

JUSTIFICATION DES FONDATIONS DE GRUES À TOUR – L'APPROCHE BUREAU VERITAS

P.-E. THÉVENIN

BUREAU VERITAS, Département technique Construction, 16, chemin du Jubin, 69570 DARDILLY

I. GÉNÉRALITÉS

A. Le contexte réglementaire et normatif

Les textes réglementaires

L'arrêté du 1^{er} mars 2004 impose au chef d'établissement (dans le cas général, l'entreprise) de faire procéder à la vérification de la grue qu'il met en place sur son chantier et d'établir l'adéquation de la grue au site, ce qui consiste à vérifier :

- que le type de grue envisagé est compatible avec les charges à soulever et les portées prévues ;
- que la grue restera stable pendant toute la durée du chantier, compte tenu des conditions locales de sol et de vent.

La Recommandation R.406 de la CNAMTS (Caisse nationale d'assurance maladie pour la protection des travailleurs salariés) définit les dispositions à prendre pour la protection des travailleurs et précise en particulier comment doit être évalué le vent applicable à la grue pour les justifications. D'autres documents existent localement et peuvent imposer des dispositions complémentaires : arrêtés municipaux ou préfectoraux.

Les textes normatifs

Les grues sont calculées selon des règles spécifiques : règles FEM, normes DIN... Dans ce domaine comme dans d'autres, la normalisation européenne se met progressivement en place et des normes harmonisées viennent peu à peu uniformiser les règles de dimensionnement.

Les grues sont dimensionnées en exploitation sous vent limité (vent de service) et en situation hors service sous l'effet d'un vent de tempête (dénomination FEM 1.005).

Les éléments de fondation des grues, réalisés dans la majorité des cas par l'entreprise, ne font pas l'objet d'un texte spécifique. Leur dimensionnement est donc généralement basé sur les prescriptions des DTU 13.11 et 13.12 (fondations superficielles de bâtiment), DTU 13.2 (fondations profondes de bâtiment) et éventuellement fascicule 62 (fondations d'ouvrages de génie civil).

B. Types de grues et configurations possibles

Vis-à-vis des fondations, deux grandes familles de grues existent.

Les grues sur châssis (ou grues lestées)

La grue est juste posée sur ses fondations. Elle ne peut donc pas tirer sur celles-ci et les réactions verticales sont

toujours des compressions. Le lest de base déterminé par le fabricant de la grue assure l'équilibre et évite les soulèvements.

Dans cette famille de grues, on distingue :

- les grues reposant directement sur une fondation béton, par l'intermédiaire de platines non ancrées au soulèvement mais pouvant être bloquées dans le sens horizontal ;



- les grues sur bogies, circulant sur une voie de grue. Un cas particulier est la grue bloquée en position fixe sur un tronçon de voie restreint (grue calée avec moteur de roulement démonté).



Les grues avec fût encastré

Ces grues n'ont pas de lest. Leur mât est encastré dans la fondation par l'intermédiaire d'un tronçon spécifique. La fondation joue alors le rôle de lest et doit prémunir du renversement.



Les efforts verticaux aux appuis (pieds de scellement) sont des tractions et des compressions. Les efforts de traction pouvant être très importants, ces cas méritent une grande attention.

C. L'environnement de la grue

Une grue est installée dans un environnement qui va agir sur elle. Il est donc nécessaire de disposer des informations suffisantes sur cet environnement pour pouvoir assurer la stabilité de la grue.

Le sol

L'étude de sol doit caractériser le sol sous l'emplacement de la fondation de la grue : nature des couches de sol et caractéristiques de ces couches, contraintes admissibles... Le choix du mode de fondation de la grue est en principe de la responsabilité du bureau d'études de sol. Cependant, il est très rare que celui-ci soit missionné pour les fondations de la grue. Il est alors d'usage de reconduire pour la

grue le même mode de fondation que pour le bâtiment (fondations superficielles ou fondations profondes). Toute remise en cause de ce mode de fondation doit être soumise à l'approbation du bureau d'études de sol.

Les informations données par l'étude de sol menée pour le bâtiment projeté peuvent ne pas suffire, en particulier lorsque les niveaux de fondation du bâtiment et de la grue ne sont pas les mêmes : la connaissance du sol sous l'ouvrage ne donnerait alors aucune indication sur le sol supportant la grue. Dans ce cas, le géotechnicien doit être consulté pour qu'il complète son étude.

Une étude spécifique pour les fondations de la grue est également nécessaire lorsque les contraintes liées à la nature de l'ouvrage à construire sont incompatibles avec celles de la grue. Par exemple, un réservoir d'hydrocarbure de grand diamètre tolère un tassement différentiel important entre la périphérie et le centre, alors que l'assise de la grue impose une valeur très limitée des déformations différentielles entre appuis.

L'eau

Les niveaux d'eau dans le sol, voire les niveaux de crues, doivent être connus. Dans certains cas, le niveau d'eau peut atteindre la fondation de la grue, parfois même le lest de la grue.

En particulier, lorsque le fût de la grue est encastré dans un massif de fondation, le poids du massif assure la stabilité. Il faut alors tenir compte de l'effet défavorable de la poussée d'Archimède sur le massif pour vérifier l'équilibre.

Ce cas se produit pour une fondation proche de la nappe phréatique ou lorsque le chantier est situé au bord d'un fleuve ou d'une rivière.

Un autre cas à envisager est celui où un pompage de la nappe à proximité des fondations de la grue pourrait venir perturber l'équilibre de celle-ci, du fait des tassements différentiels possibles.

Le vent

La charge de vent est un paramètre essentiel pour le dimensionnement et la vérification des fondations de la grue.

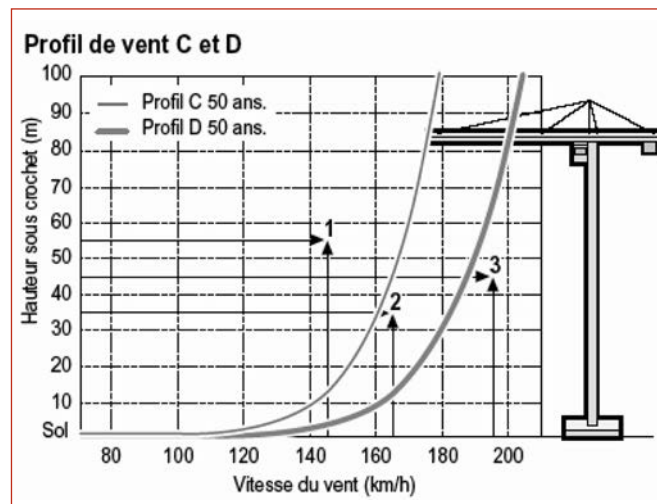
Vent en service et vent hors service

Deux configurations de vent sont prises en considération : Le **vent en service** correspond à la phase d'exploitation de la grue. La vitesse maximale du vent de service est habituellement de 72 km/h. Cette vitesse est réduite si les charges soulevées présentent une grande surface (exemple : banche) ; Le **vent hors service** est le vent caractérisé par la vitesse maximum instantanée (vitesse de pic établie sur 3 secondes) à une hauteur de 10 mètres pour une période de retour moyenne de 50 ans. Le vent hors service doit bien entendu être évalué en tenant compte des éventuels effets de site liés à l'implantation et l'environnement proche de la grue. Il pourrait donc y avoir, en principe, des valeurs différentes selon les directions de vent considérées. Cependant, dans le cas général, seule la valeur maximale est fournie. La valeur de la vitesse de vent hors service peut

aussi être évaluée pour une autre hauteur que 10 mètres : hauteur sous crochet par exemple.

Les profils de vent

La valeur de la vitesse de vent hors service n'est pas directement utilisée pour le calcul de la grue. En effet, pour ne pas avoir à calculer les grues pour chaque vitesse de vent possible, les constructeurs de grue utilisent des profils de vent enveloppe (voir figure ci-dessous tirée de la Recommandation R.406).



Le profil C est le minimum requis pour toutes les grues : si la vitesse du vent hors service est inférieure à la vitesse donnée par le profil C, la grue doit être calculée pour la vitesse du profil C.

- Par exemple, si la vitesse de vent applicable à la grue, compte tenu des éventuels effets de site, a été estimée à 145 km/h pour une hauteur de 55 mètres, la grue doit être calculée pour le vent correspondant au profil C (cas du point 1).

Si la vitesse est comprise entre les profils C et D, les réactions sous la grue sont calculées sous l'effet d'un vent correspondant au profil D.

- C'est le cas du point 2 (vitesse 165 km/h à 35 m).

Si la vitesse du vent hors service est située au-delà du profil D, les réactions sous la grue doivent être calculées par le fabricant de la grue sous l'effet de ce vent spécifique.

- C'est le cas du point 3 (vitesse 195 km/h à 45 m).

Remarque :

La vitesse du vent varie selon la hauteur, selon des lois complexes (cf. NF EN 1991-1-4). La figure de la recommandation R.406 n'est pas conçue pour extrapoler la vitesse du vent à une hauteur donnée à partir de la vitesse connue à une autre hauteur. Elle sert uniquement à définir le profil de vent applicable à la grue, selon la position d'un point sur cette figure.

Effets de site et étude aérodynamique

L'estimation du vent sur un site donné est en principe effectuée par un prestataire spécialisé (CSTB ou Météo France par exemple).

Dans le cas général, aucun effet de site n'est à prendre en compte (un effet de site est un phénomène de masque, de

tourbillon, ou d'accélération de la vitesse du vent du fait de l'environnement proche de la grue : autres bâtiments, relief marqué ...). Le document remis par le prestataire indique alors le profil de vent qui doit être utilisé pour le dimensionnement et la vérification des fondations de la grue.

Dans certains cas, un effet de site est à craindre et une étude spécifique doit être réalisée.

Cette étude consiste à étudier en soufflerie une maquette représentative de la grue avec son environnement (constructions environnantes, relief).

Cette étude donne plusieurs informations :

- valeur des coefficients d'amplification des efforts de vent (moment aérodynamique et effort tranchant) dans chaque direction ;
- comportement de la grue face aux vents qui la sollicitent : mise en girouette, mise en travers ou autorotation.

L'étude aérodynamique permet d'identifier les grues et les configurations pour lesquelles les tableaux standard des constructeurs, basés sur les profils de vent, ne sont pas suffisants. Pour ces grues, le constructeur de la grue doit fournir des valeurs spécifiques des réactions d'appui.

Vérification de la valeur de vent hors service utilisée

La cohérence entre la vitesse du vent hors service, spécifique au site, et la valeur de vent hors service qui a servi de base aux calculs du fabricant de la grue doit être vérifiée.

Pour cela, il est indispensable que les informations nécessaires (profil de vent, période de retour) figurent dans l'entête des tableaux de réactions qui sont fournis par les constructeurs de grue.

C'est d'autant plus nécessaire que la France prend en compte une période de retour de 50 ans pour le vent hors service, ce qui n'est pas le cas de tous les pays (qui peuvent rester sur la période de retour de 25 ans proposée par les règles FEM). Dans le cas de grues provenant de l'étranger, il peut y avoir un doute sur la période de retour réellement utilisée pour le calcul des réactions.

Sur ce point, des améliorations dans la qualité des informations fournies par les fabricants de grues sont possibles. Il serait ainsi souhaitable que :

- dans les tableaux classiques de réactions d'appui, la période de retour utilisée pour calculer les réactions soit systématiquement indiquée,
- dans les tableaux établis suite à une étude aérodynamique (effet de site), la référence à l'étude aérodynamique soit là aussi systématiquement indiquée.

II. LES JUSTIFICATIONS

A. Les données nécessaires au dimensionnement des fondations

1. Les éléments nécessaires

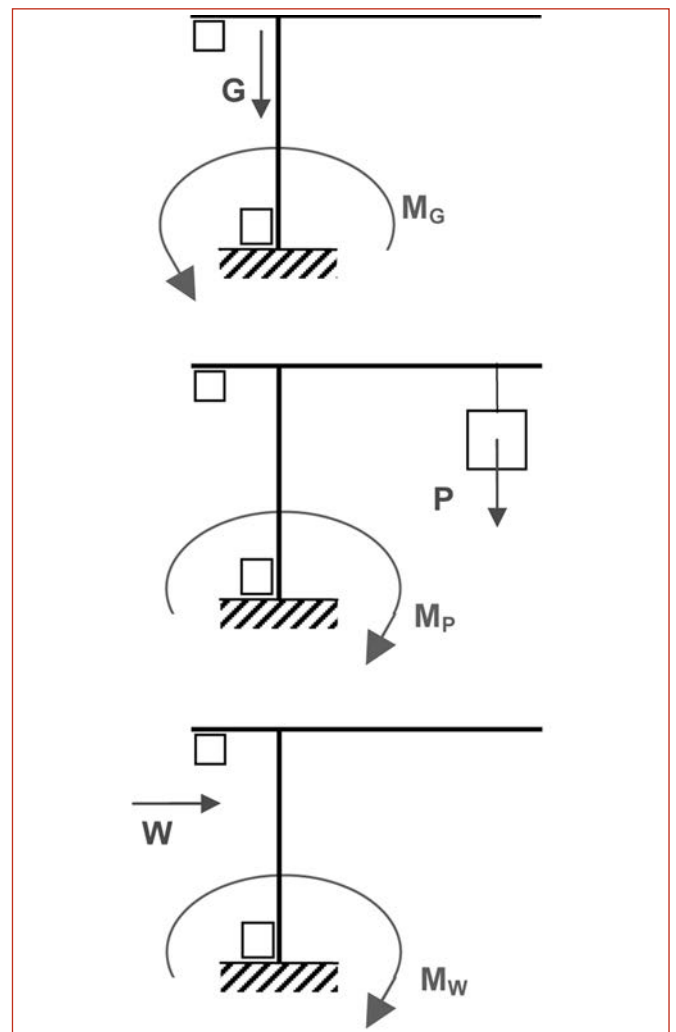
Pour dimensionner (ou vérifier) une fondation de grue, il est nécessaire de disposer de toutes les informations utiles :

- plans d'installation du chantier (vue en plan, coupes) ;
- nature et caractéristiques du sol à l'emplacement de la grue, au niveau de fondation envisagé pour celle-ci ;
- identification et caractéristiques de la grue (hauteur sous crochet, flèche, lest) ;
- profil de vent applicable à la grue, compte tenu des éventuels effets de site ;
- valeur des charges transmises aux appuis de la grue, données par le fabricant de la grue sous forme de tableaux.

2. Les actions agissant sur les fondations de la grue

Les actions (ou cas de charge) agissant sur les fondations sont :

- les charges permanentes G : poids de la grue, lest de base et contrepoids. Ces charges génèrent une action verticale et un moment arrière (la grue préchargée par le contrepoids penche vers l'arrière) ;
- la charge d'exploitation P : la charge levée génère une action verticale et un moment avant ;
- le vent W , qui se traduit par un effort horizontal et un moment de renversement. La direction du vent peut être quelconque dans le cas du vent en service et est en principe orientée dans le sens de la flèche dans le cas du vent hors service, du fait de la mise en girouette de la grue ;
- les effets d'entraînement qui se traduisent par un couple de torsion C d'axe vertical, lorsque la grue est en service.



Ces actions génèrent des efforts à la base de la grue. Ces efforts sont transmis aux fondations par l'intermédiaire des 4 appuis.

3. Les efforts donnés par les constructeurs de grue

Les tableaux fournis par les constructeurs donnent les efforts à la base de la grue. On a généralement les informations suivantes :

- réactions verticales à chaque appui, engendrées par les charges permanentes, la charge levée et la flexion de la grue sous l'effet combiné de ces charges et du vent ;
- effort tranchant global à la base de la grue, dans chaque direction X et Y, sous l'effet du vent ;
- couple de torsion d'axe vertical lié à l'exploitation de la grue.

Pour les configurations en service et hors service, les valeurs des réactions verticales sont données pour différentes hauteurs de mât (en fait la hauteur sous crochet) sous l'effet de combinaisons des charges non pondérées.

On trouve également dans certains cas (grues scellées en particulier) des tableaux dans lesquels les efforts à la base de la grue sont exprimés sous la forme d'un torseur :

- M : moment de renversement sous l'effet des charges appliquées ;
- V : effort vertical dû aux charges permanentes et d'exploitation ;
- H : effort horizontal dû au vent ;
- C : couple de torsion d'axe vertical.

Les valeurs de ces efforts sont également issues de combinaisons de charges non pondérées.

B. Combinaisons d'actions et états limites

Le dimensionnement et la vérification des fondations de grues sont basés sur la théorie des états limites. Différents critères (états limites) portant sur la reprise des efforts, le comportement des matériaux, l'équilibre et les déformations sont définis, selon que la grue est en service ou hors service.

1. Combinaisons pour les états limites de service

Pour les vérifications, on distingue l'ELS rare et l'ELS fréquent. Dans les combinaisons ci-dessous, W_{ES} est le vent en service et W_{HS} est le vent hors service :

Configuration grue	Combinaison	Remarque
Grue en service	$G + Q + W_{ES}$	ELS fréquent
Grue hors service	$G + W_{HS}$	ELS rare

Remarque : le cas $G + W_{HS}$ ne doit pas être considéré comme une combinaison accidentelle.

À l'ELS, les réactions verticales sous appui peuvent être tirées directement des tableaux : il suffit de récupérer la valeur extrême, qui correspond généralement au cas d'un vent en diagonale, pour effectuer les vérifications relatives à un appui.

2. Combinaisons pour les états limites ultimes

Les combinaisons fondamentales ELU sont les suivantes :

Configuration grue	Combinaison	Remarque
Grue en service	$1,35 G + 1,5 Q + 1,5 W_{ES}$ $G + 1,5 Q + 1,5 W_{ES}$	
Grue hors service	$1,35 G + 1,5 W_{ES}$ $G + 1,5 W_{ES}$	

Dans les combinaisons ELU en configuration de service, la charge soulevée et le vent sont affectés du même coefficient 1,5 car il y a réellement concomitance entre ces deux actions.

Pour la configuration hors service, le coefficient de pondération appliqué au vent W_{HS} est tiré de l'eurocode 0 (NF EN 1990) ; la valeur de vent appliquée à la grue est en effet une valeur caractéristique au sens eurocode (NF EN 1990 art. 4.1.2 (7) note 2).

Ce coefficient de 1,50 sur le vent traduit la probabilité que le parc des grues installées rencontre ce vent hors service. Pour évaluer le risque de chute d'une grue, il est en effet impératif de tenir compte de l'ensemble de la population (plusieurs milliers de grues sont en service en France) et ne pas se limiter à la fondation d'une grue spécifique de cette population. Ce coefficient indique également qu'on n'accepte pas de diminuer la sécurité des constructions environnantes du fait de la présence d'une grue.

3. États limites à prendre en compte

Les fondations sont à vérifier en configuration de service et en configuration hors service.

Pour bâtir le tableau suivant, nous nous sommes inspirés des passages pertinents tirés des DTU 13.11 et 13.12 (fondations superficielles), du DTU 13.2 (fondations profondes), du fascicule 62 (fondations d'ouvrages de génie civil) et du Guide pratique des fondations de remontées mécaniques publié en 1993 par le CEBTP et le STRM (Service Technique des Remontées Mécaniques – ministère des Transports) :

État limite	Type de vérification	
Mobilisation du sol : capacité portante	ELS	ELU
Décompression du sol	ELS	ELU
Renversement - Glissement		ELU
Déplacements – Tassements différentiels	ELS	
Matériaux constitutifs des fondations	ELS	ELU
Arrachement - Poinçonnement		ELU

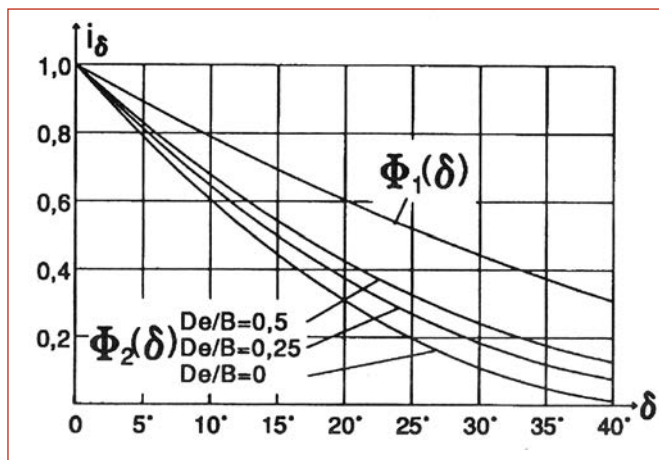
Selon la nature des fondations de la grue et le type de grue (lestée, encastrée), les états limites les plus pertinents sont utilisés.

C. Critères de justification

1. État limite de mobilisation du sol - Vérification de la portance

À l'état limite de service, la contrainte sous la fondation doit être comparée à la contrainte admissible à l'état limite de service donnée par le rapport de sol. Pour cette vérification, c'est la combinaison ELS fréquent qu'il convient d'utiliser.

La vérification de la contrainte au sol doit tenir compte de l'effort horizontal, qui influe sur la forme du diagramme de pression et entraîne une diminution de la contrainte admissible, du fait de l'obliquité de la résultante (cf. DTU 13.12 art. 3.22, fascicule 62 annexe F1).



Coefficient minorateur en fonction de l'inclinaison de la charge (fascicule 62)

À défaut de calculs plus poussés, on peut utiliser les valeurs suivantes, établies pour une profondeur d'encastrement équivalente $D_e = 0$, et pour des inclinaisons de 5, 10 ou 15° :

	5°	10°	15°
Sols frottants : sables et graves	0,80	0,60	0,45
Sols cohérents : argiles, limons, craies, marnes, roches	0,90	0,80	0,70

En configuration de service, si la vérification à l'ELS est satisfaite, le critère à l'état limite ultime est automatiquement respecté, du fait de la relation existant entre la contrainte admissible ELS et la contrainte admissible ELU :

$$\sigma_{adm,ELU} = 1,5 \sigma_{adm,ELS}$$

En configuration hors service par contre, la vérification à l'état limite ultime doit être faite (pas de vérification ELS dans cette configuration).

2. État limite de décompression du sol - Vérification de la surface comprimée

Cette vérification vise à prémunir du risque de dégradation des caractéristiques mécaniques du sol sous l'effet de décompressions fréquentes.

Sous l'effet des actions en service (ELS fréquent), la fondation doit demeurer entièrement comprimée.

Sous l'effet des actions hors service (ELS rare), la surface comprimée de chaque fondation doit être supérieure à 75%.

Sous les combinaisons ELU, le pourcentage de surface comprimée doit être supérieur ou égal à 30%.

3. État limite de renversement

La stabilité au renversement est en général assurée par le respect des critères de poinçonnement (portance) et de surface comprimée. Dans le cas général, la rupture par poinçonnement du sol intervient avant la perte de l'équilibre statique.

Dans certains cas (par exemple lorsque la fondation de la grue est située sur un sol rocheux ou que le support comporte un point dur), la vérification suivante doit également être faite :

$$\frac{\Sigma M_{stabilisant}}{\Sigma M_{renversement}} \geq 1,5$$

Les moments à prendre en compte sont des moments non pondérés.

Prise en compte de l'eau

La vérification de l'équilibre du massif doit tenir compte d'un éventuel effet défavorable de la poussée d'Archimède. En général, on considère simultanément la crue avec les sollicitations en service ou hors service, ce qui est défavorable.

Des informations utiles sur la prise en compte des différents niveaux d'eau peuvent être trouvées dans l'annexe nationale de l'eurocode 0 (NF P 06-100-2).

Prise en compte de la butée

Sur un chantier, le sol autour des fondations est assez fortement remanié. Il est donc sage de ne pas tenir compte de la butée horizontale pour assurer l'équilibre d'un massif. En tout état de cause, cette butée doit être neutralisée sur au moins 1 mètre.

La butée doit être limitée ($K_p \leq 1$) car les déplacements du massif doivent rester faibles. Une grue ne peut en effet supporter une rotation à sa base (dénivellation d'appui) supérieure à 1/400.

Une valeur $K_p > 1$ n'est pas acceptable : elle correspondrait à des déplacements importants du massif, incompatibles avec le fonctionnement de la grue.

4. État limite de glissement

La vérification au frottement des fondations de grue (semelles superficielles ou massif) est en général satisfaite, compte tenu du rapport entre force horizontale et force verticale.

5. État limite de déplacement – tassement différentiel :

Selon les fabricants de grues consultés, la tolérance d'une grue au tassement différentiel est de 1/400. Au-delà de cette valeur, le fonctionnement correct de la grue n'est pas assuré.

Il faut donc vérifier que, sous les combinaisons ELS fréquent, le tassement différentiel entre points d'appui reste en-deçà de la valeur admissible.

6. Coefficients partiels de sécurité sur les matériaux

Les états limites dans les matériaux constitutifs des fondations (acier, béton) sont vérifiés en recherchant le même niveau de sécurité que pour des bâtiments.

On utilise donc les mêmes coefficients de sécurité et les mêmes coefficients sur les matériaux γ_M .

D. Exploitation des tableaux d'efforts

1. Combinaison des actions

Les valeurs fournies par les fabricants de grues correspondent à des combinaisons non pondérées des différents cas de charge (poids propre, lest, charge soulevée, vent), en situations en et hors service.

Cela implique que, pour créer des combinaisons d'actions précises utilisant des facteurs de pondération particuliers, il faudra d'abord « décomposer » les valeurs des tableaux, de façon à retrouver les cas de charges élémentaires.

Une autre solution consiste à utiliser des méthodes simplifiées, qui permettent d'éviter cette décomposition, mais qui peuvent conduire à des résultats plus défavorables.

2. Prise en compte des actions horizontales

Les tableaux fournissent les valeurs des efforts horizontaux appliqués à la grue :

- T_{\max} : effort tranchant global à la base de la grue (effet du vent) dans les directions X et Y
- C : couple de torsion d'axe vertical à la base de la grue (effet lié à l'exploitation de la grue donc valeur nulle en configuration hors service).

Diviser l'action horizontale totale par 4 pour obtenir l'action à chaque appui est trop favorable, et impliquerait l'existence d'un diaphragme indéformable entre les 4 points d'appui.

Il est possible de considérer pour chaque appui une part d'effort horizontal proportionnelle à la charge verticale reprise par l'appui :

$$FH_i = \frac{FV_i}{\sum FV_j} \cdot T_{\max}$$

Il est souhaitable d'utiliser une approche plus simple et plus sécuritaire en adoptant la formule donnée par certains constructeurs de grues pour évaluer l'effort horizontal maximal sur un appui :

$$FH = T_{\max}/2 + C/c$$

c est la distance entre appuis de la grue

Cette dernière formule correspond au cas limite où tous les efforts sont repris par deux appuis seulement (cas limite avant soulèvement des deux appuis arrière).

La valeur de FH est généralement de l'ordre de 10 à 15 % de la réaction maximale verticale.

III. EXEMPLES D'APPLICATION

A. Grue lestée sur fondations isolées

Ce cas correspond à la grande majorité des cas. Les fondations sont considérées comme isolées si elles ne servent qu'à reprendre les efforts de la grue, qu'elles sont indépendantes les unes des autres et qu'elles ne sont pas en interaction avec d'autres éléments de structure (paroi de soutènement par exemple) ou de sol (talus par exemple).

1. Principe des justifications

La grue est posée sur ses fondations. Elle ne peut donc exercer qu'une compression sur chacun de ses appuis. L'effort minimal sur un point d'appui correspond au cas d'un soulèvement et est en principe évité par le choix judicieux du lest par le constructeur de la grue.

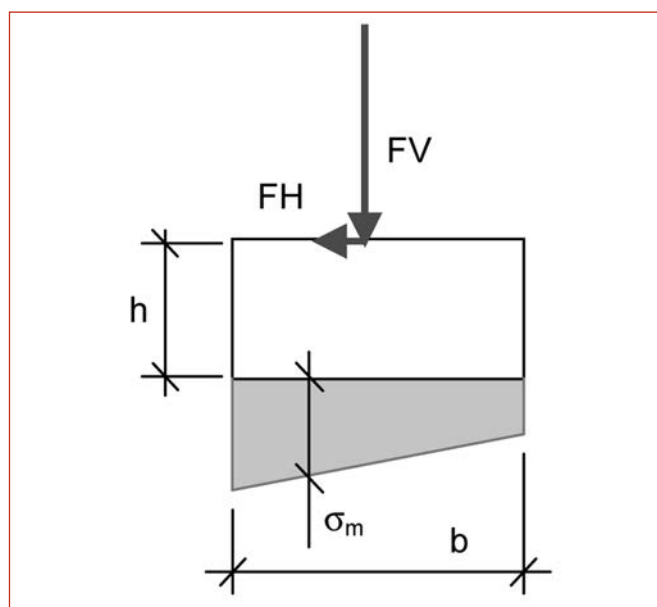
La stabilité de la grue sous l'effet des charges appliquées (P, Q et W) a été étudiée par le constructeur de la grue. Il suffit alors de démontrer que les fondations ne constituent pas un élément faible de l'ensemble.

Les critères à vérifier sont donc la capacité de la fondation à supporter les charges verticales et horizontales qui lui sont appliquées, et la valeur du tassement différentiel entre 2 appuis qui doit rester compatible avec le fonctionnement de la grue.

2. Cas des semelles superficielles

La vérification de la contrainte ELS au sol doit prendre en compte les charges appliquées, le poids de la semelle et le fait que le point d'application des charges est situé au-dessus de la semelle. Le cas échéant, la pression d'eau pouvant délester la fondation doit être également intégrée dans l'équilibre des forces.

Comme cela a été dit plus haut, il faut considérer l'obliquité de la charge dans l'évaluation de la contrainte admissible.



On peut démontrer que, pour la majorité des cas (pas d'eau en sous-pression et hauteur de semelle h inférieure au tiers de sa longueur b), la vérification est satisfaite si :

$$1,5 \frac{FV}{S} \leq \bar{\sigma}_{ELS}$$

Où :

- FV est la réaction maximale donnée par le tableau du constructeur de la grue,
- S est la surface au sol de la semelle,
- $\bar{\sigma}_{ELS}$ est la contrainte admissible ELS, évaluée sans tenir compte de l'obliquité de la charge.

Il restera par ailleurs à vérifier que le tassement sous les semelles reste admissible.

3. Cas des fondations profondes

Les pieux doivent être vérifiés sous l'effet des charges verticales (force portante) et des charges horizontales (flexion).

Une approche simplifiée consiste à calculer les pieux à l'ELU sous 2 torseurs : (1,5 FV, 1,5 FH) et (0, 1,5 FH) :

- FV est la réaction maximale donnée par le tableau du constructeur de la grue,
- L'effort horizontal FH est obtenu par la formule fournie plus haut : $FH = T_{\max}/2 + C/c$

Les pieux doivent être armés, le ferrailage étant placé sur au moins 3 fois la longueur élastique L_E (le moment étant ensuite très faible). Il est d'usage de calculer les pieux en les considérant articulés en tête.

Rappel : la longueur élastique L_E est donnée par la formule

$$L_E = \sqrt[4]{\frac{4EI}{kB}}$$

Les armatures doivent permettre la reprise de l'effort tranchant.

Il faut également vérifier que le tassement reste admissible.

B. Grue encastrée dans un massif

1. Principe des justifications d'ensemble

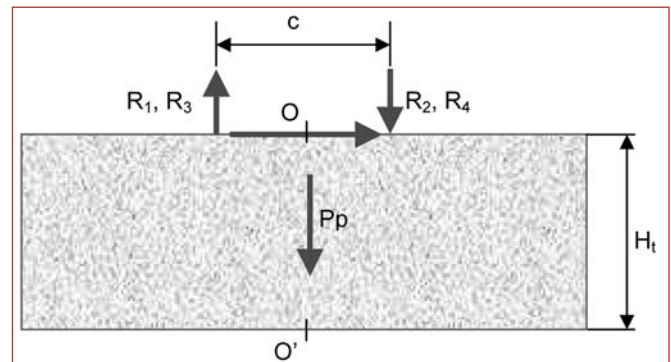
À l'inverse du cas précédent (grue lestée sur fondations isolées), la stabilité de la grue ne peut être étudiée qu'en tenant compte du massif. On ne peut donc plus dissocier la réponse des 2 éléments : la grue d'un côté, ses fondations de l'autre.

La stabilité de l'ensemble doit être vérifiée sous l'effet des combinaisons adaptées aux fondations, avec les coefficients de pondération et de sécurité propres à ce type d'ouvrages. À défaut de lire dans les tableaux fournis par le fabricant de la grue les torseurs élémentaires associés à chacun des cas de charge P, Q et W, il faut les retrouver à partir des valeurs des réactions d'appui : c'est la décomposition des efforts,

Cette opération, si elle n'est pas immédiate, ne présente pas de grande difficulté dès lors qu'on garde en tête le mode de fonctionnement de la grue en service et hors service et le sens des efforts générés par chacune des actions élémentaires (cf. II. A.2).

Les critères associés à cette stabilité sont la capacité portante, le renversement et le glissement. Pour valider le fonctionnement correct de la grue, on ajoutera la décompression du sol et la rotation sous le massif.

Il ne faut pas oublier, pour ces vérifications, de transporter les efforts sous le massif (point O') puisque les efforts donnés par les tableaux sont appliqués en face supérieure du massif (point O). On prendra garde également de ne pas oublier de compter le poids propre P_p du massif.



2. Principe des justifications locales

L'ancrage de la grue dans le massif et la capacité de celui-ci à supporter les efforts transmis doivent être vérifiés. Il faut noter que l'ordre de grandeur de ces efforts est sans commune mesure avec ce qu'on a habituellement en bâtiment : on peut avoir plus de 1 000 kN à transmettre au massif de façon ponctuelle.

Les critères associés à cette résistance locale sont le poinçonnement et l'arrachement, l'équilibre interne du massif étant calculé en béton armé selon les dispositions habituelles (Bael ou EC2).

Une méthode simplifiée pour la vérification locale de l'ancrage (poinçonnement et arrachement) consiste à prendre la réaction d'appui maximale FV donnée par le tableau, pour les configurations en service et hors service, et à pondérer cette valeur par 1,50. On obtient donc une valeur ELU.

La valeur de l'action horizontale FH est calculée comme indiqué précédemment.

III. REMERCIEMENTS

Cette méthodologie de justification des fondations de grues découle d'une longue réflexion entamée il y a plusieurs années. Et on ne saurait traiter le sujet sans reconnaître la part prépondérante prise dans cette analyse par Christian Martin, alors ingénieur à la Direction technique de Bureau Veritas. C'est lui qui, le premier, a bâti un ensemble cohérent de justifications spécifiques à ces ouvrages particuliers que sont les fondations de grues.

De très nombreux échanges ont aussi eu lieu avec les constructeurs de grues. Nous avons notamment mis à forte contribution MM Chataigner et Miton de Potain Manitowoc pour comprendre le point de vue d'un constructeur et l'origine des valeurs des tableaux fournis par ceux-ci.

Et comme une méthode n'a de validité et de légitimité qu'une fois confrontée et adaptée à la réalité du terrain, nous avons pu la tester en conditions réelles et la faire évoluer progressivement, en particulier grâce aux arguments et

expériences de Benoit Meunier, Nathalie Borie et Gilbert Nouel pour ne citer que les plus impliqués sur ce projet. En publiant les principes de notre approche de vérification des fondations de grues, nous espérons lancer la discussion avec tous les professionnels concernés. Nous donnons donc nos arguments. Si ceux-ci semblent inexacts ou inadaptés, nous accueillerons avec intérêt les arguments de nos contradicteurs. Si, par contre, comme nous le pensons, notre approche est cohérente, alors elle pourra sans nul doute servir de base à l'élaboration d'un référentiel accepté et reconnu par tous.

IV. BIBLIOGRAPHIE

FEM 1.004 : Recommandation pour le calcul des sollicitations dues au vent sur les charpentes des engins de levage – Fédération européenne de la manutention - 07/2000.

FEM 1.005 : Recommandations pour le calcul des structures de grues à tour hors service – Fédération européenne de la manutention - 11/2003.

NF EN 14439 : Appareils de levage à charge suspendue – Sécurité – Grues à tour (02-2007).

NF EN 13001-2 : Appareils de levage à charge suspendue – Conception générale. Partie 2 : effets de charge (05-2005) – Amendement A1 (01/2007).

DTU 13.11 (NF P 11-211) : Fondations superficielles (03/1988) + modificatif n° 1 (06/1997).

DTU 13.12 (P 11-711) : Règles pour le calcul des fondations superficielles - 03/1988.

DTU 13-2 (NF P 11-212-2) : Travaux de bâtiment – Marchés privés – Travaux de fondations profondes pour le bâtiment – Partie 2 : cahier des clauses spéciales – 11/1994.

Fascicule 62 Titre 5 : Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil - 09/1993.

Guide pratique des fondations de remontées mécaniques - CEBTP et STRM (Service technique des remontées mécaniques) – 1993.

Recommandation R.406 : Prévention du risque de renversement des grues à tour sous l'effet du vent – CNAMTS (Caisse nationale d'assurance maladie pour la protection des travailleurs salariés) – 10/06/2004.