

Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore



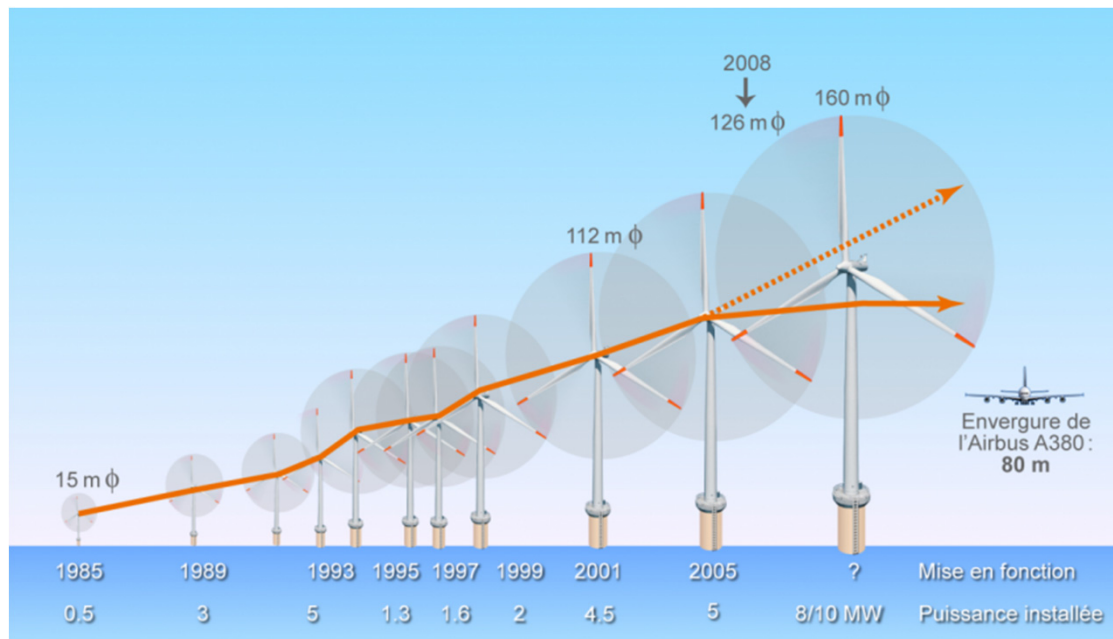
Fonctionnement des éoliennes offshore: charges, sollicitations, interaction sol-structure

F. ROPERS

EOLIENNE OFFSHORE FIXE

Typiquement à **axe horizontal** et **3 pales** (meilleur compromis entre vitesse de démarrage et rendement) - Taille des pales : 70 à 80m pour 8MW.

Même allure qu'en terrestre mais conception technique différente adaptée au **milieu marin** surtout vis-à-vis des fondations (corrosion, houle, courant,...)



Vitesse de vent:

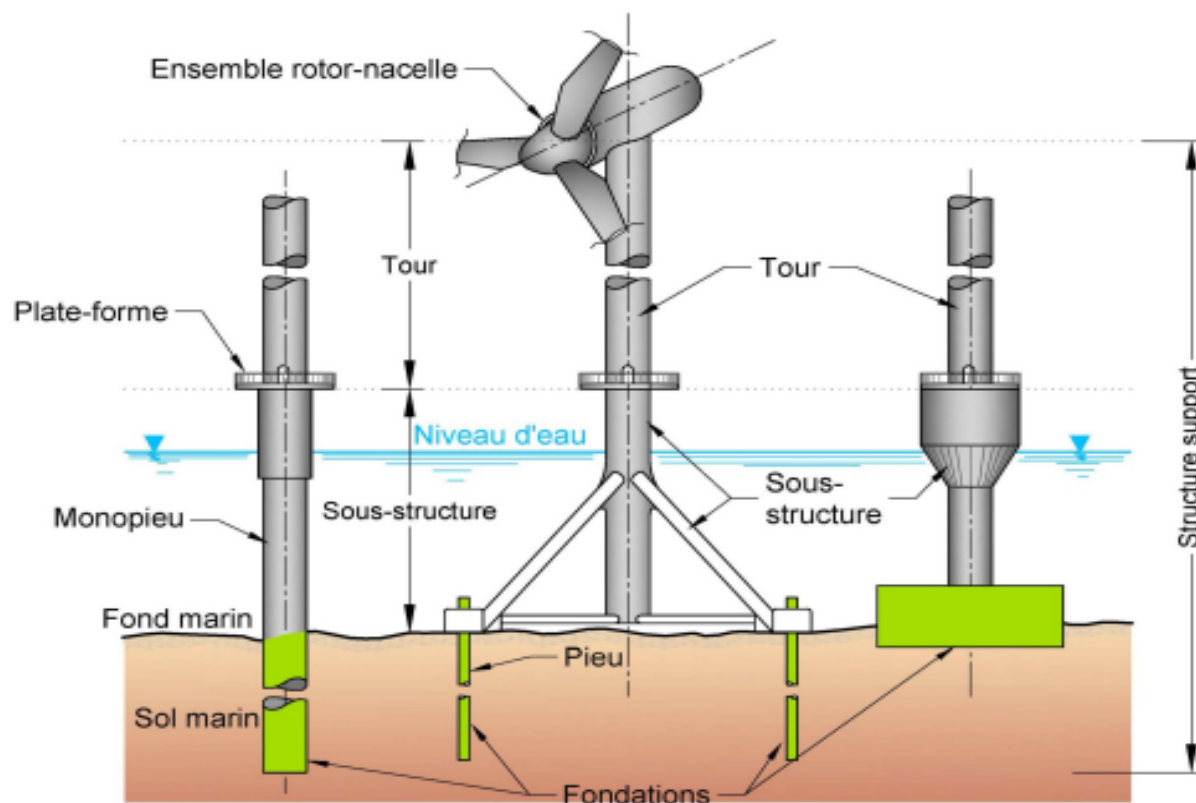
- 3 à 5m/s démarrage,
- 10 à 12m/s production nominale,
- 25 à 30m/s coupure (mise en drapeau),

Régime permanent:

- asservissement du rotor
- rotation des pales constante entre 6 et 16 tours/mn (0,10 à 0,27 Hz)

But de l'asservissement : limiter les effets nocifs (turbulences, vortex, accélérations excessives...) pour la fiabilité et le rendement de l'éolienne.

STRUCTURE SUPPORT D'UNE EOLIENNE



Monopieu

Pieux pour
multipodes

Embase
gravitaire

Se décompose en 3 éléments:

- La **tour** ou **mât** portant l'assemblage rotor+nacelle;
- La **sous-structure** située entre la bride (pièce de transition) et la fondation;
- La **fondation**, posée sur ou ancrée dans le sol marin.

Choix des sous-structures et fondations = exercice multi critères (techniques, environnementaux, socio-économiques)

CHARGES : TYPES DE CHARGES

- **Charges permanentes G** : poids propre, masse des équipements, lests permanents, dispositifs anti-affouillement, concrétions marines, pressions hydrostatiques, poussées hydrostatiques...
- **Charges d'exploitation Q** : charges d'accostage et d'amarrage, charges temporaires d'intervention (personnel, matériel)
- **Charges variables et d'environnement E** : vent (y compris action sur les pales, rotor et nacelle), neige et glace, courant, houle et vagues, poussée hydrostatique (marée), poussée de dépôts de sédiments, poussée des glaces de mer
- **Charges accidentelles A** : collision avec la structure (éléments internes ou externes), rupture, explosion ou feu, rupture d'un lest...
- **Charges de déformation D** : charges causées par des déformations imposées (variations de température, tassements des fondations)
- **Charges sismiques S** : non traitées dans le document

TRAITEMENT DES CHARGES CYCLIQUES

Les fondations des éoliennes offshore sont soumises à des charges cycliques:

- chargements transmis par la turbine en opération, dominés par les conditions de vent;
- chargements dominés par les conditions de houle.

Les histogrammes des charges transmises présentent:

- des charges d'amplitude non régulière;
- une distribution plus ou moins aléatoire dans le temps.

Mais la caractérisation des sols sous chargement cyclique par essais de laboratoire est basée généralement sur des séries de cycles réguliers (amplitude et fréquence constantes) \Rightarrow nécessité de traiter les charges cycliques suivant les méthodes présentées dans l'exposé d'Alain Puech « Prise en compte des chargements cycliques avec application aux embases gravitaires ».

INTERACTION SOL-STRUCTURE

Le calcul des charges et sollicitations d'une éolienne dépend de :

- la dynamique globale de la structure;
- des interactions entre sol et structure.

Ce couplage est à prendre en compte à toutes les étapes du projet (même dans les étapes préliminaires)

Analyse dynamique : modèle tridimensionnel utilisé

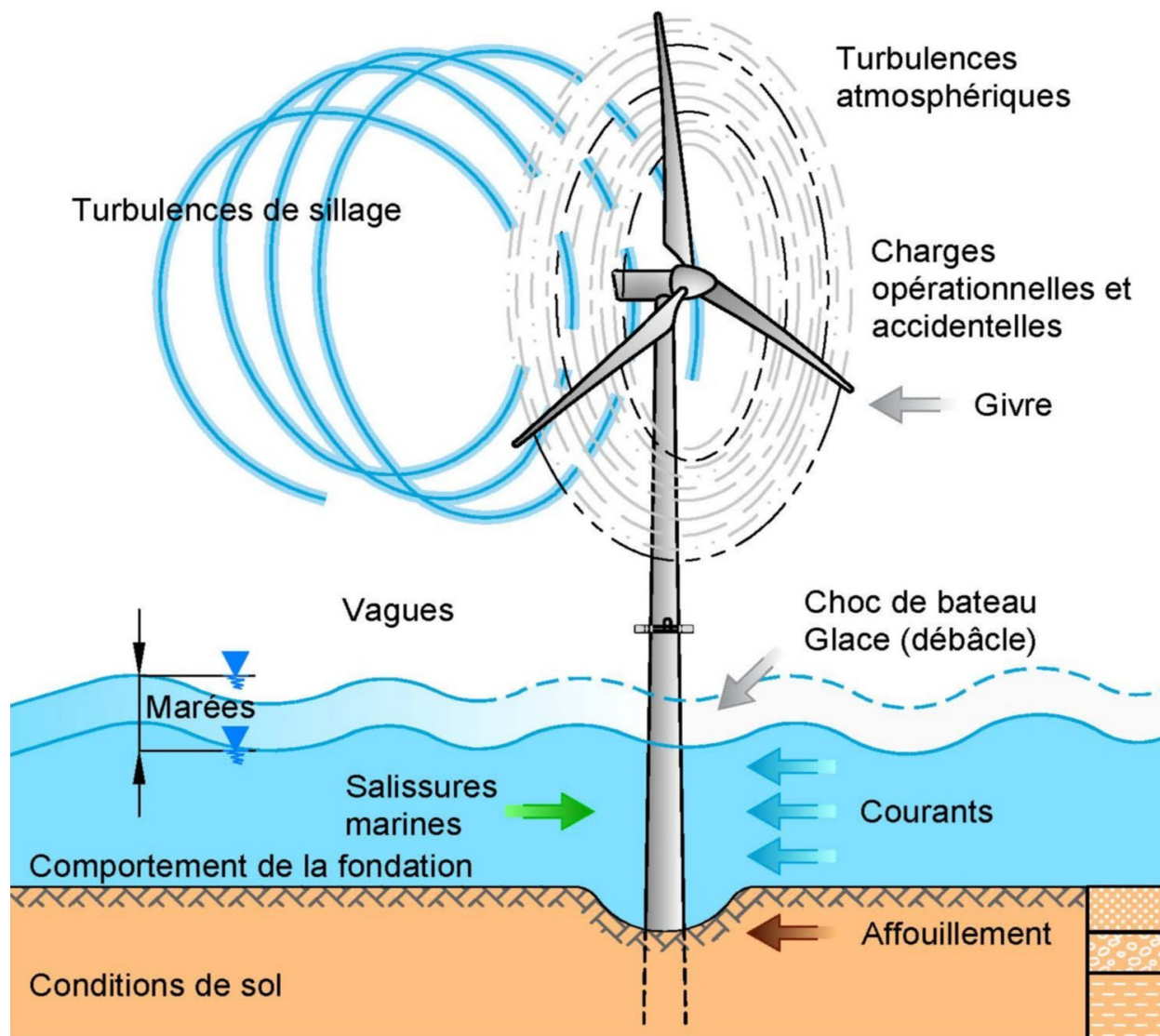
- dans le domaine fréquentiel (analyse des fréquences);
- et dans le domaine temporel (calcul des charges).

Le modèle 3D comprend :

- les composants de la structure (nacelle, rotor, sous-structure et fondation);
- le sol;
- les actions environnementales (vents, vagues, courants...)

Point clé pour la conception des structures : la modélisation du sol (en particulier raideur et amortissement).

MODELISATION 3D



MODELISATION DU SOL

- **Modélisation fréquente :**
 - ▣ Pieux et monopieux : Courbes d'interaction du type p-y (transversal) ou t-z (axial);
 - ▣ Embases gravitaires : matrices globales de masse et rigidité.

- **Ou modélisation EF de la structure et du sol**

- **Amortissements dus au sol (hystérétique et radiatif) modélisés par :**
 - ▣ Amortissement modal;
 - ▣ Ou matrice globale d'amortissement.

MODELISATION DU SOL

- **Analyses modales spectrales (calculs fréquentiels) : modèle purement élastique linéaire**
 - ▣ Nécessité de linéariser le sol;
 - ▣ Linéarisation représentative des déformations du sol pour la sollicitation considérée;
 - ▣ Couvrir la plage de variabilité du sol et les incertitudes (bornes haute et basse).
- **Calculs temporels de chargement : non-linéarités du sol prises en compte**
 - ▣ Courbes d'interaction;
 - ▣ Ou modélisations élasto-plastiques.
- **Calculs fréquentiels et temporels faits sans application de coefficients partiels de charge ou de matériau**

CALCULS ET SIMULATIONS

Deux objectifs :

- **Éviter les problématiques de résonance** : en régime permanent, les fréquences propres de la structure doivent être éloignées des fréquences d'excitation provenant essentiellement :
 - de la rotation des pales (fréquence fondamentale et harmoniques);
 - de l'action des vagues;
- **Déterminer les charges agissant sur l'éolienne et sa fondation**, cf NF EN 61400-3 (2009) et DNVGL-ST-0437 (2016), avec modélisation précise :
 - des efforts hydrodynamiques définis pour différents états de mer (vagues, houle, courants, niveaux,...);
 - des efforts de vent définis pour prendre en compte divers phénomènes (vitesses et distributions de vent, turbulences aérodynamiques, rafales, effet de sillage,...).

ANALYSE DES FREQUENCES DUES AU VENT

Fréquences d'excitation (fondamentales et harmoniques) nommées d'après la vitesse de rotation du rotor :

- 1P = fréquence de rotation du rotor (en tour par seconde ou Hz);
- 3P = 3 fois la vitesse de rotation (fréquence de passage d'une pale devant la tour pour une turbine à 3 pales)
- 6P, 9P, ...

«Vibrations» périodiques liées aux phénomènes suivants :

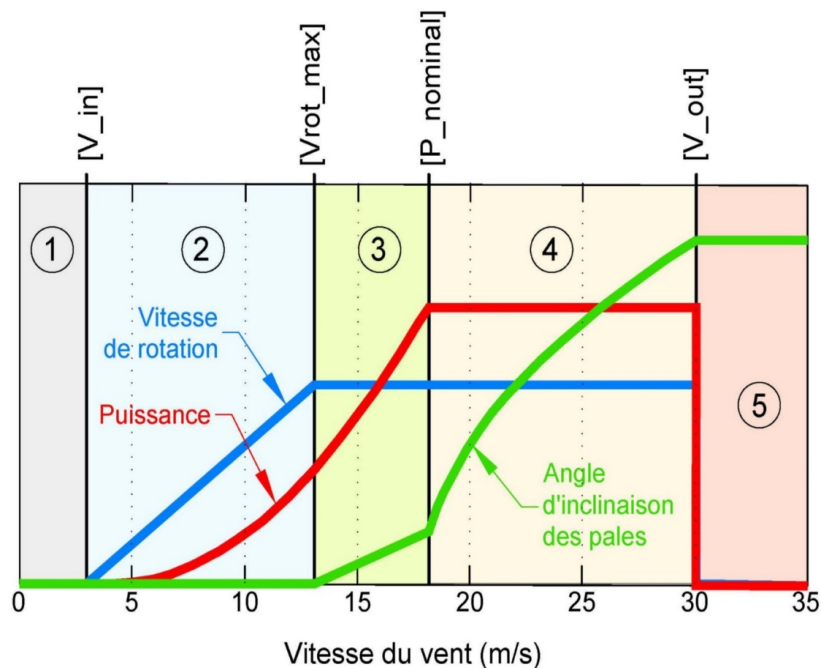
- Déséquilibre du rotor : le centre de gravité du rotor ne se trouve pas sur l'axe de rotation, d'où un effort excentré se produisant à chaque tour (1P);
- Passage de pales devant la tour : variation de pression au passage d'une pale devant la tour (effet de masque) d'où une impulsion sur le rotor 3 fois par tour (3P);
- Gradients de vents : distribution de vent non uniforme, le centre de poussée n'est pas centré sur l'axe du rotor, d'où une impulsion 3 fois par tour (3P),

L'harmonique 6P peut poser des problème de fatigue.

Peu d'effets des fréquences supérieures à 2Hz (faibles amplitudes).

L'analyse des fréquences doit être faite en phases transitoire et permanente

FONCTIONNEMENT SIMPLIFIE

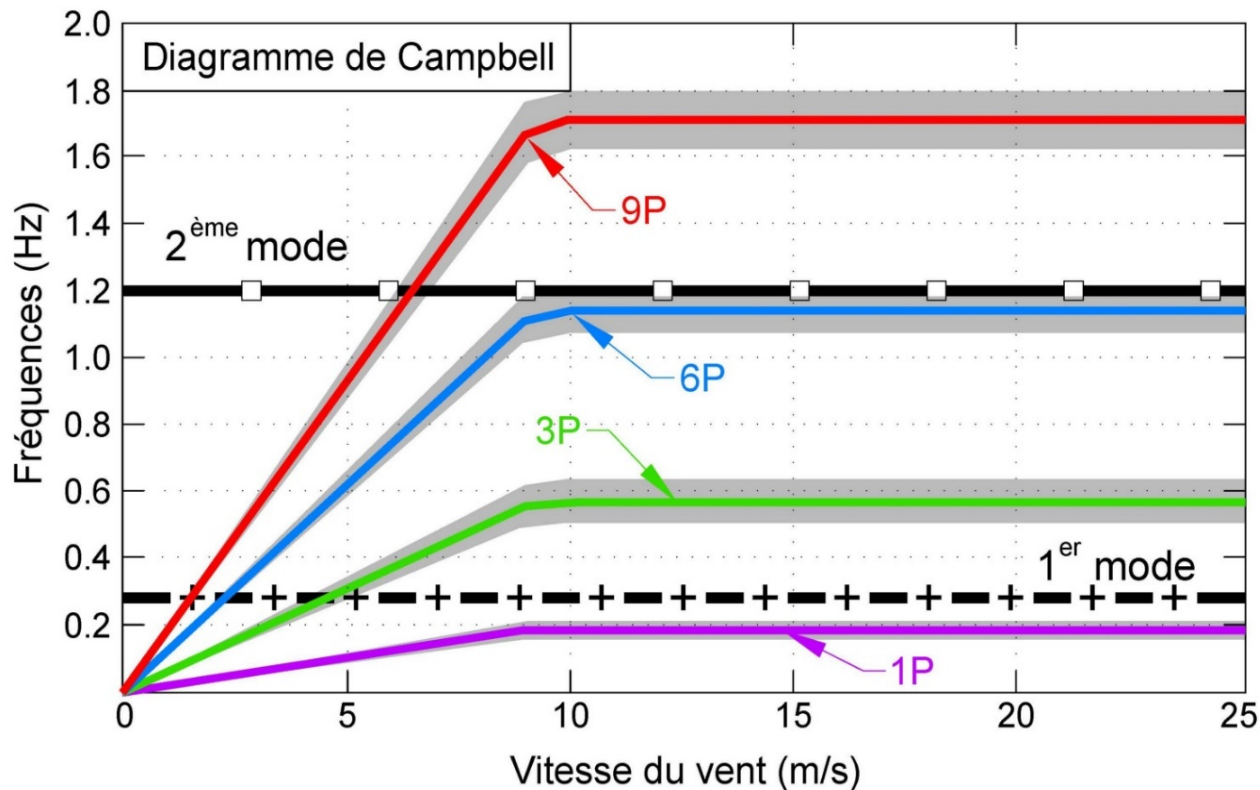


- ① Pas assez de vent, l'éolienne est à l'arrêt
- ② A partir de $[V_{in}]$, l'éolienne peut produire. Sa vitesse de rotation varie avec la vitesse du vent.
- ③ A partir de $[V_{rot_max}]$, la vitesse de rotation reste constante et les pales commencent à s'incliner pour continuer d'augmenter la puissance.
- ④ A partir de $[P_{nominal}]$, l'inclinaison des pales suit une autre loi de comportement pour garder la puissance nominale constante.
- ⑤ A partir de $[V_{out}]$, l'intensité du vent est trop forte pour la production et risquerait d'endommager l'éolienne. Celle-ci s'arrête et se met "en sécurité" le temps de la tempête.

Deux situations à prendre en compte, gérées par le contrôleur de la turbine (asservissement) :

- Phase transitoire (étape 2) : fréquence non constante, possibilité de croiser les plages de fréquence à éviter, d'où vitesse de rotation et couple modifiés par le contrôleur pour sortir très rapidement de cette zone dangereuse;
- Phase permanente (étapes 3 et 4) : la turbine fonctionne à vitesse nominale, le contrôleur modifie l'inclinaison des pales pour assurer une vitesse de rotation (fréquence) constante.

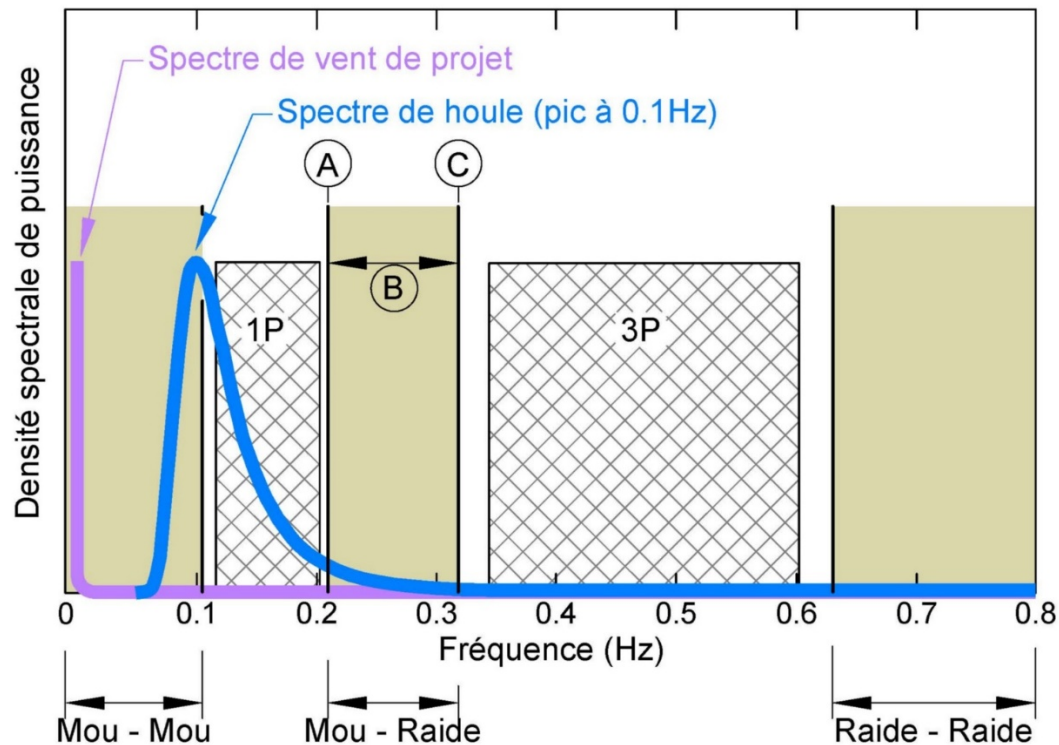
FUSEAUX DE FREQUENCE - EXEMPLE



Fuseaux de fréquences à éviter et fréquences des deux premiers modes de la structure:

- en régime permanent le premier mode échappe aux fuseaux 1P et 3P, mais le fuseau 6P excite le second mode;
- en phase transitoire, le premier mode traverse les fuseaux 1P, 3P, 6P; situation gérée par le contrôleur de la turbine.

SPECTRE DE FONCTIONNEMENT



Phase permanente - Choix du type de structure pour éviter les plages de fréquences nocives

- Structure raide sur sol raide
- Structure souple sur sol mou
- Choix de structure raide ou souple en anticipant l'évolution du sol

- (A) Meilleur dimensionnement possible en cas de risque d'écrouissage du sol (accroissement de raideur)
- (B) Meilleur dimensionnement possible en cas d'incertitude sur le comportement du sol à long terme
- (C) Meilleur dimensionnement possible en cas de risque de ramollissement du sol (perte de raideur)

CAS DE CHARGE - (Design Load Cases, DLC)

Décrivent toutes les configurations à laquelle est soumise l'éolienne pendant sa durée de vie (20 ans) - NF EN 61400-3 (2009) et DNVGL-ST-0437 (2016)

- **production ;**
- **production avec défaut ;**
- **démarrage ;**
- **arrêt normal ;**
- **arrêt d'urgence ;**
- **rotor arrêté (immobile ou ralenti) ,**
- **rotor arrêté avec défaut ;**
- **transport / assemblage / maintenance / réparation.**

CAS DE CHARGE - (Design Load Cases, DLC)

Pour chaque état, plusieurs cas de chargement - Exemple DLC 2.1

Situation conceptuelle	DLC	Condition de vent	Vagues	Directions du vent et des vagues	Courants marins	Niveau de la mer	Autres conditions	Type d'analyse	Facteurs de sécurité partielle
2) Production d'électricité plus surveillance de la panne	2.1	NTM $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$	NSS $H_s = E[H_s V_{hub}]$	COD, UNI	NCM	MSL	Panne du système de commande ou perte du réseau électrique	U	N

Situation conceptuelle

Production

Cas de chargement

2.1

Condition de vent

Modèle de Turbulence Normale (Normal Turbulence Model - NTM) ; vitesses de vents comprises entre vitesse de démarrage et vitesse d'arrêt.

Condition de vagues

Etat de Mer Normal (Normal Sea State - NSS)

Direction de vent et de vagues

Co-directionnel (COD) et Uni-directionnel (UNI)

Condition de courants

Modèle de Courant Normal (Normal Current Model - NCM)

Niveau d'eau

Niveau d'Eau Moyen (Mean Sea Level - MSL)

Autres conditions

Défaut du système de contrôle ou perte du réseau électrique

Type d'analyse

Ultime

Facteur de sécurité partielle

N (Normal - dans ce cas égal à 1,35)

BOUCLES DE CALCUL - REGROUPEMENTS

Pour chaque cas de charge, variation de plusieurs paramètres (directions et vitesses des vents, direction des vagues,...).
D'où un très grand nombre de simulations (> 1 000).

Calculs itératifs (boucles de calcul) sur modèle 3D complet menés en // par :

- le turbinier (nacelle et tour) ;
- le concepteur de la fondation (sous-structure et fondation).

But = Compatibilité des charges avec dynamique et conception optimisée de l'ouvrage dans sa globalité.

Optimisation économique du projet en regroupant (« clusters ») les éoliennes sur 2 critères principaux :

- hauteur d'eau ;
- données géotechniques.

BOUCLE DE CALCUL TYPE

ETAPE 0

Turbinier

- Données de vent
- Tour standard
- Fondation rigide

Charges génériques V_0 en pied de mât

ETAPE 1

Turbinier
Concepteur

- Charges V_0
- Conditions marines
- Conditions géotechniques disponibles

Dimensionnement tour + sous-structure + fondation: éviter plages d'excitation de la turbine
Concept V_1

ETAPES 2 à N

Turbinier
Concepteur

- Conditions de vent
- Conditions marines
- Conditions géotechniques réactualisées et affinées
- Dimensionnement N-1

Charges appliquées à la structure

Redimensionnement éventuel – Concept V_N

VERIFICATIONS - PRINCIPES

Portent essentiellement sur le comportement du système étudié (structure et fondation) en phase opérationnelle.

Etats limites :

- ELU : perte de performance (perte de résistance, perte d'équilibre,...);
- ELS : critères d'exploitation non satisfaits (flèches, déplacements de la structure, vibrations excessives, surface comprimée,...);
- ELF : possibilité de rupture des éléments structuraux (y compris fondation) sous l'effet répétitif des charges cycliques;
- ELA : événements accidentels (chocs de bateau, accident d'exploitation,...)

Principe des vérifications : méthode des facteurs partiels

- facteurs de charge γ_F , de résistance γ_R et de matériau γ_M appliqués aux valeurs caractéristiques des charges et résistances;
- valeurs caractéristiques de résistance établies suivant les recommandations du chapitre 6 (tableaux 6.1 à 6.3).

SOLLICITATIONS DE CALCUL

Sollicitations de calcul = combinaison des différents cas de charge (G, Q, E, A, S, D) affectés de facteurs partiels γ_F .

Charges environnementales

ELU : 2 types

- ELU normal;
- ELU anormal (conditions opératoires anormales, comme cumul de défauts dans le système de sécurité, ou combinaison d'un vent extrême avec une panne de réseau) .

ELS : 3 cas spécifiques à considérer pour l'étude des fondations:

- Passage de **la** charge extrême caractéristique;
- Cas de charge LDD 10^{-4} : niveau de charge dépassé durant 0,01% de la durée de vie de la structure (17,5 heures en 20 ans)
- Cas de charge LDD 10^{-2} : niveau de charge dépassé durant 1% de la durée de vie de la structure (1750 heures en 20 ans)

Tous les cas de charge DLC associés à des ELU normaux peuvent être utilisés pour caractériser des ELS rares (γ_F passe de 1,35 à 1,00).

FACTEURS PARTIELS SUR LES CHARGES

Etats Limites	Charges de nature environnementale : E	Charges permanentes : G, Q	Autres charges : A, D
ELU	1,35*	Favorable : 0,90**	1,00
ELUa	1,10	Défavorable : 1,10**	1,00
ELS	1,00	1,00	1,00
ELF	1,00	1,00	1,00
ELA	1,00	1,00	1,00

* hors DLC particuliers : DLC 1.1 et DLC 2.5

** 1,00 sous certaines conditions

VERIFICATIONS - FONDATIONS

Vérifications usuelles sous chargement quasi-statique

- sollicitation de calcul S_d inférieure ou égale à la résistance de calcul R_d ;
- **approche a)** : $R_d = R_{ks} / \gamma_R$, R_{ks} résistance caractéristique statique calculée à partir de la résistance caractéristique du matériau sol;
- **approche b)** : R_d établie à partir de la résistance de calcul statique σ_d du matériau sol, avec $\sigma_d = \sigma_{ks} / \gamma_M$ et σ_{ks} résistance caractéristique statique du matériau sol.

Vérifications sous charges cycliques

- les résistances caractéristique statiques sont remplacées par les résistances caractéristiques cycliques (résistance dégradées correspondant à l'évènement cyclique considéré);
- la dégradation due aux cycles est évaluée à partir des charges **non pondérées** caractérisant l'évènement cyclique de calcul.

Facteurs partiels de résistance γ_R et de matériau γ_M

- Ce sont les mêmes pour les vérifications sous charges statiques et cycliques.

FACTEURS PARTIELS : RESISTANCE ET MATERIAU

Pieux tubulaires battus (sols conventionnels) et monopieux

Mode de chargement	Méthode d'analyse	Etat limite	
		ELU	ELS / ELA
Axial	Calcul du frottement latéral limite et de l'effort de pointe limite à partir de X_k .	$\gamma_R = 1,25$	$\gamma_R = 1,00$
Transversal	Contraintes effectives	$\gamma_M = 1,15$	$\gamma_M = 1,00$
	Contraintes totales	$\gamma_M = 1,25$	$\gamma_M = 1,00$

Embases gravitaires

Méthode d'analyse	Etat limite		
	ELU (stabilité)	ELA (stabilité)	ELS (tassements)
Contraintes effectives	$\gamma_M = 1,15$	$\gamma_M = 1,00$	$\gamma_M = 1,00$
Contraintes totales	$\gamma_M = 1,25$	$\gamma_M = 1,00$	$\gamma_M = 1,00$

POINTS IMPORTANTS

Bon fonctionnement de la turbine: critères fixés par le turbinier

- fréquences d'excitation 1P et 3P à éviter;
- inclinaison maximale permanente de $0,5^\circ$ pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Vérifications ELS et ELF souvent dimensionnantes, plutôt que les ELU.

Point clé du dimensionnement: interaction sol-structure, avec caractérisation la plus réaliste possible des modules et amortissements du sol dès les premières phases du projet.

Prise en compte des chargements cycliques

- Influence sur le radoucissement ou le raidissement des modules en fonction du temps (incidence sur les fréquences et les vérifications ELF)
- Influence sur les résistances (dégradation) et incidence sur les vérifications ELU

Modification des raideurs lors du décollement d'une embase gravitaire.

Merci de votre attention

