu par polymérisation du caprolactame.
- Ce polyamide est majoritairement utilisé pour la fabrication de fibres, de cordes et de produits nécessitant des matériaux de haute résistance.
- Formule semi-développée du nylon 6 :

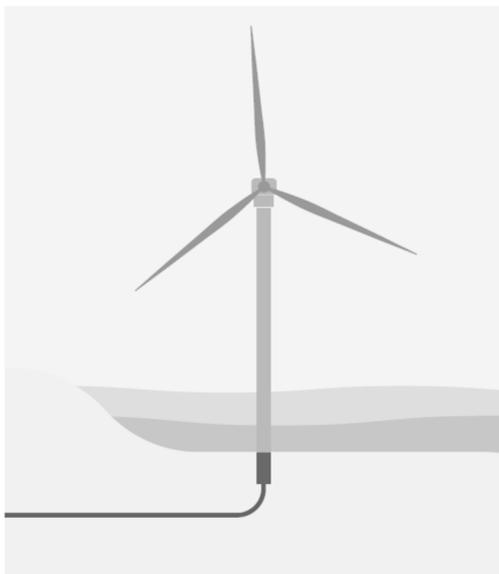


- Fiche signalétique du caprolactame :

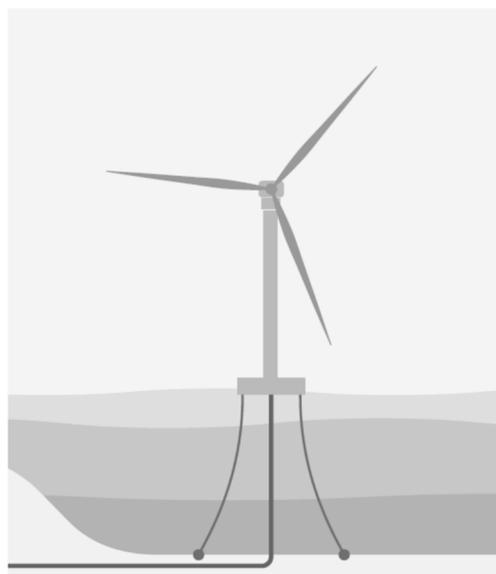
Mises en garde	Formule chimique	Pictogramme étiquette
Nocif en cas d'ingestion (H302) Nocif par contact cutané (H312) Provoque une sévère irritation des yeux (H319)	$\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}$	

Source : cnesst.gouv

Annexe 3 – Qu'est-ce qui distingue l'éolien *flottant* de l'éolien offshore traditionnel encore appelé éolien *posé* ?



Éolien *posé*



Éolien *flottant*

« L'éolien *posé* compte aujourd'hui plus de 3600 machines en service dans le monde, quasi-exclusivement en Europe du nord. Mais on ne peut pas installer de tels parcs au-delà de 40 mètres de profondeur et la plupart des sites propices ont déjà été développés ou sont en cours de développement. Le « flottant » offre une nouvelle frontière, car il permet de s'affranchir de toute contrainte de profondeur. On peut donc ouvrir le marché de l'éolien en mer à tous les pays du monde, et non plus seulement à quelques zones peu profondes concentrées pour l'essentiel dans les eaux européennes.

Le flottant permet aussi d'exploiter au mieux les ressources offertes par le vent, sur les sites plus éloignés des côtes, là où les gisements éoliens sont les meilleurs.

Et puisqu'on s'éloigne du littoral, on résout les problèmes liés à la pollution visuelle et aux conflits d'usage, par exemple avec les pêcheurs.

Enfin, sur le plan industriel, l'un des grands atouts de cette technologie est de pouvoir réaliser presque tous les travaux à terre. Contrairement à l'éolien *posé*, il n'y a plus à utiliser des navires d'installation, coûteux, soumis aux aléas météo et qu'il faut réserver longtemps à l'avance (...) ».

Source : meretmarine.com

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 9 sur 11

Annexe 4 – Données clés du projet Floatgen

<i>Fondation flottante</i>	Flotteur de 36,0 mètres de côté et de 9,50 mètres de haut. Tirant d'eau (hauteur immergée du flotteur) T_i : 7,50 mètres. Équipée du système Damping Pool® d'Ideol et construite en béton armé précontraint par Bouygues TP.
<i>Éolienne</i>	Modèle Vestas V80 de 2,00 MW. Diamètre de rotor : 80,0 mètres. Hauteur de mât incluant la pièce de transition : 60,0 mètres.
<i>Système d'ancrage</i>	Ancrage semi-tendu. 6 lignes en fibre synthétique (nylon), de 400 m à 600 m de long.
<i>Site d'installation</i>	Installation sur le premier site d'essais connecté au réseau multi-technologies SEM-REV, opéré par Centrale Nantes et le CNRS au Croisic.
<i>Profondeur et distance de la côte</i>	33,0 mètres de fond. 12,0 miles nautiques du rivage (22,0 kilomètres).
<i>Conditions météo-océaniques</i>	Conditions particulièrement difficiles avec une hauteur maximale de vague (autrement appelée H_{max}) de 16,0 mètres.

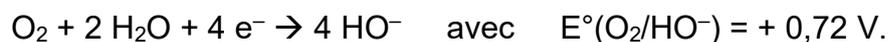
Source : floatgen.eu

Annexe 5 : la corrosion du fer en milieu marin

En raison de sa basicité (pH de l'ordre de 13), le béton sain est un milieu naturellement protecteur pour les armatures autour desquelles se forme un film passif (solution solide $Fe_3O_4 - Fe_2O_3$) qui réduit la vitesse de corrosion à une valeur négligeable.

Dans certaines conditions, comme la carbonatation du béton ou une teneur critique en chlorures, cet équilibre peut être rompu en entraînant une dépassivation de l'acier et l'amorçage d'un phénomène de corrosion. Dans les deux cas, la destruction du film passif et la dégradation du métal mettent en jeu un mécanisme de piles électrochimiques avec des zones anodiques, des zones cathodiques et un milieu électrolytique constitué par la solution interstitielle du béton. Au niveau de l'anode, le métal est oxydé avec production d'électrons qui sont « consommés » au niveau de la cathode, par réduction du dioxygène, cette réaction entraînant la « libération » d'ions hydroxyde OH^- .

Dans un environnement marin, la réduction du dioxygène peut se modéliser par la demi-équation électronique suivante :



Les ions hydroxydes réagissent ensuite avec les ions ferreux Fe^{2+} produits au niveau de l'anode pour former, en présence de dioxygène, des oxydes et hydroxydes de fer, en un mélange complexe communément appelé *rouille*, avec une augmentation importante de volume. Elle entraîne donc une réduction de la section efficace des armatures pouvant occasionner une diminution de la capacité portante des ouvrages ou parties d'ouvrages.

Dans tous les cas, la corrosion ne peut se développer qu'en présence de dioxygène.

Source : lerm.fr

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 10 sur 11

Annexe 6 – Une protection cathodique plus « vertueuse »

La protection cathodique des fondations du parc éolien en mer des îles d'Yeu et de Noirmoutier, envisagée jusqu'au mois de mars 2018, consistait à placer des anodes dites « sacrificielles » – majoritairement composées d'aluminium – sur les fondations en treillis métalliques.

Si les anodes sacrificielles, dont l'impact sur l'environnement est faible et maîtrisé, sont une technologie éprouvée et largement répandue, la concertation avec le grand public et les associations environnementales a amené *Éoliennes en Mer Iles d'Yeu et de Noirmoutier* (EMYN) à lui préférer un système de protection par « courant imposé » qui permet d'éviter le rejet de sels métalliques dans l'environnement.

Pour fonctionner, le système de protection cathodique par courant imposé utilise une tension de 6 V. Le champ magnétique induit par cette technique est très faible et donc sans danger pour la faune et la flore marine qui pourraient coloniser les fondations.

Source : www.energiesdelamer.eu

BTS TRAVAUX PUBLICS		Session 2023
U32 – Sciences physiques appliquées	23TVE3SC1	Page 11 sur 11