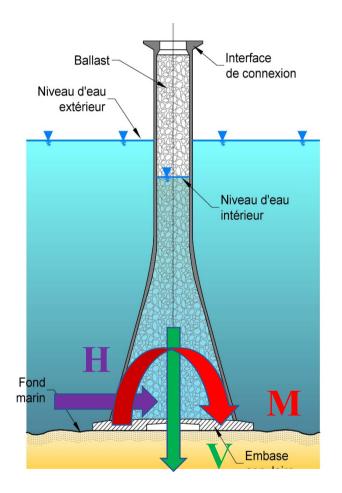
Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d'éoliennes offshore



Prise en compte des chargements cycliques avec application aux embases gravitaires

A.PUECH

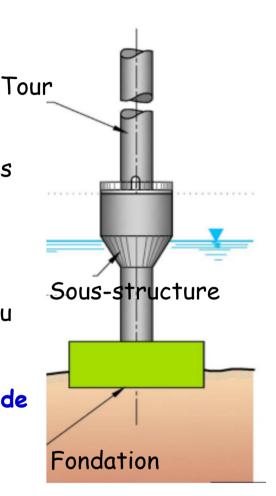
EMBASES GRAVITAIRES



La stabilité est assurée par leur poids propre et celui des éléments supportés.

Le radier, base de la fondation, est généralement de forme circulaire, pleine ou annulaire.

Le diamètre du radier est de 20 à 35 m.



EFFET DES CHARGES CYCLIQUES

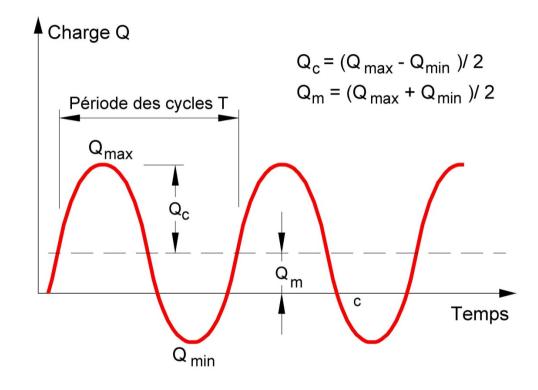
L'effet des charges cycliques doit être pris en compte :

- Aux ELU: l'accumulation de pressions interstitielles et/ou de déformations sous la fondation peut générer une dégradation de la résistance du sol;
- Aux ELS: les cycles sont susceptibles de générer une accumulation des déformations permanentes et une modification des modules de déformation;
- Aux ELF: les cycles affectent la valeur des modules de déformation.

La référence aux recommandations SOLCYP (2017) est déterminante dans les procédures de traitement des charges et d'établissement des modèles cycliques

CARACTERISATION DES CHARGES CYCLIQUES

Chargements réguliers



Qm: Charge moyenne ou composante moyenne de la charge cyclique

Qc: composante cyclique = demi-amplitude de la charge cyclique

Qmin: charge cyclique minimale (Qmin = Qm - Qc)

Qmax: charge cyclique maximale (Qmax = Qm + Qc)

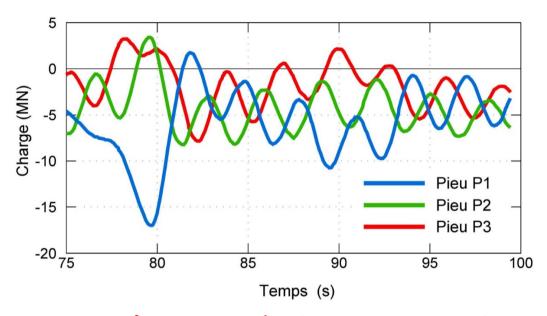
T: période des cycles (T= 1/f)

N : nombre de cycles

Chargements <u>répétés</u> (1-way) : Qc < Qm Chargements <u>alternés</u> (2-way): Qc > Qm

CARACTERISATION DES CHARGES CYCLIQUES

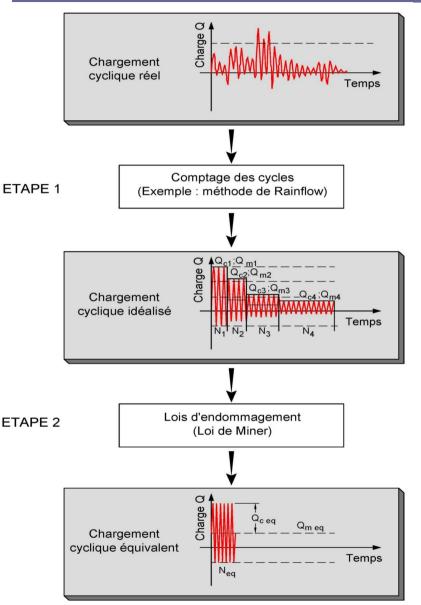
Charges axiales extrêmes transmises à la tête des 3 pieux de fondation d'une éolienne (tripode).



Les chargements cycliques doivent être traités (SOLCYP, 2017).

La <u>première étape</u> consiste à transformer le chargement irrégulier en séries de chargements réguliers par une méthode de comptage « en cascade » (Rainflow analysis).

CARACTERISATION DES CHARGES CYCLIQUES



CFMS Fondations d'éoliennes offshore

Cette première étape est indépendante de la nature du sol (comptage de cycles)

Le chargement <u>idéalisé</u> est composé de i séries de Ni cycles chacune, et d'amplitude constante

La <u>deuxième étape</u> consiste à trouver le nombre de cycles équivalent Neq. Neq: nombre de cycles d'amplitude maximale provoquant le même endommagement que l'évènement cyclique complet Cette étape est fonction de la réponse

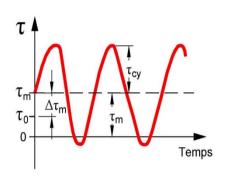
Cette étape est fonction de la réponse du sol (voir plus loin)

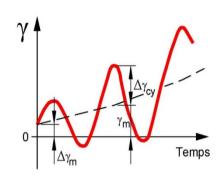
> Conditions de drainage

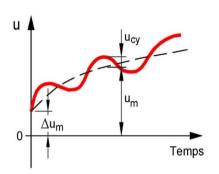
Les analyses de capacité portante doivent se faire en conditions non drainées, notamment en phase d'études préliminaires.

Pour justifier des analyses de capacité portante en conditions drainées ou partiellement drainées, des études spécifiques de dissipation des pressions interstitielles dans le massif de sol sont nécessaires, prenant en compte les perméabilités, les conditions aux limites, les vitesses de chargement. Ce type d'analyse n'est envisageable qu'en phase d'étude de détail.

Essais cycliques Non Drainés de cisaillement en laboratoire





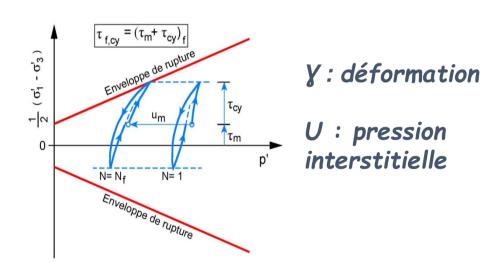


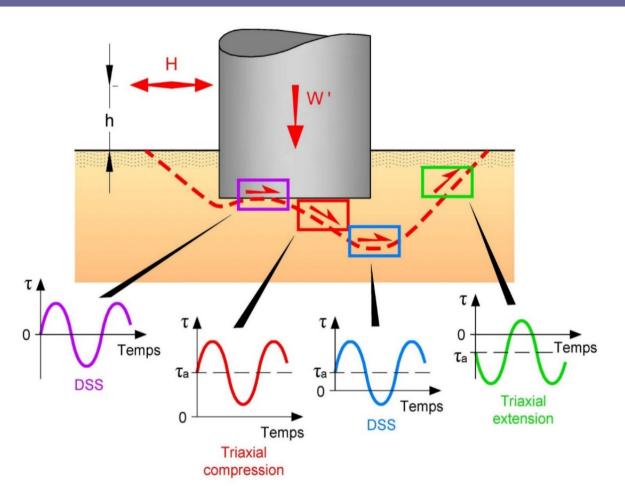
Résistance au cisaillement cyclique :

$$Tf,cy = (Tm + Tcy)f$$

Dépend de :

- Valeurs de Tm et Tcy:
- Mode de chargement (cisaillement simple, compression, extension)
- Histoire du chargement (Nf, fréquence)



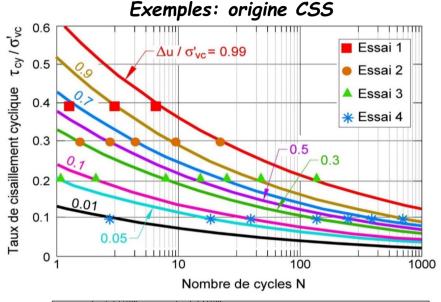


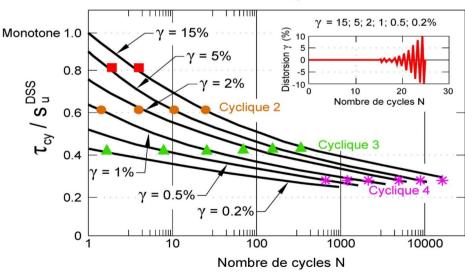
Les essais de laboratoire doivent reproduire les modes de sollicitation du sol sous la fondation: essais CSS, TXC, TXE

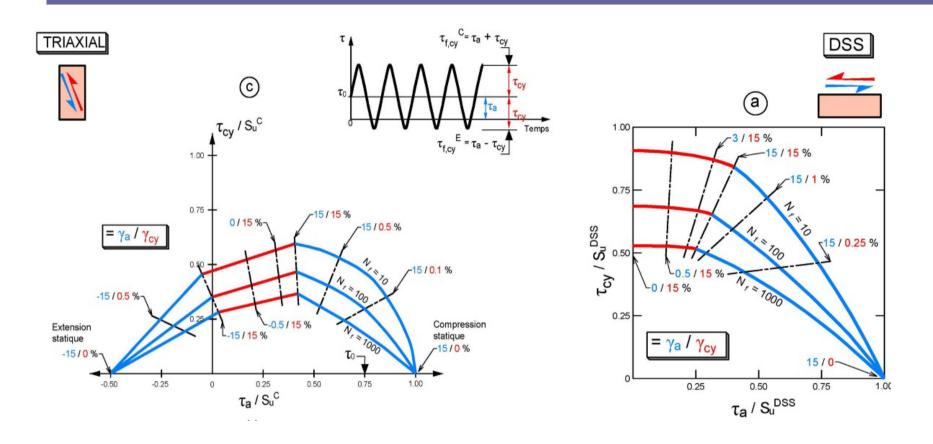
Résultats interprétés sous la forme de diagrammes contours :

- Pressions interstitielles (sables) CSS et TXc

Distorsions (argiles) CSS et TXc

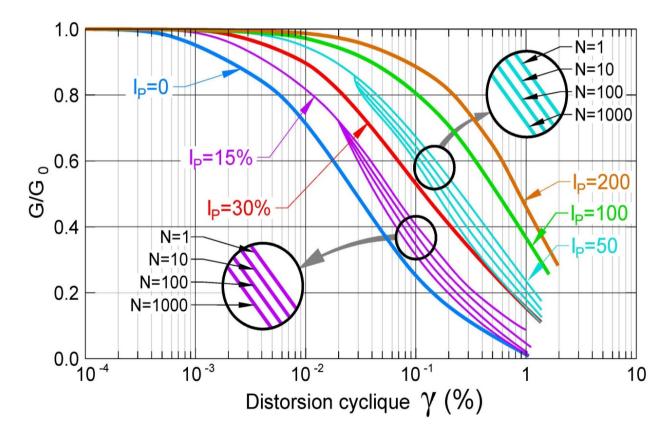






Diagrammes contours de résistance pour les modes DSS et Triaxiaux

Variations de G/G_0 en fonction de la distorsion et du nombre de cycles

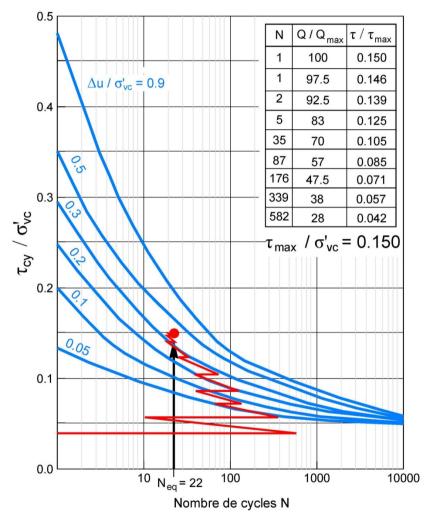


En chaque point du massif :

- Analyse des contraintes moyennes et cycliques induites par le chargement idéalisé
- Application des paquets de contraintes cycliques par ordre croissant d'amplitude (en Y ou en U)

Principe d'accumulation de l'endommagement

 Obtention de Neq = nombre de cycles qu'il aurait fallu appliquer au dernier paquet pour obtenir un endommagement similaire à celui de l'évènement complet.



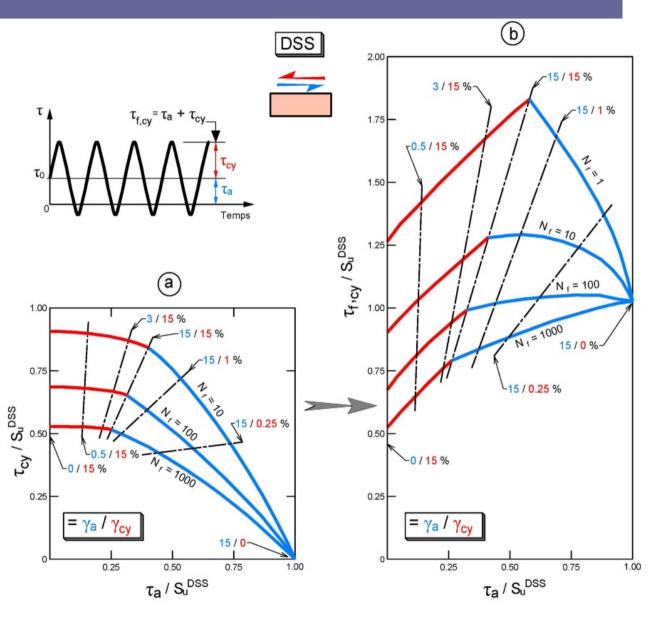
Exemple pour CSS: Tm = 0

En chaque point du massif:

Pour Tm (= Ta) et Tcy correspondant à l'effort maximal,

• et pour la valeur de Neq obtenue précédemment,

• on peut déterminer la 🖁 résistance cyclique du sol à partir du diagramme ci-contre.



Etudes détaillées

La méthodologie proposée ci-dessus n'est en pratique rigoureusement applicable qu'au stade de l'étude de projet, lorsqu'on dispose de la totalité des informations nécessaires (histoire des chargements et modèle cyclique de sol).

Le dimensionnement final doit prendre en compte l'historique de chargement spécifique au site étudié pour la tempête de référence. Sur les côtes françaises, les résultats de campagnes de mesures permettront à l'avenir d'affiner les modèles prévisionnels de charge, et in-fine la gamme de $N_{\rm eq}$ applicable.

Etudes préliminaires

Lors des études préliminaires, on pourra appliquer la procédure simplifiée suivante, selon le niveau d'information disponible :

en l'absence d'un historique de chargement spécifique pour les vérifications aux ELU, on pourra adopter une valeur forfaitaire de N_{eq} . Le choix de la valeur de N_{eq} pourra s'appuyer sur des historiques de tempêtes établis dans d'autres régions du monde. Des valeurs de Neq de l'ordre de 5 à 20 cycles équivalents ont été obtenues sur des projets pétroliers en mer du Nord ou dans d'autres régions du globe ;

Etudes préliminaires

- une dégradation nominale de résistance au cisaillement cyclique pourra être adoptée par l'application d'un abattement pertinent et conservatif (lié à une valeur de N_{eq} et à un taux de chargement cyclique), homogène sur l'ensemble du massif mobilisé ou par tranche de sol ;
- dans l'attente du modèle de sol applicable au site considéré, on pourra par défaut utiliser un modèle de sol de référence bien documenté et suffisamment représentatif du sol en place.

Les ELS s'intéressent aux déformations permanentes ou temporaires au regard des critères d'exploitation de l'éolienne.

Les critères de dimensionnement sont : <u>le tassement total moyen,</u> <u>les tassements différentiels, les rotations permanentes.</u>

Le critère de rotation admissible au niveau de la turbine, imposé par le fabricant, est très sévère : 0,5° dont 0,25° réservés aux tolérances d'installation.

Un critère complémentaire de dimensionnement s'applique sur le taux minimum de surface comprimée.

Les recommandations du DNVGL-ST-0126 sont applicables pour sélectionner les conditions de chargement pour lesquelles les vérifications ELS devront être menées. On s'intéressera aux cas:

- Tempête de projet isolée: charge maximale extrême pour un nombre de cycles équivalent (typiquement 5<Neq<20);
- Arrêt d'urgence ou tempête précédés de conditions opérationnelles;
- Succession de tempêtes;
- Niveaux de charge LDD 10⁻² et LDD 10⁻⁴

Niveau de charge LDD 10⁻²: ne peut être dépassé que pendant 1% de la durée de vie de la structure (soit 1750 heures en 20 ans); Niveau de charge LDD 10⁻⁴: ne peut être dépassé que pendant 0.01% de la durée de vie de la structure (soit 17,5 heures en 20 ans) Ces niveaux sont à évaluer selon DNVGL-ST-0437 et à partir des DLC 1.2 et 6.4.

LDD = Load Duration Distribution

Les charges de service induisent:

- Des déplacements à long terme dus aux charges statiques
- Des déplacements induits par les charges cycliques.

Déplacements statiques (d'origine gravitaire) = déformations de cisaillement + tassement de consolidation + tassement de fluage

- ☐ <u>Tassements</u> Estimation par modèle 1D en consolidation primaire et secondaire
- □ <u>Tassements différentiels et rotations permanentes</u> → Modèle EF

Déplacements permanents d'origine environnementale = déformations de cisaillements cycliques + tassement post-cyclique (dissipation de Δu)

□ <u>Déplacements dus aux cisaillements statiques et cycliques</u>

modèle avancé par Eléments Finis permettant d'extraire à tous niveaux de chargement les déplacements et raideurs de la fondation depuis les charges de fatigue (ELF) jusqu'aux charges ultimes (ELU) en passant par les charges de service (ELS).

Un exemple de modèle est décrit en Annexe C des Recommandations

- □ <u>Tassement de reconsolidation post-cyclique</u>: peut être calculé par un modèle unidimensionnel, à partir des pressions interstitielles générées lors d'un évènement cyclique majeur.
 - La distribution des pressions interstitielles sous la fondation est déterminée sur la base des contraintes de cisaillement statique et cyclique à l'aide du modèle EF avancé.
 - Le tassement de reconsolidation sous la fondation est obtenu par application d'une relation liant les déformations locales à la valeur de la surpression interstitielle pour le sol considéré.

Dans le cas d'une réponse de sol drainée ou partiellement drainée sous le chargement cyclique considéré, la densification peut entraîner des déformations permanentes. Ces déformations supplémentaires et les déplacements et rotations qui en résultent au niveau de la fondation doivent eux-aussi être évalués dans le cadre des vérifications de la fondation aux ELS.

ELS/SURFACE COMPRIMEE

Conditions de Surface comprimée minimale.

- Pour le niveau de charge LDD 10⁻² : la surface d'appui de la fondation doit être entièrement comprimée
- Pour la charge caractéristique extrême : décollement de la semelle acceptable limité à 50% de la surface comprimée.

[= DNVGL-ST-0126 § 7.5.5.4 (2016)]

Pourquoi? : éviter l'érosion du sol de fondation par un effet de « pompage » ou de « chasse » sous un grand nombre de cycles

Des décollements sont implicitement admis pour des cas intermédiaires mais il doit être justifié que leur nombre ne génère pas d'érosion :

- Justification délicate
- Rôle positif de jupes périphériques

Merci de votre attention

