



NCCI : Calcul d'assemblages de pieds de poteaux encastrés

Ce NCCI fournit les règles relatives au calcul d'assemblages de pieds de poteaux encastrés. Ces règles se contentent de couvrir la conception et le calcul d'assemblages symétriques avec plaque d'assise non raidie de pieds de poteaux en I soumis à un effort normal, à un effort tranchant et à un moment fléchissant autour de l'axe de forte inertie du poteau. La conception d'une bêche de cisaillement, le cas échéant, est couverte par le document SN021. Les règles données peuvent facilement être élargies aux pieds d'autres types de poteaux.

Sommaire

1.	Introduction	2
2.	Paramètres	4
3.	Modèle de calcul et ses limites d'utilisations	5
4.	Premier calcul : Dimensionnement d'une plaque d'assise pour le chargement au pied d'un poteau de section donnée	9
5.	Deuxième calcul : Détermination des résistances de calcul d'une plaque d'assise donnée	13



1. Introduction

Ce NCCI couvre le calcul de pieds encastrés des poteaux en I transmettant un effort normal, un effort tranchant et un moment fléchissant. La plaque d'assise rectangulaire est soudée au poteau de manière symétrique pour qu'elle déborde de tous côtés au-delà des bords externes de la semelle du poteau (voir la Figure 1.1). Des rangées de boulons d'ancrage, perpendiculaires par rapport à l'axe de forte inertie du poteau, sont placées symétriquement par rapport à l'axe faible du poteau. Il est possible de poser la plaque d'assise de manière excentrique sur les fondations en béton.

En pratique, les deux cas de calcul suivants se présentent :

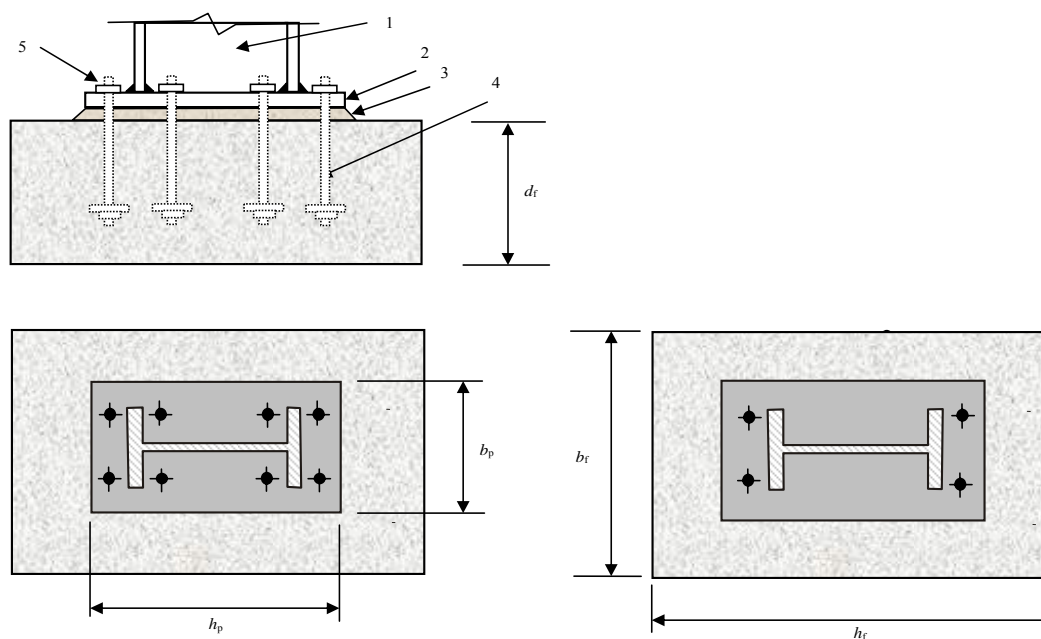
1. Les dimensions de la section du poteau, ainsi que l'effort normal, l'effort tranchant et le moment de calcul concomitants sont connus. Il reste à déterminer les dimensions de la plaque d'assise et des boulons d'ancrage requis.
2. Les dimensions de la section du poteau, de la plaque d'assise et des fondations d'une structure particulière sont connues. Il est obligatoire de vérifier que l'assemblage peut résister de façon sécuritaire aux différentes combinaisons d'effort axial, d'effort tranchant et de moment fléchissant qui se présentent.

Les procédures de calcul relatives à ces deux cas figurent aux Sections 4 et 5 respectivement.

Tout en notant plus particulièrement l'importance de la relation intrinsèque qui existe entre les valeurs de calcul du moment fléchissant et de l'effort normal concomitant, la détermination, de manière satisfaisante, des caractéristiques fondamentales des composants de l'assemblage (c'est-à-dire la résistance entre le scellement et la fondation, la surface et l'épaisseur de la plaque d'assise, les dimensions et l'emplacement des boulons d'ancrage), il est généralement nécessaire de vérifier séparément tous les composants de l'assemblage pour les efforts et les moments concomitants résultant d'un certain nombre de cas de combinaisons de charge agissant sur la structure.

La résistance à l'effort tranchant de l'assemblage avec plaque d'assise est couverte par le document [SN037](#) et, si la résistance par frottement est insuffisante, par le document [SN043](#). L'effort tranchant n'est pas considéré comme ayant un effet sur la résistance de l'assemblage à l'action combinée d'un effort normal et d'un moment fléchissant.

La rigidité de l'assemblage avec plaque d'assise est obtenue en utilisant le document [SN045](#).



Légende :

1. Poteau en I
2. Plaque d'assise
3. Scellement
4. Fondations en béton
5. Boulon d'ancrage

Figure 1.1 Assemblages types de pied de poteau avec plaque d'assise encastrés

2. Paramètres

Tableau 2.1 Paramètres

Définition		Définition	
b_{eff}	Largeur efficace de la semelle de tronçon en T équivalent.	A_s	Aire de la section d'un boulon d'ancrage.
c	Largeur d'appui additionnelle (en dehors du périmètre de la section du poteau).	$F_{t,Rd}$	Résistance de calcul à la traction de la section d'un boulon d'ancrage.
e_N	Excentricité de la charge normale participante exprimée par le rapport M_{Ed}/N_{Ed} , du moment appliqué M_{Ed} et de l'effort axial concomitant N_{Ed} .	$F_{t,bond,Rd}$	Résistance de calcul à l'adhérence d'ancrage d'un boulon d'ancrage.
b_t, h_t, d_t	Largeur, longueur et profondeur de la fondation.	$F_{t,anchor,Rd}$	Résistance de calcul d'un boulon d'ancrage tendue = $\min(F_{t,Rd}; F_{t,bond,Rd})$.
f_{yb}	Limite d'élasticité du boulon d'ancrage.	$F_{t,l,Rd}$	Résistance de calcul à la traction du tronçon en T équivalent sous la rangée de boulons d'ancrage située du côté gauche.
f_{yp}	Limite d'élasticité de la plaque d'assise.	$F_{t,r,Rd}$	Résistance de calcul à la traction du tronçon en T équivalent sous la rangée de boulons d'ancrage située du côté droit.
f_{jd}	Résistance de calcul à l'écrasement du matériau de scellement.	$F_{c,l,Rd}$	Résistance de calcul à la compression du tronçon en T équivalent sous la semelle comprimée située du côté gauche.
f_{cd}	Résistance de calcul à la compression du béton conforme à l'EN 1992-1-1.	$F_{c,r,Rd}$	Résistance de calcul à la compression du tronçon en T équivalent sous la semelle comprimée située du côté droit.
$b_{tc}, t_{tc}, t_{wc}, h_c$	Largeur et épaisseur de la semelle, épaisseur et hauteur de l'âme d'un poteau en I.	L_B	Longueur du boulon d'ancrage soumise à un allongement de traction.
b_p, h_p, t_p	Largeur, longueur et épaisseur de la plaque d'assise.	M_{Ed} $M_{j,Ed}$	Moment de calcul appliqué par le poteau (positif si dans le sens des aiguilles d'une montre) à l'assemblage de pied, en conjonction avec N_{Ed} .
l_{eff}	Longueur efficace de la semelle de tronçon en T équivalent.	$M_{j,Rd}$	Moment résistant de calcul de l'assemblage de pied de poteau pour une excentricité participante donnée, $e_N = M_{Ed}/N_{Ed}$ de la charge normale $N_{Ed} = N_{j,Rd}$.
m, n, e	Paramètres géométriques de la semelle de tronçon en T équivalent.	N_{Ed} $N_{j,Ed}$	Effort de calcul de la compression axiale (positif si de traction) au pied de poteau, en conjonction avec le moment M_{Ed} .
γ_{M0}	Coefficient partiel sur la résistance à la flexion de la plaque d'assise.	$N_{j,Rd}$	Résistance de calcul à l'effort normal de calcul du pied de poteau à une excentricité participante de $e_N = M_{Ed}/N_{Ed} = M_{j,Rd}/N_{j,Rd}$.
z	Bras de levier entre l'effort du côté gauche et l'effort du côté droit induits sur l'assemblage du pied du poteau à la fondation.		
$z_{T,r}$	Distance séparant l'axe de forte inertie du poteau d'une rangée de boulons d'ancrage située du côté droit.		
$z_{T,l}$	Distance séparant l'axe de forte inertie du poteau d'une rangée de boulons d'ancrage située du côté gauche.		
$z_{C,l}$	Distance séparant l'axe de forte inertie du poteau du centre de compression du tronçon en T équivalent située du côté gauche.		
$z_{C,r}$	Distance séparant l'axe de forte inertie du poteau du centre de compression du tronçon en T équivalent. située du côté droit.		

3. Modèle de calcul et ses limites d'utilisations

3.1 Modèle de calcul

Le modèle de calcul pour un assemblage de pied de poteau avec plaque d'assise encastré soumis à l'action combinée d'un effort normal et d'un moment fléchissant s'exerçant par rapport à l'axe de forte inertie du poteau est donné au [§6.2.8 de l'EN 1993-1-8](#).

Les répartitions de sollicitations les plus habituelles dans un assemblage de pied de poteau encastré, illustrées aux Figure 3.1 a), b) et c) respectivement, sont les suivantes :

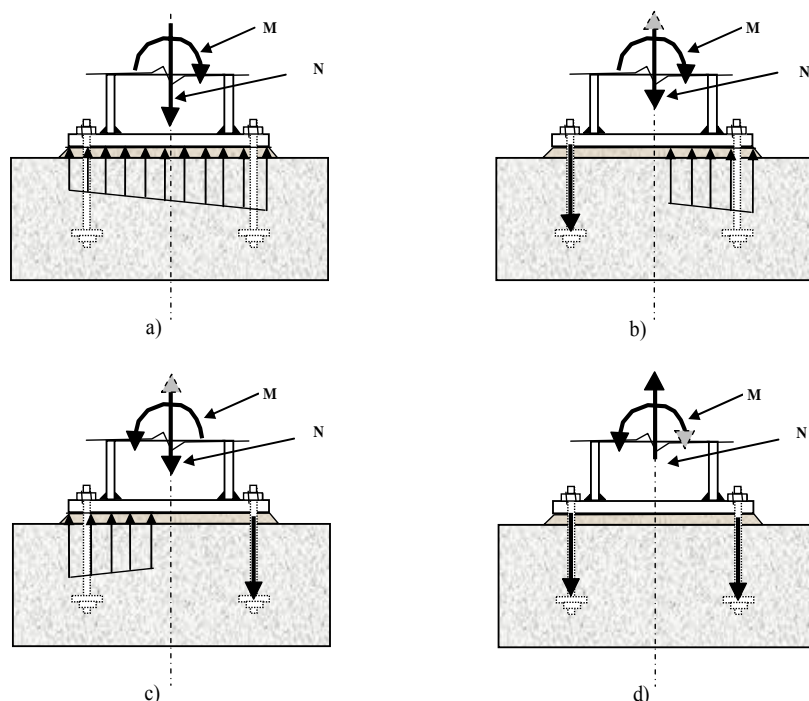
- ☐ Compression de part et d'autre de l'assemblage due à une charge de compression axiale dominante combinée à
 - soit un moment dans le sens des aiguilles d'une montre
 - soit un moment dans le sens inverse des aiguilles d'une montre
- ☐ Traction sur le côté gauche et compression sur le côté droit dues à un moment dominant dans le sens des aiguilles d'une montre combiné à
 - soit un effort axial de compression
 - soit un effort axial de traction (poussée ascendante)
- ☐ Compression sur le côté gauche et traction sur le côté droit dues à un moment dominant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre combiné à
 - soit un effort axial de compression
 - soit un effort axial de traction (poussée ascendante)

Dans les formules de calcul données au [Tableau 6.7 de l'EN 1993-1-8](#), une distinction est faite entre les deux derniers cas, qui permet d'utiliser des paramètres, des symboles et une convention de signe facilitant l'étude d'assemblages non symétriques soumis à des cas de sollicitation multiples. Un autre cas de répartition de sollicitations avec traction des deux côtés de l'assemblage (Figure 3.1d)), où une charge de traction axiale est dominante, vient compléter les possibilités théoriques des répartitions de sollicitations. Bien qu'il ne soit pas habituel qu'une traction s'exerce sur l'ensemble d'un pied de poteau encastré dans des bâtiments ordinaires, c'est chose possible au niveau des barres verticales de contreventements nécessaires pour transmettre des charges latérales élevées (par exemple dans des bâtiments industriels où opèrent des appareils de levage ou dans des bâtiments soumis à des charges sismiques importantes).

Un modèle mécanique simplifié est adopté ; ce modèle envisage que l'effort de réaction éventuel exercé sur un côté donné de l'assemblage, quel qu'il soit, peut être soit un effort de traction exercé dans une rangée de boulons d'ancrage unique, soit un effort de compression exercé sur l'assemblage de la fondation sur une surface d'appui centrée sous la semelle du poteau. La résistance de calcul du composant critique de l'assemblage (tronçon en T équivalent, comprimé ou tendu) détermine le moment résistant de calcul qui agit concomitamment avec l'effort normal donné.

Les formules données au [Tableau 6.7 de l'EN 1993-1-8](#) sont dérivées de l'équilibre entre la combinaison appliquée du moment et de l'effort normal et des efforts de réaction induits sur la

plaque d'assise. Elles couvrent chacun des quatre scénarios de répartition de charge envisageables et distincts pour la configuration de base de l'assemblage de pied de poteau avec plaque d'assise illustré à la Figure 3.1.



Légende :

- a) Compression sur les deux côtés de l'assemblage
- b) Compression sur le côté droit et traction sur le côté gauche
- c) Compression sur le côté gauche et traction sur le côté droit
- d) Traction sur les deux côtés de l'assemblage (cas rare)

Figure 3.1 Répartition des sollicitations

3.2 Résistance de calcul

Pour le côté comprimé d'un assemblage, l'approche de base adoptée en matière de conception et de calcul consiste à veiller à ce que les contraintes résistantes exercées sous la plaque d'assise ne dépassent pas la résistance de calcul du matériau de scellement de la fondation et qu'elles n'entraînent pas non plus une flexion excessive de la plaque d'assise.

Le modèle de calcul suppose que la résistance est assurée par l'un ou par les deux tronçons en T équivalents comprimés sous les semelles du poteau, selon que la compression s'exerce sur une partie de la plaque d'assise du poteau, comme dans le premier cas, ou sur l'ensemble de la plaque d'assise du poteau comme dans le deuxième cas, ainsi que le montre la Figure 3.1. Pour un tronçon en T comprimé, on suppose que les contraintes d'appui sont réparties uniformément sur la surface du tronçon en T centrée sous la semelle de poteau, comme le montre la Figure 3.2. Dans l'approche simplifiée donnée dans l'EN 1993-1-8 pour la conception et le calcul d'assemblages de pied de poteau transmettant un moment fléchissant,



aucun effort de compression susceptible d'être transféré à travers un tronçon en T équivalent sous l'âme du poteau comprimé n'est directement pris en compte.

Dans ce NCCI, il est fait référence au document [SN037](#) pour la résistance de calcul des tronçons en T comprimés.

3.3 Résistance à la traction d'une rangée de boulons d'ancrage

Le modèle de calcul pour une rangée de boulons d'ancrage tendue est similaire à celui d'une rangée de boulons d'un assemblage avec platine d'extrémité transmettant un moment. En conséquence, l'approche adoptée en matière de calcul consiste à veiller à ce que l'effort de traction qui s'exerce dans la rangée de boulons d'ancrage ne dépasse aucune des deux résistances suivantes :

- ☐ La résistance de calcul à la traction du tronçon en T équivalent tendue de la plaque d'assise. Cela nécessite de prendre en compte les trois modes de ruine du tronçon en T tendue de base, identifiés au [Tableau 6.2 de l'EN 1993-1-8](#). Le cas échéant, il faudra envisager de remplacer les modes 1 et 2 par un mode unique (voir [Tableau 6.2 de l'EN 1993-1-8](#)). Ce mode est envisageable si l'effet de levier disparaît avec la perte de contact entre le bord de la plaque d'assise et la fondation en raison de l'allongement du boulon d'ancrage.
- ☐ Au besoin, c'est-à-dire pour des rangées de boulons d'ancrage comprises entre les semelles du poteau, la résistance de calcul en traction du composant du tronçon en T sous l'âme du poteau.

L'approche adoptée en matière de calcul est identique à celle adoptée pour une rangée de boulons d'une platine d'extrémité, à l'exception près qu'au moment de déterminer la résistance du boulon d'ancrage tendu, il est également nécessaire d'envisager que la résistance à l'adhérence d'ancrage peut s'avérer plus critique.

Dans le modèle mécanique simplifié, la résistance à la traction est présentée pour le cas où il n'existe qu'une seule rangée de boulons d'ancrage. Pour permettre d'appliquer directement les règles de calcul données pour le cas de rangées de boulons d'ancrage situées de part et d'autre de la semelle du poteau, il est recommandé d'utiliser une seule rangée dont la résistance totale à la traction est équivalente aux deux rangées agissant ensemble au niveau du centre de gravité. Il n'est pas recommandé d'envisager que d'autres rangées que celles situées autour des semelles du poteau contribuent à la résistance d'un pied de poteau encastré soumis à un moment combiné à un effort axial.

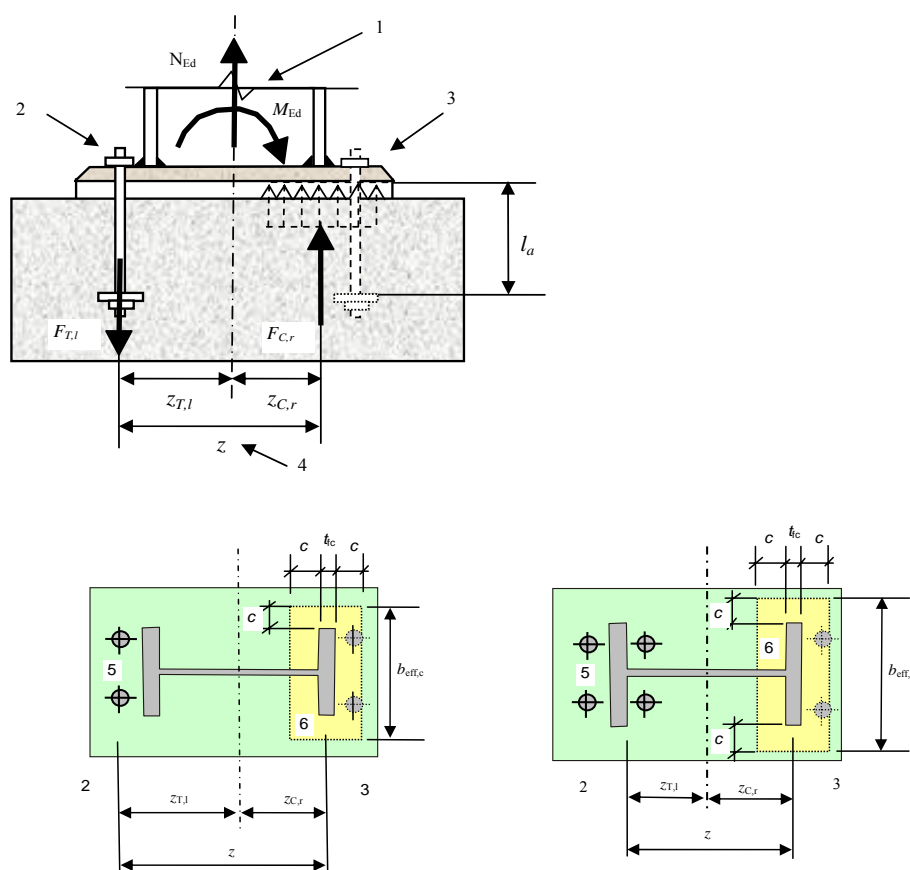
3.4 Limites d'utilisation

Les règles de calcul prévues se limitent aux applications concernant les types de plaques d'assise de poteaux non raidies illustrées à la Figure 1.1 soumises à l'action combinée d'un effort axial et d'un moment fléchissant agissant uniquement par rapport à l'axe de forte inertie du poteau. Ces règles couvrent le cas de deux boulons d'ancrage par rangée.

L'EN 1992-1-1 ne prévoit pas de règles de calcul pour la résistance à l'ancrage d'adhérence de barres lisses. Il est également jugé que les règles prévues pour les plis et les crochets des barres non lisses ne devraient pas être appliquées aux barres lisses. Aucune règle n'est donnée pour la conception et le calcul de boulons d'ancrage, telles qu'avec des plaques d'ancrage ou

des têtes spéciales. Ces questions peuvent faire l'objet de dispositions particulières dans les Annexes Nationales.

Dans le présent NCCI, la longueur d'ancrage de base de calcul des boulons d'ancrage lisses est considérée comme étant celle d'une barre non lisse divisée par un facteur de 2,25. Ce calcul est conforme à quelques-unes des règles nationales existantes relatives au béton armé et à des avant-projets initiaux pour l'Eurocode 2. Il faut noter que d'après le §6.2.6.12(5) de l'EN 1993-1-8, la limite d'élasticité de l'acier pour des barres d'ancrage pliées ou à crochet ne doit pas dépasser 300 N/mm².



Légende :

- 1 L'effort normal et le moment qu'exerce le poteau sur l'assemblage de pied de poteau avec plaque d'assise sont illustrés comme agissant dans le sens positif, tel que défini dans l'EN 1993-1-8, c'est-à-dire que les efforts normaux de traction sont positifs et que les moments positifs agissent dans le sens des aiguilles d'une montre.
- 2 Côté gauche de l'assemblage avec plaque d'assise lorsque les boulons d'ancrage sont tendus : le tronçon en T équivalent, formé de la plaque d'assise et de la rangée de boulons d'ancrage, résiste à l'effort de traction.
- 3 Côté droit de l'assemblage avec plaque d'assise lorsqu'elle est comprimée : l'assemblage de la fondation offre une résistance sur le dessous du tronçon en T de la plaque d'assise, lequel agit en fléchissant la semelle du poteau.
- 4 Bras de levier entre l'effort de traction qui s'exerce dans les boulons d'ancrage et l'effort de compression qui s'exerce sous la plaque d'assise.
- 5 Boulons d'ancrage.
- 6 Surface du tronçon en T comprimée.

Figure 3.2 Compression et traction des boulons d'ancrage induites par l'effort normal et le moment fléchissant

4. Premier calcul : Dimensionnement d'une plaque d'assise pour le chargement au pied d'un poteau de section donnée

4.1 Choix du type de plaque d'assise

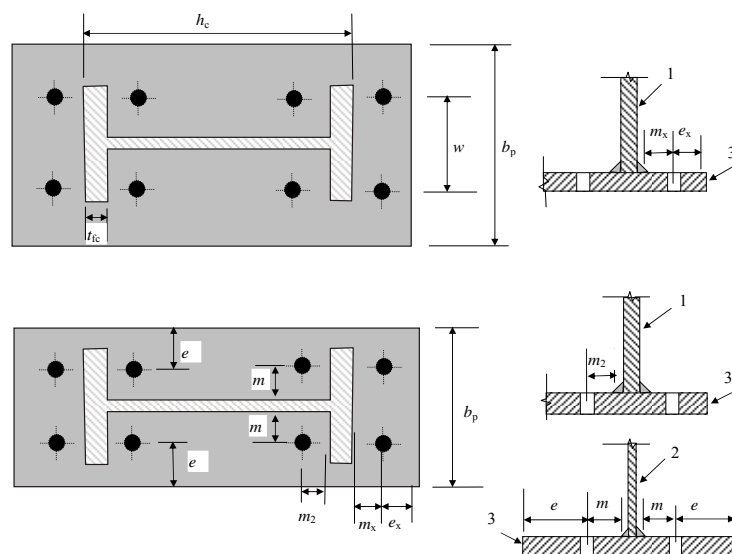
Il est recommandé que les plaques d'assise soient du type « à projection étendue » et soient suffisamment larges pour permettre de poser une rangée de boulons d'ancrage sur la projection, de part et d'autre du poteau. La résistance adéquate à la compression s'en trouve ainsi facilitée et, en augmentant le bras de levier entre les zones comprimées et tendues, les besoins de résistance mécanique sur les boulons d'ancrage tendus peuvent ainsi être réduits.

Le dimensionnement d'un assemblage avec plaque d'assise symétrique est présenté ci-après. Un type de pied à projection étendue est utilisé, comme le montre la Figure 4.1, avec des boulons d'ancrage

disposés sur une seule rangée sur la partie allongée de la plaque d'assise

ou disposés sur deux rangées, de part et d'autre de la semelle.

Chaque rangée comporte deux boulons d'ancrage placés symétriquement par rapport à l'axe faible du poteau.



Légende :

1. Semelle du poteau
2. Ame du poteau
3. Plaque d'assise du poteau

Figure 4.1 Paramètres géométriques pour le tronçon en T équivalent tendu

4.2 Choix des matériaux

Il est nécessaire de choisir la classe du béton, l'acier de la plaque d'assise et la classe des boulons d'ancrage. Pour des bâtiments types, il est pratique courante dans certains pays de recommander des boulons d'ancrage de classe 4,6, alors qu'ailleurs des boulons d'ancrage à

platine d'extrémité de classe 8,8 sont devenues plus habituelles. L'acier de la plaque d'assise n'est pas forcément de la même nuance que celui du poteau.

4.3 Estimation des efforts maximums de compression et de traction exercés sur la fondation

En tenant compte de l'ensemble des diverses combinaisons d'effort axial et de moment fléchissant (N_{Ed} , M_{Ed}) au niveau du pied de poteau, les expressions suivantes donnent des estimations de l'effort de compression maximal et de l'effort de traction maximal qui s'exercent sur la fondation :

- compression max($F_{C,Ed}$) : valeur maximale pour $F_{C,Ed} = \frac{|M_{Ed}|}{h_c - t_{fc}} - \frac{N_{Ed}}{2}$
- traction max($F_{T,Ed}$) : valeur maximale $F_{T,Ed} = \frac{|M_{Ed}|}{h_c - t_{fc}} + \frac{N_{Ed}}{2}$

Remarque : Bien que les expressions ci-dessus donnent les valeurs absolues pour les deux efforts, c'est le signe de la charge axiale N_{Ed} (positif en cas de traction, négatif en cas de compression) qui doit être utilisé pour celles-ci. Pour simplifier la notation N_{Ed} , M_{Ed} , N_{Rd} , et M_{Rd} sont écrits pour $N_{j,Ed}$, $M_{j,Ed}$, $N_{j,Rd}$ et $M_{j,Rd}$ respectivement.

4.4 Dimensionnement de la plaque d'assise pour l'effort de compression de l'assemblage maximal estimé

Pour dimensionner la plaque d'assise, il convient d'appliquer la procédure visée à la Section 4 du document [SN037](#), en supposant que la charge de compression axiale est

$$N_{j,Ed} = 2 \max(F_{C,Ed})$$

Une plaque d'assise à « projection étendue » est choisie dès le début de la procédure. Les valeurs pour les dimensions dans le plan de la plaque d'assise (b_p , h_p) et l'épaisseur de la plaque (t_p) sont obtenues.

4.5 Dimensionnement de l'épaisseur de la plaque d'assise et des boulons d'ancrage pour l'effort de traction d'assemblage maximal estimé

4.5.1 Résistance à la traction axiale d'un boulon d'ancrage

Résistance à l'adhérence d'ancrage et résistance à la traction des boulons d'ancrage

Au moment de considérer les modes de ruine d'un tronçon en T équivalent tendu, il est nécessaire de prendre la résistance de calcul d'un boulon d'ancrage tendu comme étant la moindre des deux valeurs suivantes :

- ☐ Résistance de calcul à l'adhérence d'ancrage (en supposant que de bonnes conditions d'adhérence existent) :

- Diamètre de la tige $\phi \leq 32$ mm : $F_{t,bond,Rd} = \frac{1}{2,25} (\pi \phi_b f_{bd})$,



○ Diamètre de la tige $\phi > 32$ mm : $F_{t,bond,Rd} = \frac{(132 - \phi)/100}{2,25} (\pi \phi l_b f_{bd})$.

où l_b est la longueur d'ancrage de base du boulon d'ancrage (en partant de la surface inférieure du scellement dans la fondation) et où f_{bd} est la résistance de calcul à l'adhérence du béton (§8.4.2(2) de l'EN 1992-1-1).

- *Remarque : L'EN 1992-1-1 prévoit des résistances de calcul à l'adhérence uniquement pour des barres non lisses. Le présent NCCI suppose que la valeur de calcul pour une barre lisse est la valeur donnée au §8.4 de EN 1992-1-1 (c'est-à-dire la valeur de calcul pour une barre non lisse du même diamètre, encastrée dans du béton similaire et dans des conditions similaires) divisée par 2,25. Il est possible que l'Annexe Nationale pertinente apporte de plus amples conseils.*

- résistance de calcul à la traction de la section du boulon d'ancrage $F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb,traction}}$

L'annexe A du présent NCCI donne la résistance de calcul à l'adhérence d'ancrage pour des diamètres de boulons d'ancrage de classe 4,6 fréquemment utilisés comme fonction de la longueur d'ancrage de base pour du béton de fondation type.

Il est nécessaire de réduire la profondeur d'ancrage dans la fondation en cas d'utilisation de boulons d'ancrage pliés ou à crochet. Toutefois, l'EN 1993-1-1 ne fournit pas la longueur d'ancrage d'adhérence équivalente pour des plis et des crochets de barres lisses, et il est donc nécessaire d'adopter d'autres règles pour y pourvoir, comme celles qui existent dans les normes nationales ou dans les recommandations reconnues sur le plan international.

Pour choisir définitivement les détails des boulons d'ancrage, tout particulièrement ceux en matière d'ancrage, il est nécessaire de connaître la profondeur de la fondation.

La résistance de calcul d'un boulon d'ancrage unique $F_{t, anchor, Rd}$ est prise comme étant égale à :

$$F_{t,anchor,Rd} = \min[F_{t,bond,Rd} ; F_{t,Rd}]$$

Taille des boulons d'ancrage

On suppose qu'une rangée de boulons d'ancrage sur la projection de la plaque d'assise sera adéquate. Pour empêcher la défaillance du boulon d'ancrage (mode 3), la résistance des boulons d'ancrage de la classe choisie doit satisfaire à la condition suivante :

$$2F_{t,anchor,Rd} \geq \max(F_{T,Ed})$$

Comme une première estimation, il est supposé que la résistance complète à la traction de la section du boulon d'ancrage peut être atteinte : $F_{t,anchor,Rd} = \frac{0,9 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$. La section de boulon

requis est donnée comme suit :

$$A_s \geq F_{T,Ed} \left(\frac{\gamma_{M2}}{1,8 f_{ub}} \right) \text{ à partir de quoi il est possible d'obtenir le diamètre du boulon}$$

d'ancrage.



Deux rangées de boulons d'ancrage

Si une rangée de boulons d'ancrage de la taille disponible ne convient pas, il faut alors décider d'utiliser deux rangées de boulons d'ancrage (soit quatre boulons d'ancrage de section A_s). La section du boulon d'ancrage devient alors :

$$A_s \geq F_{T,Ed} \left(\frac{\gamma_{M2}}{3,6 f_{ub}} \right)$$

Il est indispensable de vérifier cette dernière hypothèse quant à la résistance à la traction du boulon d'ancrage au moment d'établir les détails définitifs des longueurs d'ancrage d'adhérence. Le fait que le projeteur soit expérimenté en terme de conception de fondation standard et qu'il connaisse les pratiques de construction d'une région donnée l'aidera à choisir un boulon d'ancrage adapté. S'il n'est pas possible de garantir un ancrage complet pour tout diamètre ou toute classe donnés de boulon d'ancrage, il convient alors d'adopter une résistance inférieure à la résistance de calcul à la traction de la section.

4.5.2 Résistance de calcul d'un tronçon en T équivalent tendu avec une rangée de deux boulons d'ancrage

Epaisseur de la plaque d'assise

Il se peut que l'épaisseur de la plaque d'assise t_p obtenue pour la conception et le calcul de la plaque d'assise comprimée ne soit pas adéquate.

A partir de la résistance en mode 1 (mécanisme plastique complet), on obtient l'estimation suivante de l'épaisseur de la plaque (voir Figure 4.1 pour obtenir les paramètres) :

$$\text{Une rangée de boulons d'ancrage : } t_p \geq \sqrt{\frac{F_{T,Ed} \gamma_{M0}}{f_{yp} 2\pi}}$$

$$\text{Deux rangées de boulons d'ancrage : } t_p \geq \sqrt{\frac{F_{T,Ed} \gamma_{M0}}{f_{yp} 4\pi}}$$

4.6 Vérification de l'assemblage avec plaque d'assise encastrée

Les vérifications de résistance de calcul données à la Section 5 ci-dessous doivent être effectuées, en modifiant si nécessaire les dimensions de la plaque d'assise et/ou des boulons d'ancrage.

5. Deuxième calcul : Détermination des résistances de calcul d'une plaque d'assise donnée

5.1 Type d'assemblage

Il est supposé ci-dessous que l'assemblage est symétrique, avec une ou deux rangées de boulons d'ancrage (deux par rangée) de part et d'autre de l'assemblage (voir Figure 5.1).

Remarque : Pour un assemblage symétrique, les distances $z_{T,l} = z_{T,r} = z_T$ et $z_{C,l} = z_{C,r} = z_C$.

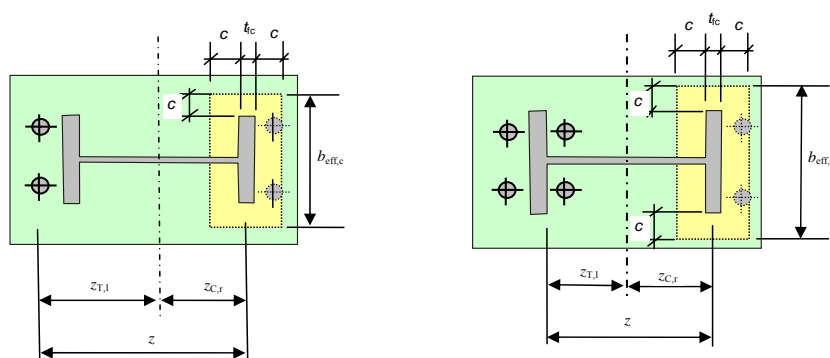


Figure 5.1 Compression et traction de boulon d'ancrage induites par l'effort normal et le moment appliqués

5.2 Vérification de la résistance des boulons d'ancrage

La résistance de calcul à la traction d'un boulon d'ancrage, $F_{t,anchor,Rd}$, s'obtient à partir de 4.5.1 ci-dessus :

$$F_{t,anchor,Rd} = \min[F_{t,bond,Rd} ; F_{t,Rd}]$$

5.3 Détermination de la résistance à la compression axiale

Se référer à la Section 5 du document [SN037](#) pour obtenir la résistance à la compression axiale de l'assemblage. Cette valeur est valable lorsque le moment appliqué concomitant est nul.

Elle donne une première indication des combinaisons possibles (N_{Ed} , M_{Ed}) auxquelles l'assemblage peut être soumis.

Il convient de noter que si une partie de la compression axiale est transférée par le biais d'un tronçon en T équivalent sous l'âme du poteau, la résistance obtenue sera supérieure à la somme des résistances pour les deux tronçons en T sous les semelles du poteau comprimés. Dans le modèle simplifié de l'EN 1993-1-8, la résistance en compression axiale se réduit à cette dernière valeur lorsque le moment appliqué est nul.



La résistance de chaque tronçon en T sous la semelle comprimé s'exprime ici comme étant $F_{C,Rd}$. La résistance à la compression axiale est alors donnée comme étant :

$N_{C,Rd} = -(2 F_{C,Rd})$, le signe négatif indiquant que la charge est de compression.

5.4 Détermination de la résistance à l'effort axial de traction

La résistance à la traction des rangées de boulons d'ancrage situées de part et d'autre de l'assemblage est obtenue.

Longueurs participantes du tronçon en T équivalent

Les modes de ruine possibles d'un tronçon en T équivalent tendu sont illustrés sous forme de schémas à la Figure 5.2. La longueur participante du tronçon en T est la suivante (voir Figure 4.1 pour obtenir la définition des paramètres géométriques) :

❑ Rangée extérieure de boulons d'ancrage :

○ Mécanisme circulaire : $l_{eff,cp} = \min[(2\pi m); (\pi m_x + w), (\pi m_x + 2e)]$

○ Mécanisme non circulaire :

$$l_{eff,nc} = \min[0,5b_p; (4m + 1,25e_x); (e + 2m_x + 0,625e_x); (0,5w + 2m_x + 0,625e_x)]$$

Longueur participante du tronçon en T pour le premier mode : $l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp} : l_{eff,nc})$

Longueur participante du tronçon en T pour le deuxième mode : $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$

❑ Rangée intérieure de boulons d'ancrage :

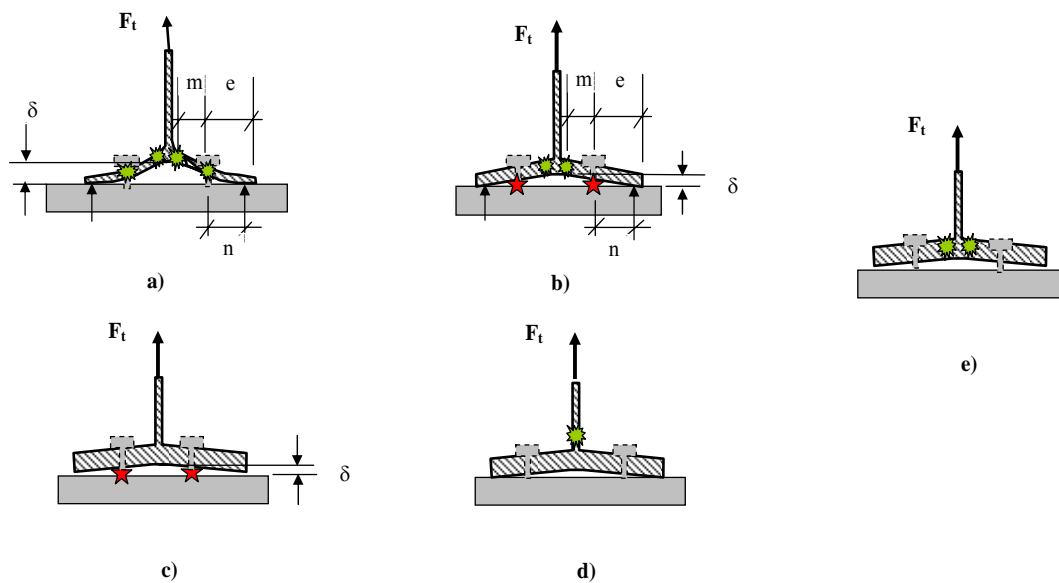
○ Mécanisme circulaire : $l_{eff,cp} = 2\pi m$

○ Mécanisme non circulaire : $l_{eff,nc} = (4m + 1,25e)$

Longueur participante du tronçon en T pour le premier mode : $l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp} : l_{eff,nc})$

Longueur participante du tronçon en T pour le deuxième mode : $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$

Pour le mode spécial indiqué à la Figure 5.2 e), la longueur du tronçon en T est celle donnée ci-dessus pour le premier mode.



Légende :

- a) Mécanisme plastique complet (premier mode de ruine),
- b) Mécanisme plastique partiel avec ruine du boulon d'ancrage (deuxième mode de ruine),
- c) Ruine du boulon d'ancrage (troisième mode de ruine),
- d) Plastification de l'âme tendue (quatrième mode de ruine),
- e) Ruine par plastification en flexion de la semelle conjointement avec la séparation de la plaque d'assise de la fondation du fait de l'allongement du boulon d'ancrage (effort de levier annulé). Ce mode de ruine remplace les premier et deuxième modes de ruine.

Figure 5.2 Modes de ruine possibles pour un tronçon en T équivalent tendu

Le mode de ruine spécial qui remplace les premier et deuxième modes n'est envisageable que lorsque la condition suivante relative à la longueur du boulon d'ancrage est satisfaite :

$$L_b > L_b^* = \frac{8,8 A_s}{l_{\text{eff},1}} \left[\frac{m}{t_p} \right]^3$$

où la distance m est celle illustrée à la Figure 5.2 et la longueur participante du tronçon en T l_{eff} est déterminée ci-dessus.

Résistance du tronçon en T équivalent tendu

Il faut déterminer la résistance du tronçon en T équivalent tendu pour la rangée de boulons d'ancrage. La résistance de calcul d'une rangée de boulons d'ancrage correspondra à la plus petite des valeurs des modes de ruine illustrés par la Figure 5.2. Au moment de considérer les modes de ruine d'un tronçon en T tendu, la résistance de calcul à la traction d'un boulon d'ancrage tendu doit être prise $F_{t, \text{anchor}, \text{Rd}}$.

La résistance à la flexion de la rotule plastique est obtenue par : $M_{\text{pl,Rd}} = l_{\text{eff}} m_{\text{pl,Rd}} = l_{\text{eff}} \frac{t_p^2 f_y}{4 \gamma_{\text{M0}}}$

Cette valeur peut différer entre le premier (avec $l_{\text{eff},1}$) et le deuxième mode (avec $l_{\text{eff},2}$).

La valeur de la résistance d'un tronçon en T tendu $F_{t,Rd}$ est prise comme étant égale à la plus petite des résistances suivantes, le cas échéant :

- Mode 1 : Mécanisme plastique complet : $F_{t,1,Rd} = \frac{4M_{pl,Rd,1}}{m}$
- Mode 2 : Mécanisme plastique partiel : $F_{t,2,Rd} = \frac{2M_{pl,Rd,2} + 2nF_{t,anchor,Rd}}{m+n}$, $n = \min(e; 1,25m)$
- Mode 1-2 : Si la condition nécessitant l'adoption d'un mode spécial est satisfaite, les résistances pour les modes 1 et 2 sont remplacées par
 - : $F_{t,1/2,Rd} = \frac{2M_{pl,Rd,1}}{m}$.
- Mode 3 : Ruine du boulon d'ancrage $F_{t,3,Rd} = 2F_{t,anchor,Rd}$
- Mode 4 : Plastification de l'âme tendue pour les rangées intérieures de boulons d'ancrage : $F_{t,wc,Rd} = b_{eff,t,wc} t_{wc} \frac{f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$

La résistance de toutes les rangées de boulons d'ancrage présentes est calculée. La résistance de calcul pour le côté tendu est prise comme étant égale à :

$$F_{T,Rd} = \sum F_{t,Rd}$$

Le signe de sommation permet de considérer le fait d'avoir soit une, soit deux rangée(s) de boulons d'ancrage de part et d'autre de l'assemblage.

Résistance à la traction axiale de l'assemblage

La résistance à la traction axiale de l'assemblage symétrique est donnée comme suit :

$$N_{T,Rd} = 2 F_{T,Rd}$$

qui n'est valable que lorsque le moment concomitant est nul.

5.5 Résistance à la flexion

Si l'effort axial est nul, le moment résistant de l'assemblage symétrique est donné comme étant la moindre des deux valeurs suivantes :

$$M_{0,Rd} = \min (z F_{T,Rd} ; z F_{C,Rd}), \text{ où le bras de levier } z = z_T + z_C$$

5.6 Cas d'une combinaison de charge donnée

Lorsque la vérification ne consiste qu'à s'assurer que l'assemblage est capable de résister à une combinaison donnée (M_{Ed} , N_{Ed}), les vérifications peuvent se limiter aux étapes suivantes :

- a) La répartition des contraintes dans la section du poteau donnera une indication directe quant au type de répartition des charges qui existe dans l'assemblage avec plaque d'assise. Cette information peut servir à identifier le cas de répartition des charges à examiner au [Tableau 6.7 de l'EN 1993-1-8](#).



- b) L'excentricité participante de l'effort axial est déterminée comme étant $e_N = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$ pour la combinaison appliquée (M_{Ed} , N_{Ed}). Il faut noter que la valeur d'excentricité peut être positive ou négative, en fonction des signes des efforts et des moments.
- c) Les résistances des tronçons en T équivalents sous les rangées de boulons d'ancrage tendues, $F_{T,Rd}$, s'obtiennent en 5.3 ci-dessus. Du fait que l'assemblage est symétrique, les résistances de calcul de part et d'autre en traction seront égales. (Ce calcul n'est pas obligatoire si la section entière est comprimée.)
- d) La résistance du tronçon en T sous la semelle de poteau comprimée, $F_{C,Rd}$, peut s'obtenir à partir de 5.2 ci-dessus, la valeur étant prise uniquement comme celle pour un tronçon en T sous la semelle de poteau. Du fait que l'assemblage est symétrique, les résistances de calcul à la compression de part et d'autre seront égales. (Ce calcul n'est pas obligatoire si la section entière est tendue.)
- e) Les paramètres géométriques, tout particulièrement des divers bras de levier, sont obtenus comme illustré à la Figure 5.1. Du fait de la symétrie de l'assemblage $z_{T,l} = z_{T,r} = z_T$ et $z_{C,l} = z_{C,r} = z_C$.
- f) A partir de la répartition des contraintes dans le poteau, il faut identifier le cas à examiner. Le moment résistant $M_{j,Rd}$, appliqué simultanément à l'effort axial, N_{Ed} , est obtenu par l'application directe des formules pertinentes données au Tableau 5.1 (voir [Tableau 6.7 de l'EN 1993-1-8](#)).
- g) Il faut vérifier que les moments M_{Ed} et M_{Rd} sont du même signe et que $|M_{Ed}| \leq |M_{Rd}|$. Si tel est le cas, l'assemblage est adéquat pour résister à la combinaison de charges donnée.

Les formules données au Tableau 5.1 concernent des assemblages symétriques et ont été adaptées à partir de celles données dans le [Tableau 6.7 de l'EN 1993-1-8](#).

Tableau 5.1 Vérification du moment résistant de calcul M_{Rd} de pieds de poteau encastrés

Charge	Bras de levier z	Moment résistant M_{Rd}	
Côté gauche tendu	$z = z_{T,l} + z_{C,r}$	$N_{Ed} > 0$ et $e > z_{T,l}$	$N_{Ed} \leq 0$ et $e \leq -z_{C,r}$
Côté droit comprimé	$z = z_T + z_C$	La plus petite des deux valeurs suivantes : $\frac{F_{T,Rd}z}{z_C/e + 1}$ et $\frac{-F_{C,Rd}z}{z_T/e + 1}$	
Côté gauche tendu	$z = z_{T,l} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ et $0 < e < z_{T,l}$	$N_{Ed} > 0$ et $-z_{T,r} < e \leq 0$
Côté droit tendu	$z = z_T + z_T$	La plus petite des deux valeurs suivantes : $\frac{F_{T,Rd}z}{z_T/e + 1}$ et $\frac{F_{T,Rd}z}{z_T/e - 1}$	
Côté gauche comprimé	$z = z_{C,l} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ et $e \leq -z_{T,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ et $e > z_{C,l}$
Côté droit tendu	$z = z_C + z_T$	La plus petite des deux valeurs suivantes : $\frac{-F_{C,Rd}z}{z_T/e + 1}$ et $\frac{F_{T,Rd}z}{z_C/e - 1}$	
Côté gauche comprimé	$z = z_{C,l} + z_{C,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ et $0 < e < z_{C,l}$	$N_{Ed} \leq 0$ et $-z_{C,r} < e \leq 0$
Côté droit comprimé	$z = z_C + z_C$	La plus petite des deux valeurs suivantes : $\frac{-F_{C,Rd}z}{z_C/e + 1}$ et $\frac{-F_{C,Rd}z}{z_C/e - 1}$	
$M_{Ed} > 0$ est dans le sens des aiguilles d'une montre, $N_{Ed} > 0$ est un effort de traction, $e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$			
Les formules ci-dessus concernent un assemblage symétrique, de sorte que : $z_{T,l} = z_{T,r} = z_T$ et $z_{C,l} = z_{C,r} = z_C$			
S'il s'avère que $ M_{Ed} \leq M_{Rd} $ l'assemblage est adéquat.			

5.7 Diagramme d'interaction pour un assemblage de pied de poteau

Lorsque la résistance de calcul de l'assemblage est atteinte sous une combinaison de charges (M_{Ed} , N_{Ed}), il en ressort que :

$$M_{Ed} = M_{Rd}$$

$$N_{Ed} = N_{Rd}$$

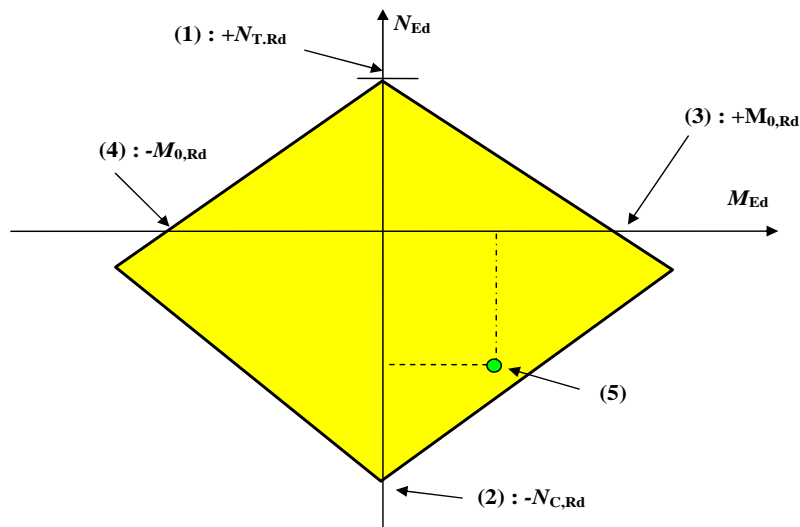
$$e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}}$$

Tous ces paramètres peuvent avoir des valeurs positives et négatives. C'est en modifiant la valeur de l'excentricité équivalente dans les limites de la plage indiquée pour chaque situation de charge (voir la Figure 3.1, le Tableau 5.1 et le Tableau 5.2) que les conditions aux limites

s'avèrent être une frontière relevée avec, par exemple, une charge axiale N_{Rd} sur l'axe vertical et un moment M_{Rd} sur l'axe horizontal (voir la Figure 5.3).

Il s'est avéré que la frontière pour le type d'assemblage avec plaque d'assise abordé ici est composée de segments linéaires qui peuvent être relevés au moyen des relations entre M_{Rd} et N_{Rd} données au Tableau 5.2. Le diagramme illustré à la Figure 5.3 concerne le cas particulier d'un assemblage symétrique doté de deux rangées de boulons de chaque côté, pour lequel il a été supposé que les distances entre l'axe de forte inertie du poteau et le centre de gravité de section du tronçon en T comprimé sous une semelle (z_C) d'une part, et de la section tendue de boulons d'ancrage (z_T) d'autre part sont égales. Si ces distances ne sont pas égales, la surface fermée diffère légèrement de la forme en diamant.

On obtient le type suivant de diagramme d'interaction. Il permet de vérifier rapidement toute combinaison de charge exercée sur l'assemblage avec plaque d'assise. Toutes les combinaisons de charge autorisées tombent sur, ou à l'intérieur de la surface définie par les frontières correspondant aux conditions aux limites concernées.



- | | | |
|-----------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Légende : | 1) Résistance à la traction axiale | 4) Moment résistant négatif |
| | 2) Moment résistant négatif | 5) Combinaison de M et de N permise |
| | 3) Moment résistant positif | |

Figure 5.3 Assemblage de pied de poteau encastré avec plaque d'assise : Diagramme type d'interaction M-N

Tableau 5.2 Interaction des résistances de calcul N_{Rd} et M_{Rd} pour des pieds de poteau encastrés

Charge	Bras de levier z	Moment résistant de calcul M_{Rd} correspondant à N_{Rd}	
Côté gauche tendu Côté droit comprimé Moment positif dominant , avec un effort de traction ou de compression (voir figure 5.1)	$z = z_T + z_C$	$0 \leq N_{Rd}$ et $e > z_T$	$N_{Rd} \leq 0$ et $e \leq -z_C$
		Côté comprimé critique : $M_{Rd} = -N_{C,Rd} \frac{z}{2} + N_{Rd} z_T$ Côté tendu critique : $M_{Rd} = N_{T,Rd} \frac{z}{2} - N_{Rd} z_C$	Côté comprimé critique : $M_{Rd} = -N_{C,Rd} \frac{z}{2} + N_{Rd} z_T$ Côté tendu critique : $M_{Rd} = N_{T,Rd} \frac{z}{2} + N_{Rd} z_C$
Deux côtés tendus Effort axial de traction dominant avec un moment positif ou négatif	$z = 2 z_T$	$N_{Rd} > 0$ et $0 < e < z_T$	$N_{Rd} > 0$ et $-z_T < e \leq 0$
		$M_{Rd} = (N_{T,Rd} - N_{Rd}) \frac{z}{2}$	$M_{Rd} = -(N_{T,Rd} - N_{Rd}) \frac{z}{2}$
Côté gauche comprimé Côté droit tendu Moment négatif dominant avec un effort axial de compression ou de traction	$z = z_C + z_T$	$0 \leq N_{Rd}$ et $e \leq -z_T$	$N_{Rd} \leq 0$ et $e > z_C$
		Côté comprimé critique : $M_{Rd} = N_{C,Rd} \frac{z}{2} - N_{Rd} z_T$ Côté tendu critique : $M_{Rd} = -N_{T,Rd} \frac{z}{2} + N_{Rd} z_C$	Côté comprimé critique : $M_{Rd} = N_{C,Rd} \frac{z}{2} - N_{Rd} z_T$ Côté tendu critique : $M_{Rd} = -N_{T,Rd} \frac{z}{2} + N_{Rd} z_C$
Deux côtés comprimés Compression axiale (négative) dominante , avec un moment positif ou négatif	$z = 2 z_C$	$N_{Rd} \leq 0$ et $0 < e < z_C$	$N_{Rd} \leq 0$ et $-z_C < e \leq 0$
		$M_{Rd} = (N_{C,Rd} - N_{Rd}) \frac{z}{2}$	$M_{Rd} = -(N_{C,Rd} - N_{Rd}) \frac{z}{2}$
<p>$M_{Ed} > 0$ est dans le sens des aiguilles d'une montre, $N_{Ed} > 0$ est un effort de traction, $e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$</p> <p>Les valeurs de $N_{C,Rd}$ et de $N_{T,Rd}$ sont obtenues à partir de 5.3 et 5.4 respectivement.</p> <p>Les formules ci-dessus concernent un assemblage symétrique, de sorte que : $z_{T,l} = z_{T,r} = z_T$ et $z_{C,l} = z_{C,r} = z_C$</p>			

Annexe A : Résistances de calcul des boulons d'ancrage

La norme EN 1992-1-1 pour le béton armé donne les règles de calcul relatives à la résistance à l'adhérence d'ancrage uniquement pour les barres de renforcement non lisses. Aucune mention n'y est faite de boulons d'ancrage ou de barres rondes lisses, ce dont sont constituées la plupart des boulons d'ancrage utilisés de nos jours.

Le présent NCCI suppose que la valeur de calcul pour une barre lisse est la valeur donnée au [§8.4 de l'EN 1992-1-1](#) (c'est-à-dire la valeur de calcul pour une barre non lisse du même diamètre, de béton similaire et dans des conditions similaires) divisée par 2,25. Il se peut que l'Annexe Nationale pertinente donne des conseils sur la conception pour l'adhérence d'ancrage de barres lisses.

Les graphiques ci-dessous relèvent la longueur de base d'adhérence d'ancrage de boulons d'ancrage de classe 4,6 et de classe 5,6 de divers diamètres, par rapport à la résistance à la traction de calcul de classes de béton de fondation types.

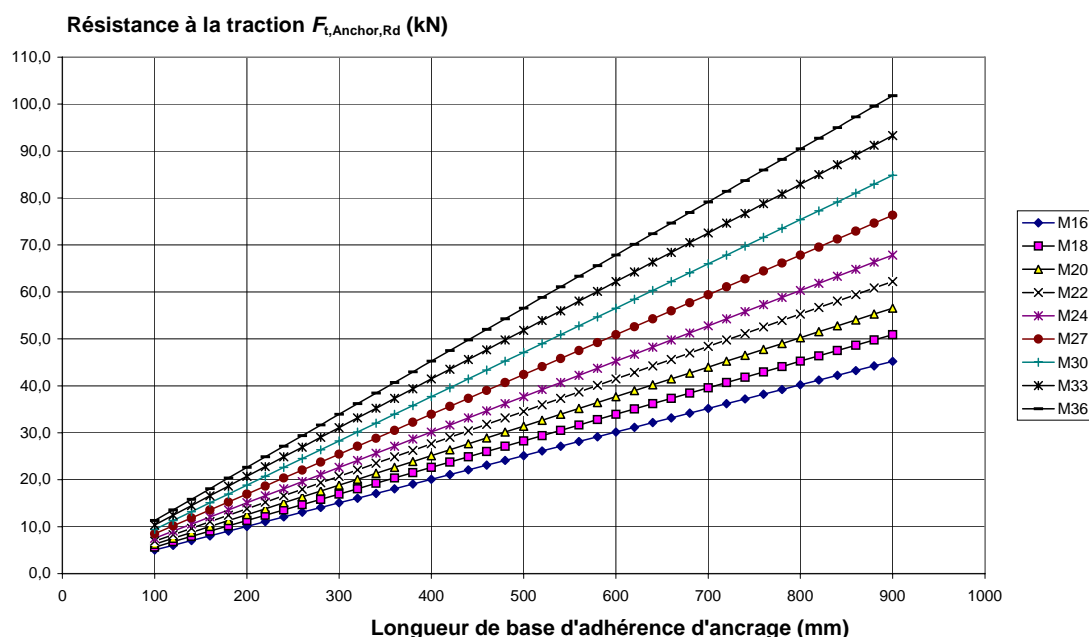


Figure A.1 Résistance à l'adhérence d'ancrage et résistance à la traction de boulons d'ancrage - Acier 4,6 et béton C20/25

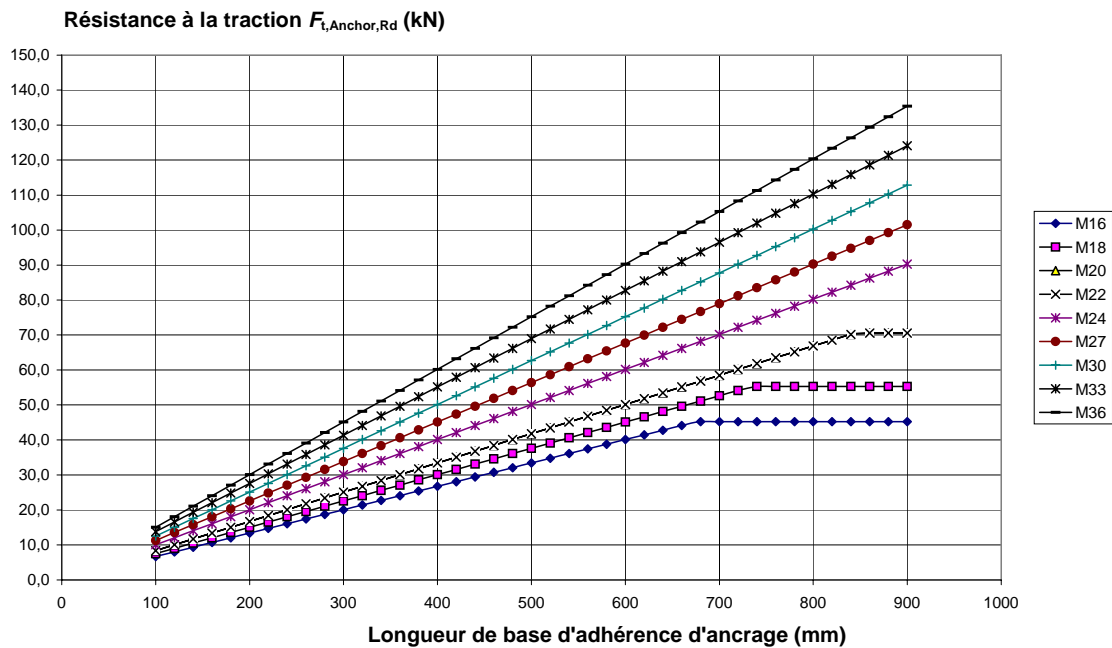


Figure A.2 Résistance à l'adhérence d'ancrage et résistance à la traction de boulons d'ancrage - Acier 4,6 et béton C30/37

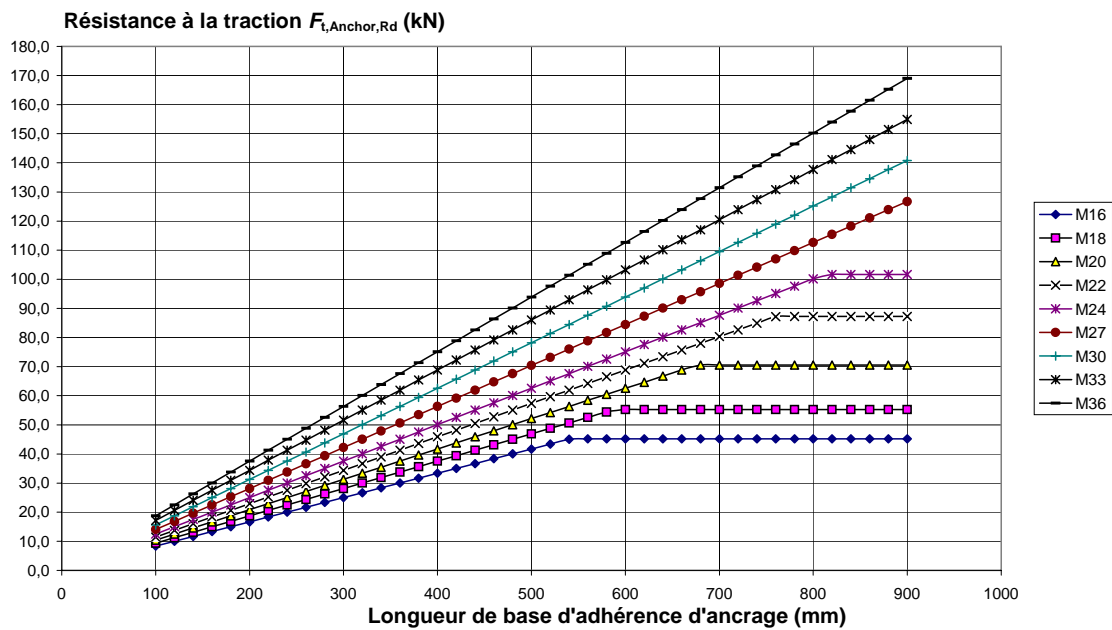


Figure A.3 Résistance à l'adhérence d'ancrage et résistance à la traction de boulons d'ancrage - Acier 4,6 et béton C40/50

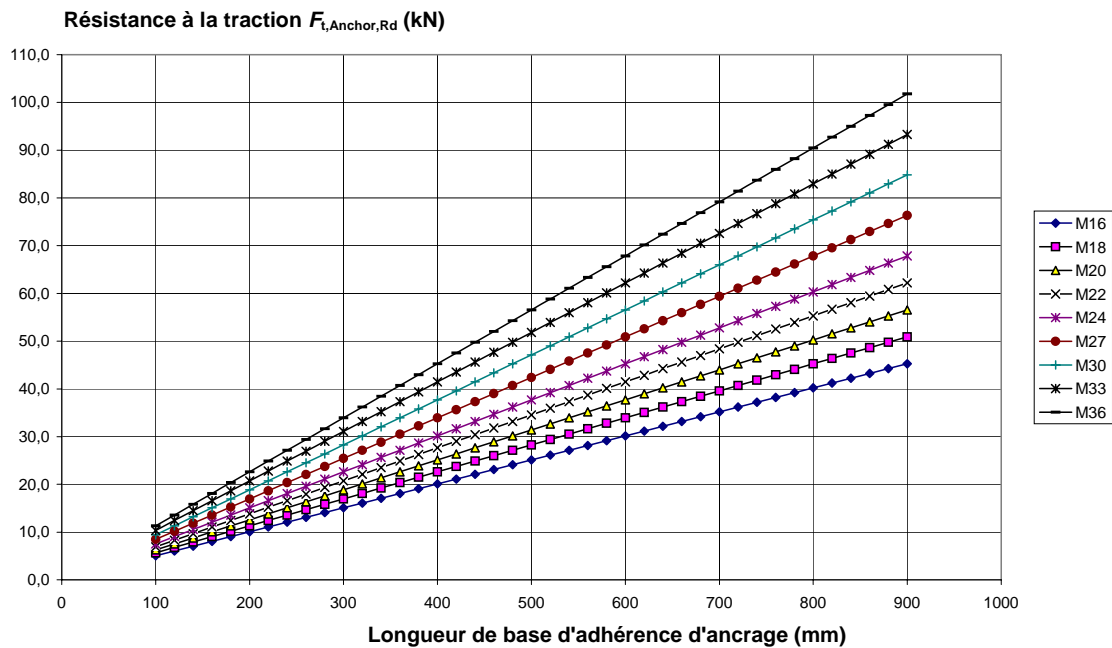


Figure A.4 Résistance à l'adhérence d'ancrage et résistance à la traction de boulons d'ancrage - Acier 5,6 et béton C20/25

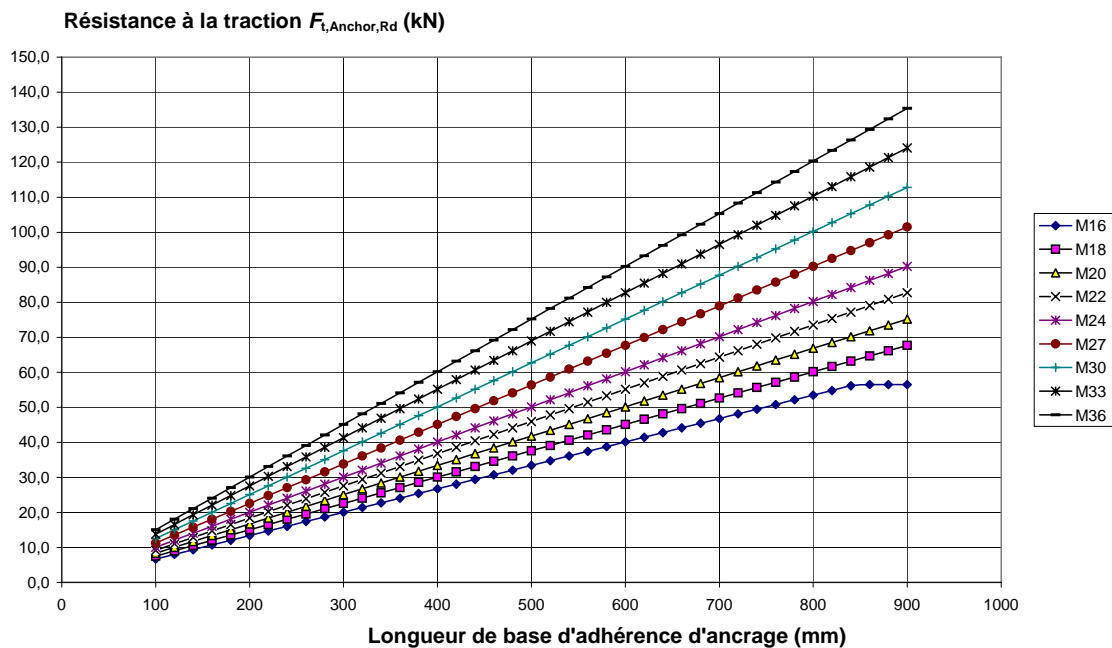


Figure A.5 Résistance à l'adhérence d'ancrage et résistance à la traction de boulons d'ancrage - Acier 5,6 et béton C40/50

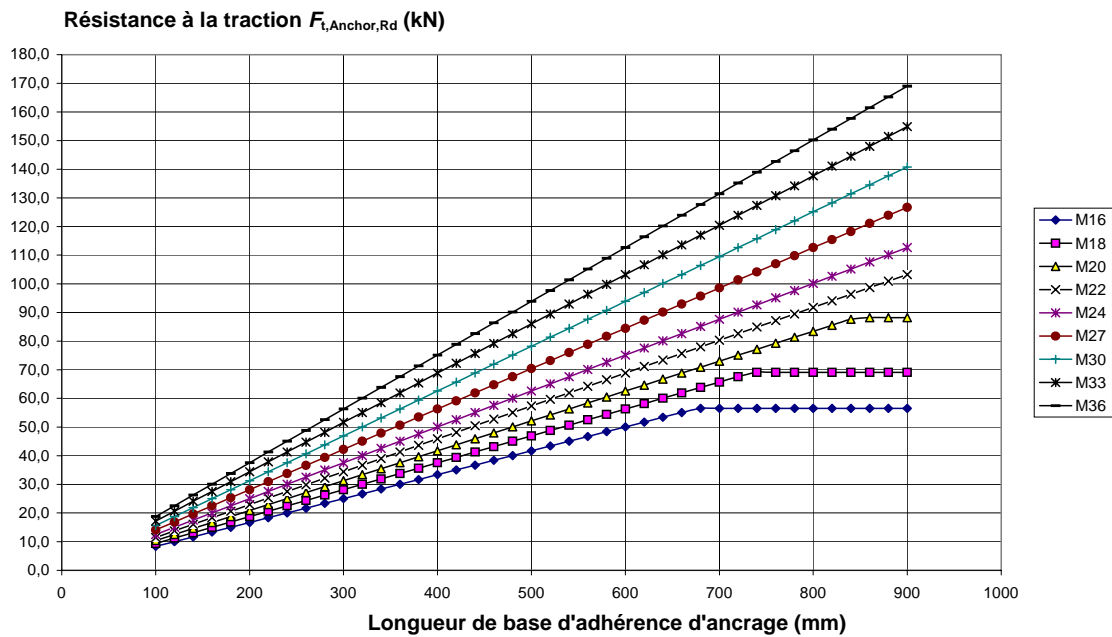


Figure A.6 Résistance à l'adhérence d'ancrage et résistance à la traction de boulons d'ancrage - Acier 5,6 et béton C40/50



Enregistrement de la qualité

TITRE DE LA RESSOURCE	NCCI : Calcul d'assemblages de pieds de poteaux encastrés		
Référence(s)			
DOCUMENT ORIGINAL			
	Nom	Société	Date
Créé par	Ivor Ryan	CTICM	06/02/2006
Contenu technique vérifié par	Alain BUREAU	CTICM	06/02/2006
Contenu rédactionnel vérifié par			
Contenu technique approuvé par les partenaires STEEL :			
1. Royaume-Uni	G W Owens	SCI	07/04/06
2. France	A Bureau	CTICM	07/04/06
3. Suède	B Uppfeldt	SBI	07/04/06
4. Allemagne	C Müller	RWTH	07/04/06
5. Espagne	J Chica	Labein	07/04/06
Ressource approuvée par le Coordonnateur technique	G W Owens	SCI	18/08/06
DOCUMENT TRADUIT			
Traduction réalisée et vérifiée par :		eTeams International Ltd.	18/05/06
Ressource traduite approuvée par :	M. Lukic	CTICM	06/06/06