

Contribution au calcul des fondations des grues. Réflexions pour l'élaboration de futures recommandations

M. GLANDY

Soletanche-Bachy-Pieux
18, rue des Pyrénées
94653 Wissous

M. BUSTAMANTE

MB Fondations
189, bd de la République
92210 Saint-Cloud

J.-M. PAILLÉ

Socotec
78 Saint-Quentin-
en-Yvelines

Résumé

Le présent article a pour objet le calcul des fondations des grues à tour en relation avec les nouvelles contraintes qu'imposent : a) la tendance à augmenter les charges de levage, lesquelles conduisent à élargir les fondations superficielles ou fonder sur pieux ; b) l'évolution des règlements de calculs de béton armé, mais aussi ceux des fondations qui mettent l'accent sur la vérification de la portance et de la résistance des matériaux aux états limites de service (ELS) et aux états limites ultimes (ELU). Ces raisons font que le constructeur (ou le loueur) de grue doit donner au BET de l'entreprise de GO ou de fondations, des données précises sur les points suivants : a) la décomposition des efforts entre efforts permanents, efforts d'exploitation et effets du vent ; b) les valeurs des coefficients de pondération pour chaque cas d'utilisation, c'est-à-dire en service et hors service. Ce n'est pas le cas actuellement.

Le flou actuel relatif à l'importance et aux conditions d'application des différents efforts non seulement complique la collaboration entre les acteurs de la profession mais peut être à l'origine de litiges en cas de sinistre. Il mériterait à ce titre d'être levé et de recevoir une solution appropriée, qui consisterait à établir des recommandations agréées par les constructeurs, les utilisateurs, les bureaux de contrôles et les organismes chargés de la sécurité (CNAM...).

Le présent article, en mettant l'accent sur les omissions de la pratique actuelle et sur les contradictions entre les deux normes de calcul, FEM et BAEL ou Eurocode, fait un certain nombre de propositions pour l'élaboration de recommandations qui permettraient de lever le flou actuel.

Mots-clés : grues, Eurocodes, fondations profondes, fondations superficielles, descentes de charges.

A contribution to the design of tower crane's foundations. Proposals for new recommendations

Abstract

This note is to clarify the design of tower crane foundations in relation with the present constraints due to : a) a drastic increase of the up lift loads, so that the tower cranes have to be founded on wider superficial foundations or pile foundations ; b) a change of the reinforced concrete and foundations standards which are demanding to check the bearing capacity and the material resistance for both Service Limit State (SLS) and Ultimate Limit State (ULS).

Consequently, the tower crane manufacturer (or hirer out) has to give to the Foundation Company or Main Contractor design office the specific data concerning the dead and live loads and values of wind forces for lateral and vertical directions, as well as the attenuation coefficients for service and out of service cases. This is not common practice. The present vagueness concerning the tower crane's loading conditions is a real problem complicating the relations between companies which can lead to be in litigation in case of accident. It seems useful therefore, to set up an appropriate solution with new recommendations that could be validated by the interested parties (manufacturer, users, control and safety offices). This article highlights the different contradictions between the 3 design codes, FEM, BAEL and Eurocodes, and gives some proposals in order to draft out relevant standards.

Key words: tower crane, Eurocodes, piling foundation, superficial foundations, design loads.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} septembre 2010.

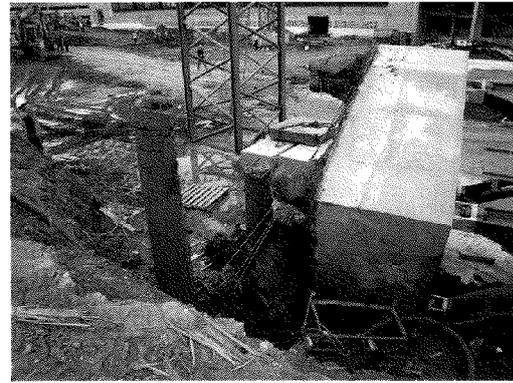
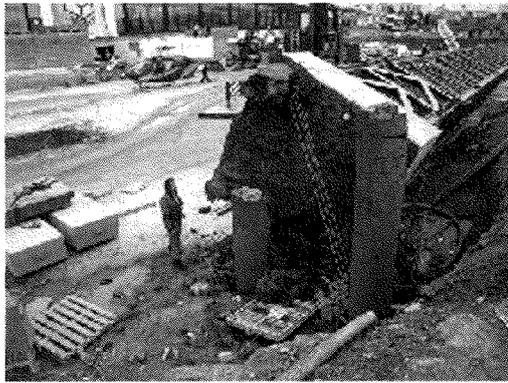


FIG. 1 Exemple de grue tombée en République Tchèque.
Examples of collapsed tower.

1

Récapitulatif des informations pour le dimensionnement

On rappelle dans le tableau I le type de données qui sont habituellement fournies au bureau d'études (BET) de l'entreprise chargée de réaliser et de dimensionner les fondations. La brièveté du tableau I explique pourquoi le bureau d'études, chargé de dimensionner les fondations à l'ELS et à l'ELU, est en droit de se poser des questions et de souhaiter des informations complémentaires.

Les notations suivantes sont utilisées :

- V_{HS} vitesse du vent pour la grue hors service ;
- V_{ELS} vitesse du vent pour la grue en service ;
- V_{car} vitesse du vent caractéristique selon l'Eurocode ;
- V_{reg} vent réglementaire à ne pas dépasser pendant la mise en service de la grue ;
- CP charge permanente (poids propre de la grue, des lests de base et des contrepoids) ;
- Q charge d'exploitation ;
- M_{CP} moment du contrepoids ;
- M_Q moment induit par la charge de levage ;
- M_V moment induit par le vent V ;
- M_t moment induit par la torsion.

1.1

Cas des sollicitations hors service

L'analyse du tableau I conduit à se poser les questions suivantes :

- ces sollicitations sont-elles de type ELU ? Quelles distinctions faire lorsque le vent provient de l'arrière de la grue ou de devant ?

- si ces sollicitations sont de type ELS, et étant donné la valeur importante de la vitesse du vent déjà prise en compte (vitesse supérieure à la vitesse caractéristique au sens de l'Eurocode) : quelle est la vitesse du vent V_{HS} à considérer dans les calculs, à comparer à la vitesse des vents caractéristique V_{car} des règlements en vigueur (Eurocode 1 XP ENV 1991-2-4) ? Quelle est, appui par appui, la décomposition verticale en charge permanente (CP) et en charge induite par le vent V_{HS} ? Quels sont les coefficients de pondération à appliquer sur la charge permanente CP et sur V_{HS} pour passer de l'ELS à l'ELU ?

1.2

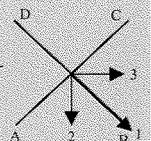
Cas des sollicitations en service

De même, plusieurs questions se posent pour les sollicitations en service :

- quelle est la vitesse du vent V_{ELS} à considérer dans les calculs ?

TABLEAU I Exemple de données fournies par le constructeur.
Examples of data provided by crane manufacturer.

Zone de vent E10/D50								
écartement 6 m								
	en service réaction par coin (kN), MD = 396 kNm				hors service réaction par coin (kN), MD = 0 kNm			
	Position de la flèche				Position de la flèche			
Coin	1	2	3	Force H	1'	2'	3'	Force H
A	520	777	217	64	399	870	104	202
B	953	870	823		1 150	870	870	
C	520	264	823		399	104	870	
D	87	171	217		104	104		



– quelle est, appui par appui, la décomposition verticale en charge permanente CP, en charge d'exploitation Q et en charge induite par le vent V_{ELS} ?

– quels sont les coefficients de pondération à appliquer sur CP, Q et V_{ELS} pour passer de l'ELS à l'ELU ? En particulier, l'utilisation de la grue étant interdite en cas de dépassement de vent au-delà du vent de référence V_{ELS} , doit-on étudier à l'ELU une combinaison du vent et des charges d'exploitation ? Par ailleurs, peut-on considérer la charge d'exploitation de la grue comme étroitement bornée, grâce à l'utilisation des limiteurs de charges ?

– les efforts horizontaux sont-ils donnés pour l'ensemble des quatre appuis de la grue ? Et, dans ce cas, comment les répartir par pieu en cas de recours à des fondations profondes : au prorata des efforts de compression en cas de grue non scellée ? Au prorata de la raideur de tous les pieux quand ces derniers sont reliés par un massif très rigide ou par des longrines ?

– le moment de torsion est-il un moment induit par les charges d'exploitation ? Comment se traduit-il en effort horizontal au droit des pieux ? S'applique-t-il hors service ?

Et enfin une dernière question essentielle : quelles sont les dimensions de la base de la grue ?

2

Règlements utilisés par les constructeurs de grues

Dans l'attente des Eucocodes, les constructeurs (ou loueurs) se réfèrent actuellement à plusieurs règlements.

Avant 1995, les normes françaises NF 520 81 et NF 520 82 fixaient entre autres trois cas de vent extrême de référence, en utilisation hors service :

- 130 km/h (36 m/s) pour les grues de hauteur inférieure à 20 m ;
- 152 km/h (42 m/s) pour les grues de hauteur inférieure à 100 m ;
- 165 km/h (46 m/s) pour les grues de hauteur supérieure à 100 m.

Depuis 1995, la directive machine 98/37/CE a conduit à deux normes européennes : NF EN 13001 et EN 14409.

Concernant la norme NF EN 13001, les parties 1 et 2 sont parues mais ne concernent pas les règles de calculs que régira la partie 3 dont la parution est prévue entre 2007 et 2010.

Dans l'attente de cette partie 3, les dimensionnements des constructeurs sont établis à partir des règles FEM 1001 et 1004, modifiées en 1998, dont le principal élément est le cahier 9.

En sus de ces règlements, les fournisseurs et utilisateurs de grues sont tenus de respecter le document n° R406 de la CNAM qui :

- confirme un vent limite en service V_{reg} de 72 km/h (20 m/s), et les prescriptions réglementaires qui y sont liées ;
- fixe les conditions de vents, avec un intervalle de récurrence de 50 ans (mesurés à une hauteur de 10 m, en terrain plat et moyennés sur une période de 10 min) ;
- et cela en deux zones C (28 m/s) et D (32 m/s) comme schématisé sur la figure 2.

Ces zones ne correspondent pas aux zones fixées par l'Eurocode, tant en termes de numérogie qu'en termes de qualification en vitesses. Ces vitesses ne seraient donc pas des vitesses caractéristiques au sens de l'Eurocode.

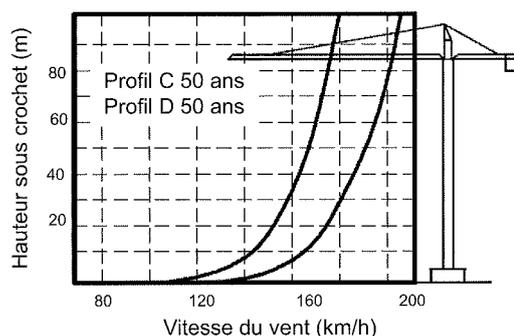


FIG. 2 Profil des vents C et D. Wind diagrams.

3

Rappel sur la conduite des calculs

Il importe, avant d'en arriver aux propositions de modifications, de rappeler le modus operandi que doit observer l'ingénieur chargé du calcul des fondations. Celui-là débute par le calcul de la descente de charges (estimation des charges permanentes CP, d'exploitation Q, et du vent V), se poursuit par l'étude de la grue hors service et en service, et se termine par la détermination des combinaisons ELU.

3.1

Calcul de la descente de charges

3.1.1

Action des charges permanentes (CP)

Elle se résume sous la forme d'un torseur (CP, M_{CP}), sans effort horizontal, où M_{CP} est le moment de renversement induit par la différence entre le poids de la flèche sans contrepoids et celui de la flèche arrière avec contrepoids (Fig. 3).

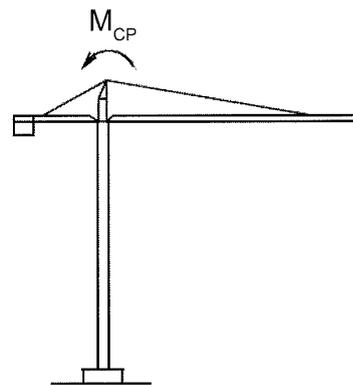


FIG. 3 Action du contre-poids. Counterweight action.

Le moment M_{CP} a tendance à faire pencher l'ensemble du côté du contrepoids. C'est un moment moteur en termes de stabilité et de dimensionnement des fondations en absence de moments induits par les phases d'exploitation ou par le vent, sinon c'est un moment résistant en présence de ces moments. Ce moment se traduit en traction-compression en pied de grue.

A titre d'exemple de calcul, considérons une grue scellée et d'abord le cas le plus défavorable, celui de la flèche positionnée en diagonale (Fig. 4a).

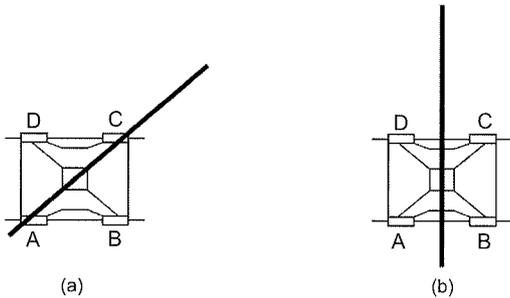


FIG. 4 Situation de calcul : a) flèche positionnée en diagonale ; b) flèche positionnée en parallèle à un des côtés du fût.
Calculation layout of the jib : a) diagonally, b) parallel to crane side.

On note e la distance entre les pieds de grue (D et C).

Dans ce premier cas, les équations d'équilibre conduisent aux relations :

$$R_A = CP / 4 + M_{CP} / (1,414 \times e) ;$$

$$R_B = R_D = CP / 4 ;$$

$$R_C = CP / 4 - M_{CP} / (1,414 \times e) ;$$

$$M_{CP} = (R_C - R_A) \times e \times 1,414.$$

Dans le cas d'une grue non scellée au point C, on a $R_C = 0$, lorsque $M > CP / 4 \times e \times 1,414$, et de plus :

$$R_A = 2 \times M_{CP} / (1,414 \times e) ;$$

$$R_B = R_D = CP / 2 - M_{CP} / (1,414 \times e) ;$$

$$M_{CP} = -R_A \times e \times 1,414.$$

Lorsque la flèche est parallèle à un des côtés du fût, les équations d'équilibre deviennent :

$$R_A = R_B = CP / 4 + M_{CP} / 2e ;$$

$$R_C = R_D = CP / 4 - M_{CP} / 2e ;$$

$$M_{CP} = (R_D - R_A) \times e.$$

3.1.2

Action des charges d'exploitation Q

Ces charges résultent de la manutention des charges d'exploitation (Fig. 5) et se résument à un torseur (Q, M_Q, M_t, H_Q), fonction de la distance d de la charge Q à soulever :

$$M_Q = Q \times d ;$$

M_t est le moment de torsion induit par la rotation de la grue ;

H_Q désigne l'effort de freinage appliqué dans le cas d'une grue circulant sur une voie.

Le moment M_Q se traduit par des efforts de traction-compression en pied de grue (cf. calcul selon § 4.1.1). En général, les données du constructeur ne font pas apparaître la part de l'effet dynamique.

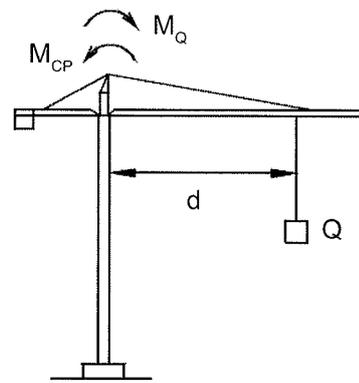


FIG. 5 Actions des charges d'exploitation Q.
Operating load action.

3.1.3

Action du vent

Cette action se traduit par un effort horizontal et un moment de renversement, soit un torseur (H_v, M_v) (Fig. 6). Le vent peut être parallèle à la flèche, perpendiculaire à la flèche, ou dans toutes autres positions. En général, l'effet du vent est plus important dans le deuxième cas que dans le premier.

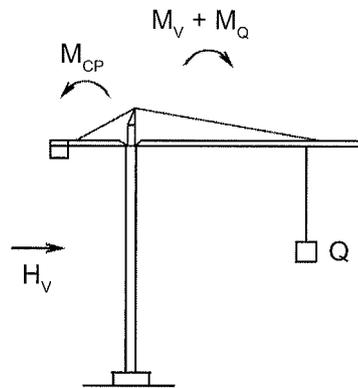


FIG. 6 Action du vent.
Wind action.

L'action du vent est variable selon sa vitesse (proportionnelle au carré de la vitesse) et selon la hauteur de la grue. Là encore, les données du constructeur ne font généralement pas apparaître la part de l'effet dynamique.

- Action du vent en service V_{ELS1}, V_{ELS2}

En service, cette action est calculée pour une vitesse de 72 km/h, vitesse au-delà de laquelle l'utilisation est interdite, et se traduit par un torseur (effort horizontal H_v , moment de renversement M_v) : pour le vent parallèle (H_{VELS1}, M_{VELS1}) et pour le vent perpendiculaire (H_{VELS2}, M_{VELS2}).

- Action du vent hors service V_{HS}

Hors service, cette action est calculée pour la seule position de mise en girouette de la grue (vent parallèle) et pour un vent dépendant de la zone. Elle se traduit par le torseur : H_{VHS}, M_{VHS} .

La valeur du vent prise en compte dans les calculs dépend de la zone (C ou D) et de la hauteur de la grue ; on peut la calculer à l'aide de la figure 1. C'est une valeur différente des valeurs caractéristiques V_{car} au sens de l'Eurocode, lesquelles dépendent de la région (quatre zones) et de la rugosité du sol (cinq catégories).

Étude de la grue en service (action ELS)

Dans la pratique, le constructeur fournit en pied de fût (cf. tableau I) :

- les quatre réactions verticales. Certains constructeurs indiquent parfois qu'ils ont majoré Q de 10 % ;
- un moment de torsion ;
- un effort horizontal provenant de deux sollicitations : celle du vent (vent parallèle H_{V1} , vent perpendiculaire H_{V2}) et celle du freinage (charge d'exploitation) en cas de grue circulant sur une voie : H_Q .

N.B. L'action de freinage n'est à prendre en compte que si la grue est sur une voie.

Au sens du BAEL ou de l'Eurocode 2, il s'agit d'actions de type ELS, et on peut considérer que les données du constructeur sont suffisantes pour calculer à l'ELS les fondations profondes (portance et résistance du pieu en flexion composée) ou superficielles (portance, tassement et rotation).

Au sens de l'Eurocode, on ne cumule pas totalement les actions variables, mais on pondère l'une ou l'autre par un facteur 0,77. Les combinaisons du constructeur n'intègrent pas cette pondération et seraient donc des actions de type ELS majorées.

Efforts horizontaux

En ce qui concerne les efforts horizontaux, aucun constructeur ne fournit en pied de fût la décomposition selon H_Q et H_V . Pourtant, séparer ces deux composantes horizontales est facile lorsque le constructeur fournit :

- les deux configurations correspondant au vent parallèle à la flèche et au vent perpendiculaire à la flèche ;
- la décomposition de l'effort horizontal selon les deux directions, parallèle à la flèche et perpendiculaire à la flèche.

En fonction de la zone (C ou D) et de la hauteur de la grue (Fig. 1), on peut connaître la vitesse de pointe V_{HS} en haut de la grue et en déduire le rapport $H_{VHS} / H_{reg} = (V_{HS} / 72 \text{ km/h})^2$.

En absence de la décomposition précédente, et par sécurité vis-à-vis de l'ELU, on doit donc qualifier cet effort horizontal « d'effort dû au vent ».

• Efforts verticaux

De même en ce qui concerne les efforts verticaux, aucun constructeur ne fournit en pied de fût la décomposition selon les charges permanentes (CP), les charges d'exploitation (Q) et l'effet du vent (V).

Pourtant, conformément aux règlements en vigueur pour dimensionner les fondations, il faut transformer ces actions de type ELS en actions de type ELU (cf. § 4.4.1). Pour cela, il est nécessaire de connaître leur décomposition. Ce point est fondamental et cet article met l'accent sur les difficultés pour y parvenir.

Néanmoins, dans certains cas, on arrive à retrouver cette décomposition avec plus ou moins de difficultés, voire parfois avec des hypothèses discutables (cf. exemples présentés en annexes 1 et 2).

Par ailleurs, on suppose généralement que les actions de la grue hors service sont des actions de type ELS majorées (en fonction du rapport $\beta = V_{HS} / V_{car}$).

Pour un calcul à l'ELU, on rappelle qu'il faut majorer les valeurs caractéristiques par 1,22 de façon à ce que l'effort induit soit majoré de 1,5 ($= 1,22 \times 1,22$).

Si le rapport $\beta = V_{HS} / V_{car}$ est supérieur à 1,22, ce vent est un vent de type ELU. Si ce rapport est supérieur à 1, c'est un vent intermédiaire entre l'ELS et l'ELU. Si ce rapport est inférieur à 1, c'est un vent de type ELS insuffisant (mais c'est peu probable !).

En général, les constructeurs fournissent les sollicitations correspondant au vent arrière mettant la grue en girouette. Certains donnent parfois des sollicitations correspondant au vent avant, sollicitations instables avant la mise en girouette. Une question reste toutefois à débattre : ce dernier cas est-il un cas accidentel ?

Étude de la grue hors service

La grue est alors en girouette et n'est soumise qu'aux actions du vent arrière (voire du vent avant !) et des charges permanentes. Ces actions se traduisent par l'application du torseur : CP, M_{CP} , H_{VHS} , M_{VHS} .

On rappelle que ce vent a une vitesse variable selon les zones C ou D et que ce n'est pas un vent caractéristique au sens de l'Eurocode. Dans cette configuration, le constructeur vérifie deux équilibres :

- celui de la stabilité au renversement, avec un coefficient de sécurité égal à 1,2 (cas IV du tableau T.9.15.a du cahier 9 des règles FEM) ;
- celui de la résistance des matériaux de la grue, avec un coefficient de sécurité de 1,1.

Si on compare ces coefficients de sécurité avec celui de l'acier du béton armé (1,15 à l'ELU) et celui de l'acier en structure métallique (1,1 à l'ELU), on peut considérer que la configuration de grue hors service est un cas de type ELU.

Néanmoins, par sécurité pour une vérification des fondations à l'ELU, on pourrait majorer les actions du vent (H_{VHS} , M_{VHS}) par 1,2, mais pas plus, sachant qu'au-delà de ce coefficient la stabilité de la grue n'est plus garantie au renversement. Deux cas se présentent :

- $\beta = V_{HS} / V_{car} > 1,2$ et on peut considérer cette configuration comme un « vrai ELU » ;
- ou $\beta < 1,2$ et on peut considérer cette configuration comme un « faux ELU ».

Dans tous les cas, on doit donc vérifier les fondations en majorant les actions CP et V par les coefficients suivants sur les torseurs s'appliquant à la base du massif de fondation :

- $1,35 \times (CP, M_{CP})$ associé à $1,2 \times (H_V, M_V)$;
- $1,00 \times (CP, M_{CP})$ associé à $1,2 \times (H_V, M_V)$.

On peut, par sécurité, porter le coefficient 1,2 à 1,5 (majoration de 1,5 comme dans l'Eurocode) si et seulement si la grue est stable avec cette majoration.

On vérifie cette stabilité si la traction-compression par appui induite par le moment de renversement $M = 1,5 \times M_V + M_{CP}$ est inférieure CP / 4 :

$$-(1,5 \times M_V + M_{CP}) / (2 \times d) < CP/4.$$

Grue en service – Vérification à l'ELU

3.4.1

Combinaisons ELU

Dans tous les cas, on doit vérifier les fondations en majorant les actions CP, Q et V par des coefficients conformes aux règlements en vigueur (Eurocode), qui fixent les coefficients (1,35 et 1,5) et les combinaisons à appliquer aux torseurs à la base du massif de fondation :

– $1,35 \times (CP, M_{CP})$ associé à $1,5^* \times (Q, M_Q, H_Q)$ et à $1,0 \times (V, M_V, H_V)$;

– $1,35 \times (CP, M_{CP})$ associé à $1,0 \times (Q, M_Q, H_Q)$ et à $1,5 \times (V, M_V, H_V)$;

– $1,00 \times (CP, M_{CP})$ associé à $1,5^* \times (Q, M_Q, H_Q)$ et à $1,0 \times (V, M_V, H_V)$;

– $1,00 \times (CP, M_{CP})$ associé à $1,0 \times (Q, M_Q, H_Q)$ et à $1,5 \times (V, M_V, H_V)$.

* Commentaire : l'action de la charge étant limitée par des dispositifs de sécurité, on pourrait considérer cette action variable « Q » comme étroitement bornée et ne la majorer à l'ELU que par 1,35 (au lieu de 1,5).

Enfin, il ne faut pas oublier de rajouter comme charges permanentes le poids des massifs de réaction.

En ce qui concerne les fondations profondes, ces combinaisons conduisent aux vérifications de la portance et de la résistance en flexion composée des trois cas suivants :

– effort ELU maximal en compression, moment induit par l'effort horizontal associé ;

– effort ELU minimal en compression, moment induit par l'effort horizontal associé ;

– effort ELU horizontal maximal, moment induit et effort en compression minimale associé.

Pour les fondations superficielles, ces combinaisons conduisent aux vérifications de la portance du sol, du tassement et de la rotation de la semelle sans oublier la prise en compte des effets de second ordre et de la résistance en flexion composée de la semelle.

Combinaisons FEM

La validation de la stabilité de la grue est supposée vérifiée par le constructeur avec les coefficients du tableau II, ce qui constitue donc une hypothèse fondamentale. En conséquence, si la stabilité de la grue n'est pas assurée dans une des deux dernières combinaisons indiquées précédemment (§ 4.4.1), il convient de remplacer dans ces dernières les coefficients 1,0 et 1,5 par les coefficients prévus dans le tableau T.9.15.a du cahier 9 de la norme FEM 1005 (cas I et II).

Il est à noter que ces coefficients sont nettement différents de ceux utilisés par les Eurocodes.

3.4.3

Conséquence de l'absence de décomposition des charges

Si on connaissait la décomposition des charges de type ELS en charges permanentes (CP), charges d'exploitation (Q) et effet du vent (V), le calcul des valeurs de type ELU (cf. § 4.4.1) serait simple. On peut toutefois arriver à résoudre le problème, en faisant des hypothèses plus ou moins discutables (cf. annexe 1), lesquelles permettent de calculer :

– les valeurs verticales cumulées CP et Q ;

– les valeurs horizontales H_Q et H_V ;

– les valeurs des moments de renversement induits par les charges CP, Q et V, soit respectivement M_{CP} , M_Q et M_V .

On pondère alors les valeurs verticales et horizontales, ainsi que les moments, par les coefficients de pondérations explicités au § 4.4.1.

Cela se traduit en pied de massif par l'application des torseurs suivants (compression, effort horizontal, moment) :

– $CP \times \Psi_{ELUCP} + Q \times \Psi_{ELUQ}$

– $H_Q \times \Psi_{ELUQ} + H_{VELS} \times \Psi_{ELUV}$

– $M = M_{CP} \times \Psi_{ELUCP} + M_Q \times \Psi_{ELUQ} + M_{VS} \times \Psi_{ELUV}$

où Ψ_{ELUCP} vaut 1 ou 1,35 ; Ψ_{ELUQ} est égal à 1 ou 1,5 (voire 1,35) et Ψ_{ELUV} vaut 1 ou 1,5.

TABEAU II Facteurs de charge donnés par le tableau T.9.15.a du cahier 9 de la norme FEM 1005.
Factors of security : extracts FEM.

Conditions	Charge	Facteur de charge à considérer
I. Stabilité de base	Charges dues au poids	1,00
	Charge appliquée	1,60
	Charge du vent	0,00
	Forces d'inerties	0,00
II. Stabilité dynamique	Charges dues au poids	1,00
	Charges appliquées	1,35
	Charge du vent	1,00
	Forces d'inertie	1,00
III. Stabilité arrière	Charges dues au poids	1,00
	Charges appliquées	0,20
	Charge du vent	1,00
	Forces d'inertie	0,00
IV. Charge de vent extrême	Charge dues au poids	1,00
	Charge appliquée	1,00
	Charge du vent	1,20
	Forces d'inertie	0,00

Après transformation du moment M en traction-compression TC, on obtient des torseurs simplifiés (compression, effort horizontal) en pied de grue et en tête de pieux.

Les annexes 1 et 2 présentent un exemple de calcul, facilement exploitable sur un tableur.

3.4.4

Cas particuliers des grues non scellées

L'approche proposée ci-dessus peut cependant conduire à des aberrations à l'ELU dans deux cas particuliers avec les coefficients de pondération du BAEL ou de l'Eurocode décrits au §. 4.4.1 quand :

- la flèche est parallèle à un des côtés de la grue et le vent parallèle à la flèche ;
- la flèche est en diagonale et le vent parallèle à la flèche.

• *Flèche parallèle à un des côtés de la grue avec vent parallèle à la flèche*

Il peut arriver que la charge moyenne R_{moy} soit inférieure à la traction/compression induite par le moment de renversement TC_{ELUV} , ce qui correspond à un état d'instabilité de la grue comme le montre l'exemple ci-dessous en supposant que $TC_{CP} = -TC_Q/2$.

A partir des données du tableau III (et par exemple pour le cas 3), on peut calculer la charge moyenne R_{moy} et les différentes valeurs de traction compression TC :

- $CP = (606 + 70) / 2 = 338 \text{ kN}$;
- $R_{moy} = (CP + Q) / 4 = 360 \text{ kN}$;
- $Q = (627 + 94) / 2 - 338 = 22 \text{ kN}$.

En posant :

- $TC_{HS} = TC_{VHS} + TC_{CP}$;
- $TC_{ELS} = TC_{CP} + TC_Q + TC_{VELS}$;
- $TC_{VHS} = TC_{VELS} \times H_{VHS} / H_{VELS} = TC_{VELS} \times 102/38$;

on déduit :

$$TC_{ELU} = TC_{CP} \times 1 + TC_Q \times \Psi_{ELUQ} + TC_{V_{ELS}} \times \Psi_{ELUV}$$

Application numérique : $TC_{HS} = (606 - 70) / 2 = 273 \text{ kN}$ et $TC_{ELS} = (627 - 94) / 2 = 267 \text{ kN}$.

Les calculs conduisent aux valeurs suivantes, regroupées dans le tableau IV, pour TC_{ELU} et la stabilité en fonction des majorations de type Eurocodes et des valeurs possibles de TC_{CP} .

TABEAU III Exemple de données.
Data examples.

Réaction par coin en service (kN) MD = 200 kNm				Réaction par coin en service (kN) MD 0 kNm					
Coin	Position de la flèche			Force H	Coin	Position de la flèche			Force H
	1	2	3			1	2	3	
A	304	545	94	38	A	272	608	70	102
B	779	881	627		B	808	606	606	
C	358	176	627		C	272	70	606	
D	0	39	94		D	0	70	70	

TABEAU IV Exemple de calcul pour une flèche parallèle à un des côtés de la grue avec un vent parallèle à la flèche.
Calculation example of a parallel jib to one crane side with a wind blowing parallel to the jib.

TC_{CP}	$TC_{VHS} = 273 - TC_{CP}$	$TC_{VELS} = TC_{VHS} \times 38/102$	$TC_Q = 267 - TC_{VELS} - TC_{CP}$	$TC_{ELU} = TC_{VELS} + 0,5 \times TC_Q$	$TC_{ELU} > 338 + 0,5 \times 22$
0	273	101	166	350	stable
-50	323	120	197	366	stable
-100	373	139	228	381	instable
-120	393	147	240	388	instable
-150	423	158	259	396	instable
-200	473	177	290	412	instable

Pour des valeurs de TC_{CP} supérieures à 50 kN, on ne peut alors vérifier que les combinaisons FEM avec Ψ_{ELUQP} valant respectivement 1 ou 1,6 et Ψ_{ELUV} valant respectivement 1 ou 0.

En tout état de cause pour une grue non scellée, on ne peut donc majorer le moment de renversement ELS ($= M_{CP} + M_Q + M_V$) que jusqu'à une valeur M_{ELU} ($= \delta \times M_{ELS}$) telle que $M_{ELU} / (2 \times e) = R_{moy}$. Ce coefficient δ s'applique aussi au calcul pour la flèche en diagonale.

• *Flèche en diagonale avec vent parallèle à la flèche*

Il peut arriver qu'une des réactions soit nulle et que les sommes des diagonales ne soient pas égales, ce qui traduit qu'un pied se soulève (Fig. 7).

On peut trouver ce cas à partir des données constructeurs ou l'obtenir après pondération.

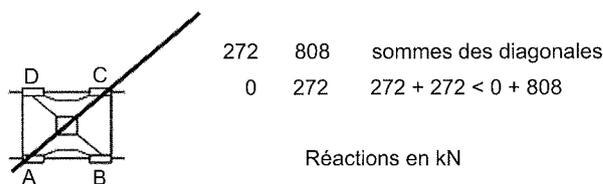


FIG. 7 Exemple de flèche en diagonale avec vent parallèle à la flèche.

Example of a jib set diagonally with a wind blowing parallel to the jib.

La structure étant relativement rigide, les quatre appuis A, B, C et D restent théoriquement dans un même plan pour des déplacements verticaux respectifs d_A, d_B, d_C et d_D :

- $d_D = d_B = (d_A + d_C) / 2$;
- donc $d_A = 2 \times d_D - d_C$.

Le déplacement vertical à la base de chaque appui est proportionnel à la charge appliquée. Donc, si le déplacement du point C est proportionnel à R_C (808 kN), et ceux de D et B proportionnels à $R_D (= R_C = 272 \text{ kN})$, le déplacement du point A est proportionnel à -264 kN comme calculé ci-dessous :

$$d_A \# 272 \times 2 - 808 \# -264 < 0$$

d'où un soulèvement du point A.

Ce résultat suppose l'enfoncement des points B et C. En cas de grue posée sur une seule semelle, le soulèvement de A entraîne celui de D et de B, d'où une instabilité.

3.5

Étude de la répartition des efforts horizontaux

Ces efforts peuvent avoir plusieurs origines :

- les charges d'exploitation de la grue en service ;
- les efforts de freinage en cas de grue sur voie ;
- les moments de torsion ;
- les charges dues au vent, tant en service que hors service, qui sont :
 - toujours parallèles à la flèche quand la grue est hors service,
 - souvent données dans le cas d'un vent parallèle ou perpendiculaire à la flèche.

Si la grue est fondée sur une fondation superficielle, le bureau d'études (BET) de l'entreprise doit vérifier la stabilité au glissement de cette fondation vis-à-vis des efforts horizontaux, en mobilisant le frottement à la base et si besoin une butée suffisante (dans le respect de la compatibilité des déformations).

Si la grue est fondée sur des pieux, on suppose que la totalité des efforts horizontaux est reprise par ces pieux.

Pour que le bureau d'études de l'entreprise justifie qu'une partie de cet effort horizontal est reprise par un appui extérieur, il faut répartir cet effort au prorata des raideurs horizontales des pieux et de cet appui extérieur.

3.5.1

Effort horizontal induit par le moment de torsion

Le moment de torsion se traduit par l'application de quatre efforts identiques en valeur (mais pas en direction) en pied de fût :

$$H_{t2} = M_t / [4 \times (d \times 1,414 / 2)]$$

où d est la distance entre les pieds du fût, et par l'application de quatre efforts identiques en valeur (mais pas en direction) en tête de pieu (Fig. 8) ;

$$H_{t1} = M_t / [4 \times (e \times 1,414 / 2)]$$

où e est la distance entre les pieux.

Si les pieux ne sont pas reliés par un réseau de longrines suffisamment rigides et si un des pieux n'est pas sollicité verticalement par la grue, on ne répartit les efforts horizontaux que sur trois pieux.

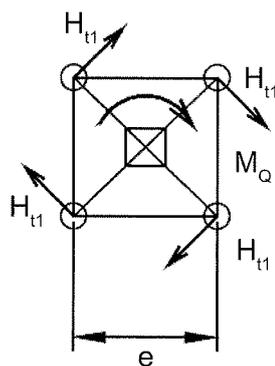


FIG. 8 Effet du moment de torsion. Incidence of the torque.

Il est à noter que ce moment de torsion ne s'applique qu'en service.

Par sécurité, et en absence de connaissance précise de la configuration des pieux, du terrassement et du génie civil, on peut ne répartir le moment de torsion que sur deux pieux diamétralement opposés :

$$H_{t1} = M_t / [2 \times (e \times 1,414 / 2)]$$

3.5.2

Autres efforts horizontaux appliqués aux fondations profondes

Il s'agit des efforts dus au vent ou au freinage.

Si les pieux sont reliés par un réseau de longrines suffisamment rigides (ou par un massif unique), chacun d'entre eux a le même déplacement horizontal sous l'effet de l'effort horizontal total : il faut donc diviser l'effort horizontal par le nombre de pieux concernés, ou le répartir au prorata de leurs raideurs si celles-ci sont différentes.

Cette approche est indépendante de la charge verticale s'appliquant sur les pieux.

Dans le cas contraire, la transmission des efforts en tête de pieux dépend de la rugosité de l'appui et des compressions respectives transmises aux pieux par la grue :

- les pieux les plus chargés seraient les plus sollicités horizontalement ;
- le cas de la flexion composée est le plus défavorable.

Néanmoins, par sécurité, il convient de vérifier les pieux les moins chargés comme s'ils étaient soumis à un minimum d'effort horizontal correspondant à l'effort total divisé par le nombre de pieux sollicités.

La géométrie de la liaison entre les pieux et la grue est donc un paramètre prépondérant pour le calcul de la répartition de l'effort horizontal, et pour le calcul de la résistance du pieu en flexion composée.

Par ailleurs, il peut arriver qu'une partie des fondations soit à proximité d'un talus, voire décaussée suite au terrassement de celui-ci. La raideur des pieux concernés est alors fortement diminuée et le calcul de la répartition de l'effort horizontal au prorata des raideurs doit en tenir compte.

3.5.3

Cumul des efforts définis au § 3.5.1 et des efforts définis au § 3.5.2

Les efforts du vent en service se cumulent vectoriellement avec les efforts induits par le moment de torsion. Par simplification et par sécurité, on suppose généralement que ces efforts ont la même direction et qu'ils se cumulent arithmétiquement.

4

Réflexions pour l'élaboration de futures recommandations

4.1

Propositions aux constructeurs

On rappelle que les fondations doivent être vérifiées non seulement à l'ELS, mais aussi à l'ELU. Cela concerne

autant les fondations superficielles que les fondations profondes, et autant la portance du sol que la résistance des matériaux. Il importe donc que le constructeur fournisse au moins les valeurs maximales :

- de la charge permanente : CP et M_{CP} ;
- des charges d'exploitation : Q, M_Q , Mt et H_Q ;
- si possible, dans chacun des cas et en fonction de la direction du vent (parallèle ou perpendiculaire à la flèche), la décomposition du torseur du vent : V, M_V et H_V ;
- hors service, la valeur du vent prise en compte V_{HS} ainsi que la valeur caractéristique V_{car} , et les valeurs du torseur (V, H et M) afin de pouvoir calculer la pondération à appliquer sur ce torseur à l'ELU, pondération au minimum égale à 1,2 et au maximum égale à 1,5 en fonction de la vérification de la stabilité.

4.2

Propositions aux bureaux d'études

Le bureau d'études (BET) doit demander au minimum :

- un tableau des descentes de charges répondant aux prescriptions évoquées au § 4.1 ;
- une campagne de reconnaissance des sols adéquate de type projet (étape 2, mission G2 au sens de la norme NFP 94 500 de décembre 2006).

Le bureau d'études doit également prendre en compte les sujétions de terrassement.

En cas de fondation superficielle, il convient de vérifier à l'ELS la portance et la compatibilité de la rotation calculée avec le fonctionnement de l'ouvrage.

À l'ELU et à l'ELS, il faut vérifier :

- pour les fondations superficielles, la stabilité du massif vis-à-vis du glissement et du renversement, la résistance des matériaux en flexion, le pourcentage de sol comprimé sous la semelle. En cas de fondation sur un massif unique, les sols de fondations doivent rester entièrement comprimés à l'ELS_{qp} (c'est-à-dire sous la seule action de M_{CP}), et comprimés sur au moins la moitié de la surface à l'ELU ;
- pour les fondations profondes, le dimensionnement de la liaison entre les fondations et la grue en termes de résistance de matériau, sans oublier l'influence des tolérances d'exécution des pieux (en général 15 cm dans toutes les directions).

Dans le cas de fondations profondes, le bureau d'études doit communiquer à l'entreprise de fondations, en plus des renseignements fournis par le constructeur en pied de grue et en plus des plans d'exécution du génie civil, à l'ELS et à l'ELU :

- les valeurs maximales et minimales des efforts verticaux par pieu, intégrant le poids du massif ;
- les valeurs de l'effort horizontal associé.

Il doit en outre satisfaire aux dispositions constructives présentées ci-après.

5

Dispositions constructives

En cas de fondations superficielles isolées (cas d'un plot sous chaque appui), celles-ci doivent être reliées par un réseau de longrines suffisamment rigides pour répartir de façon uniforme les efforts horizontaux.

En cas de fondations superficielles sur un massif unique, les sols de fondations doivent rester entièrement comprimés à l'ELS, comprimés sur au moins la moitié de la surface à l'ELU.

En cas de fondations profondes, celles-ci doivent être reliées par un réseau de longrines suffisamment rigides pour répartir de façon uniforme les efforts horizontaux, et ne jamais être en traction à l'ELS_{qp}.

Ces fondations profondes doivent être encastrees dans ce réseau de longrines, ce qui impose un ferrailage correspondant aux moments d'encastrement pour le pieu ainsi que pour la longrine. Elles doivent aussi respecter les prescriptions suivantes :

- diamètre minimal égal à 50 cm ;
- être armées au minimum sur 8 m d'une cage composée verticalement de 5 HA 16 au minimum ;
- en cas de traction à l'ELU, être armées sur toute la hauteur.

6

Conclusion

Le dimensionnement des fondations sous les grues en l'absence de descentes de charges exploitables (sans hypothèses simplificatrices pour les calculs de type ELU) pose plusieurs questions essentielles.

La sécurité des personnels liés à l'exploitation des grues impose encore plus de rigueur dans le dimensionnement et les justifications (et donc dans la connaissance des hypothèses des descentes de charges), du fait des risques encourus importants pouvant placer tous les intervenants dans le domaine pénal.

Il est souhaitable qu'une commission associant les constructeurs de grues, l'administration centrale, les bureaux de contrôles, les bureaux d'études, les entreprises de gros œuvre et les entreprises de fondations se réunisse pour statuer sur :

- les dispositions constructives suivantes (liste non exhaustive) :
 - diamètre minimal des pieux égal à 50 cm,
 - cage d'armature sur au moins 8 m avec encastrement dans le génie civil (semelle, longrine, etc.),
 - interdiction de traction dans les pieux à l'ELS_{qp},
 - en cas de fondations superficielles sur un massif unique, obligation que les sols restent entièrement comprimés à l'ELS, comprimés sur au moins la moitié de la surface à l'ELU,
 - réseaux de longrines suffisamment rigides entre les pieux ;
 - la présentation des descentes de charges et les renseignements minimaux que le constructeur doit fournir, pour la grue en service ou hors service, à la base du fût :
- les charges permanentes : CP et M_{CP}
- les charges d'exploitation : Q, M_Q , M_t et H_Q
- les charges du vent : V, M_V et H_V
- les combinaisons d'actions et les coefficients de pondération correspondant qu'il faut vérifier à l'ELU.

Bibliographie

Eurocode 1 XP ENV 1991-2-4 – Base de calcul et actions sur les structures.
Eurocode 7 NF EN 1997-1/NA – Calcul géotechnique, 2006.
Fascicule 62-Titre V – Règles techniques de conception et de calcul des fondations des ouvrages de génie civil, septembre 1993.
DTU 13.2 Travaux de bâtiment – Travaux de fondations profondes pour le bâtiment.

Partie 2 Cahier des clauses spéciales (normes P11-212 et NF P11-212-2).
DTU 13.1 – Règles pour le calcul des fondations superficielles (norme DTU P11-711).
FEM 1005 – Recommandations pour le calcul des structures de grues à tour hors service. Fédération européenne de manutention, novembre 2003.

Afnor NF EN 13001 – Appareils de levage à charges suspendues – Conception générale
CNAMTS – Recommandations R 406. Prévention du risque de renversement des grues à tour sous l'effet du vent. Caisse nationale d'assurance maladie pour la protection des travailleurs salariés, juin 2004.

Annexe 1 : Calcul approché de la décomposition des charges avec six cas de charge

Certains fournisseurs donnent uniquement un tableau de réaction à la base de la grue selon trois cas en service et trois cas hors service (Tableau V).

La symétrie des réactions des cas 1 et 3 (en service) permet de conclure que le vent est parallèle à la flèche. Le contraire permet de conclure que le vent est perpendiculaire à la flèche (cas 2). Toutefois, avec ce tableau, on ne peut pas différencier l'effet horizontal du freinage de celui du vent.

Par comparaison des moments de renversement des cas 3 et 3', on peut reconstituer l'effet moteur du vent (M_{V3} et $M_{V3'}$) et des charges d'exploitation (M_Q) ainsi que l'effet résistant des charges permanentes (M_{CP}), grâce à l'analyse du moment autour de l'axe perpendiculaire à la flèche et avec deux hypothèses :

- sur la valeur de $H_{V3'}/H_{V3}$: $b = M_{V3'}/M_{V3} = H_{V3'}/H_{V3} = 4$;
- sur le rapport entre M_{CP} et M_Q : $M_{CP} = -M_Q / 2$.

Cela conduit aux estimations suivantes :

- cas 3' : $M_{3'} = M_{V3'} + M_{CP} = M_{V3'} - 0,5 \times M_Q$ avec $M = (R_{max} - R_{min}) \times e$;
- cas 3 : $M_3 = M_{V3} + M_Q + M_{CP} = M_{V3} / 4 + 0,5 \times M_Q$;
- $M_{V3'} = (M_{3'} + M_3) / 1,25$;
- $M_{V1} = M_{V3} / 4$;
- $M_Q = 2 \times (M_{V3} - M_{3'})$;
- $M_{CP} = -0,5 \times M_Q$.

Ce n'est qu'une proposition d'approche de calcul. Il est important de remarquer que si on connaissait M_{CP} et M_Q , on n'aurait pas à faire les deux hypothèses précitées.

Application numérique :

$$e = 6 \text{ m}$$

$$M_{V3'} = [(870 - 104) + (823 - 217)] \times 6 / 1,25 = 6\,693 \text{ kNm} ;$$

$$M_{V3} = 6\,693 / 4 = 1\,521 \text{ kNm} ;$$

$$M_Q = 2 \times [6\,693 - (870 - 104) \times 6] = 2 \times (6\,693 - 4\,596) = 4\,193 \text{ kNm} ;$$

$$M_{CP} = -M_Q / 2 = -2\,097 \text{ kN}.$$

Annexe 2 : Calcul approché de la décomposition des charges avec neuf cas de charge

Certains fournisseurs indiquent uniquement un tableau de réaction à la base de la grue selon six cas en service et trois cas hors service (Tableau VI).

Par comparaison des efforts horizontaux des cas A et B, on peut procéder à la décomposition horizontale suivante :

- effet du freinage en cas de grue sur voie ;
- H_Q = effort perpendiculaire à la flèche dans le cas B : 1,1 t ;
- effet du vent ;
- H_{V1} = effort parallèle à la flèche dans le cas B = 3,4 t ;
- NB (cas B) : 4,4 = 1,1 + 3,4 t.

Par comparaison des moments de renversement des cas G, A et D, on peut reconstituer l'effet moteur du vent (M_{V1} et M_{V3}) et des charges d'exploitation (M_Q) ainsi que l'effet résistant des charges permanentes (M_{CP}), grâce à l'analyse du moment autour de l'axe perpendiculaire à la flèche, en supposant que le moment du vent est proportionnel à la valeur de l'effort horizontal de celui-ci :

TABLEAU V Exemple de données pour six cas de charge.
Example of data for six load cases.

Zone de vent E10/D50								
écartement 6 m								
Coin	en service réaction par coin (kN), MD = 396 kNm				hors service réaction par coin (kN), MD = 0 kNm			
	Position de la flèche				Position de la flèche			
	1	2	3	Force H	1'	2'	3'	Force H
A	520	777	217	64	399	870	104	202
B	953	870	823		1 150	870	870	
C	520	264	823		399	104	870	
D	87	171	217			104	104	

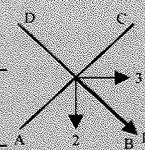
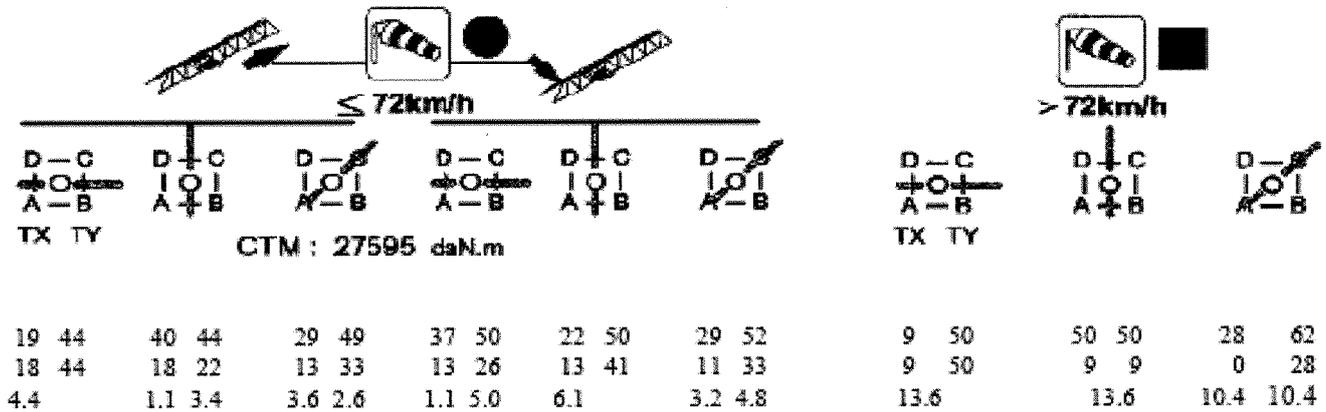


TABLEAU VI Exemple de données pour neuf cas de charge.
Example of data for nine load cases.

Grue en service			Grue en service			Grue hors service		
Vent parallèle à la flèche			Vent perpendiculaire à la flèche			Vent parallèle à la flèche		
A	B	C	D	E	F	G	H	I



- cas G : $M_G = M_{V3} - M_{CP}$ avec $M_G = (R_{max} - R_{min}) \times e$;
 - cas A : $M_A = M_{V1} + M_Q - M_{CP}$ avec $M_A = (R_{max} - R_{min}) \times e$;
 - cas D : $M_D = M_Q - M_{CP}$ avec $M_D = (R_B - R_A) \times e$;
- e est la distance entre les appuis. On en déduit alors :
- $M_{V1} = M_A - M_D$;
 - $M_{V3} = M_{V1} \times (H_{V3} / H_{V1})$;
 - $M_{CP} = H_{V3} / H_{V1} \times (M_A - M_D) - M_G$;
 - $M_Q = M_D + M_{CP}$

Ce n'est qu'une proposition d'approche de calcul. Il est important de remarquer que si on connaissait M_{CP} et M_Q , on n'aurait pas à faire les deux hypothèses précitées.

Application numérique :
 $e = 6$ m
 $Q = (9 + 50) \times 2 = 118$ t ; d'où une moyenne par appui de 29,5 t ;
 $H_{V3} / H_{V1} = 13,6 / 3,4 = 4$;
 $M_{V1} = [(44 - 19) - (50 - 37)] \times 6 = 72$ tm ;
 $M_{V3} = 72 \times 4 = 288$ tm ;
 $M_{CP} = 288 - (50 - 9) \times 6 = 42$ tm ;
 $M_Q = 6 \times (50 - 37) + 42 = 120$ tm.

Dans le calcul à l'ELU, pour le cas G (hors service), $TC = M / (2 \times 6)$. On ne peut majorer le moment M_{V3} que par 1,36 pour que les réactions aux points D et A soient juste supérieures à 0 sinon la grue bascule :

$$29,5 + (M_{CP} - M_{V3} \times 1,36) / (2 \times 6) = 0$$