

# Analyse et dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux

Ing. T. DE PRYCK  
Ir C. HUVELLE  
Ir F. CERFONTAINE  
Ir P. BOEREAVE  
GRAMME - Liège

*Ce travail est un résumé de la littérature existante traitant du calcul des assemblages de pieds de poteaux. Celui-ci propose une synthèse d'un point de vue méthodologique et envisage des pistes de réflexion et des exemples complets représentatifs de cas rencontrés dans le domaine de la construction. Une fois l'analyse et la caractérisation des composantes d'un pied de poteau réalisées, un point essentiel devait être abordé : le modèle mécanique. En effet, le modèle proposé par l'Eurocode 3 ne semblait pas convenir pour des assemblages plus complexes, celui-ci s'avérant trop restrictif. Ainsi, l'objectif de ce travail est d'établir, sur base d'une recherche bibliographique, un modèle mécanique plus complet ainsi qu'une méthode systématique de calcul des diagrammes d'interaction sous des efforts combinés de flexion et de traction/compression.*

*Mots clés : Assemblage – Pied de poteau – Eurocode 3 – Interaction  $M + N$  – Composantes – Analyse – Dimensionnement*

*This Master thesis aims at studying the literature on column bases with the objective of gathering as much data and converging towards a global computing solution. It provides a methodological review and encourages reflexions and gives comprehensive illustrations of case studies. After the analysis and characterization of components of column bases, we question the mechanical model proposed by Eurocode 3, which appears to be too restrictive, in particular when dealing with more complex joints. The aim of this work is to establish, based on a bibliographic search, a more complete mechanical model and a systematic method for calculating the interaction diagrams under combined bending and normal force.*

*Key words: Joint – Column base – Eurocode 3 – Interaction  $M + N$  – Components – Analysis – Sizing*

### *Symboles*

$\alpha_{bf}$	Coefficient qui prend en compte l'accroissement de la résistance à la compression du béton due à la diffusion de l'effort localisé à l'intérieur de la fondation.
$\beta_w$	Coefficient de corrélation obtenu à partir du tableau 4.1 de l'EN 1993-1-8 (Eurocodes 3).
$b_{eff}$	Largeur efficace d'un tronçon en T équivalent comprimé.
$b_{fc}$	Largeur de la section du poteau (largeur de la semelle du poteau en I).
$b_p$	Largeur de la platine d'extrémité.
$c$	Largeur d'appui additionnelle selon l'EN 1993-1-8.
$d_f$	Profondeur de la fondation.
$d$	Diamètre de la tige d'ancrage.
$e_b$	Distance minimale du bord de la platine d'extrémité rectangulaire au bord de la fondation rectangulaire dans le sens de la largeur.
$e^{el}$	Excentricité effective $M/N$ .
$e_h$	Distance minimale du bord de la platine d'extrémité rectangulaire au bord de la fondation rectangulaire dans le sens de la longueur.
$e_m$	Épaisseur du scellement en mortier.
$e_w$	Diamètre de la rondelle ou le sur-angle de la tête du boulon ou de l'écrou selon le cas envisagé.
$f_{bd}$	Résistance à l'adhérence de l'acier avec le béton.
$f_{cd}$	Résistance de calcul du béton de la fondation à la compression.
$f_{jd}$	La résistance en pression localisée du béton.
$f_u$	Résistance ultime en traction minimale des pièces attachées.
$f_{ub}$	Résistance ultime en traction de l'acier des tiges.
$f_y$	De manière générale, limite d'élasticité de l'acier d'un élément.
$h_c$	Hauteur de la section de la colonne.
$h_p$	Longueur de la platine d'assise.
$k_{eff,r}$	Coefficient de rigidité équivalent de la rangée étudiée.
$l_{eff}$	Longueur efficace d'un tronçon en T équivalent tendu ou comprimé.

$l_{eff,cp}$	Longueur efficace du tronçon en T équivalent pour un mode de rupture circulaire.
$l_{eff,nc}$	Longueur efficace du tronçon en T équivalent pour un mode de rupture non circulaire.
$m - m_x$	Distance transversale entre un trou de tige d'ancrage dans la platine d'extrémité et la position de la rotule plastique à côté de l'élément tendu (âme ou semelle du poteau) d'un tronçon en T équivalent tendu (selon Yvor R.).
$n$	Distance transversale entre un trou de tige d'ancrage dans la platine d'extrémité et la position de l'effort de levier sur un tronçon en T équivalent tendu (selon Yvor R.).
$n_b$	Nombre de tiges d'ancrage dans tout l'assemblage.
$t_{fc}$	Épaisseur de la semelle de la colonne.
$t_{fn}$	Épaisseur de la semelle de la bêche.
$t_p$	Épaisseur de la platine d'extrémité.
$t_{wa}$	Épaisseur de la rondelle/plaquette.
$t_{wc}$	Épaisseur de l'âme du poteau.
$A_{eff}$	Aire efficace pour le calcul de la résistance en compression d'un tronçon.
$A_v$	Aire cisailée de l'âme de la bêche.
$E - E_c$	Module de Young de l'acier/béton.
$F_{t,Rd,ancr}$	Résistance en traction d'une tige d'ancrage.
$F_{vb,Rd}$	Résistance de calcul au cisaillement d'une tige d'ancrage.
$F_{v,Rd}$	Résistance au cisaillement.
$L_b$	Longueur d'allongement du boulon d'ancrage.
$L_b^*$	Longueur limite d'allongement du boulon d'ancrage.
$N_{c,Ed}$	Effort de compression appliqué au pied de poteau.
$N_{c,bc,Rd}$	Résistance en compression du tronçon en T.
$N_{t,Ed}$	Effort de traction appliqué au pied de poteau.
$N_{t,pl,Rd}$	Résistance à la traction pure d'une section.
$N_{c,pl,Rd}$	Résistance à la compression pure d'une section.
$S_{j,ini} - K_M^{el}$	Rigidité initiale d'un pied de poteau.

## 1. Introduction

Ce travail est l'aboutissement d'une recherche de documentation sur les assemblages de pieds de poteaux. Nous nous sommes efforcés de recueillir un maximum de données dans le but de les comparer entre elles et d'en tirer des conclusions. L'objectif final était d'obtenir une méthodologie claire et la plus complète possible afin de dimensionner des assemblages de pieds de poteaux. Les notions sont illustrées par des exemples dans l'optique de comprendre l'ensemble des concepts cachés derrière ces critères de dimensionnement. La plupart du temps, les différents documents analysés convergeaient vers les mêmes conclusions. Toutefois, il a fallu nuancer et analyser la validité de certaines hypothèses. Notre ligne de conduite consistait à suivre la norme Eurocode EN 1993-1-8 bien que celle-ci reste floue et incomplète sur certains points de calculs de ce type d'assemblage. Ce domaine restant, à l'heure actuelle, toujours à l'étude, nous n'avons pas été en mesure d'analyser un ensemble de cas complexes détaillés dans le travail intégral.

La première partie de ce travail propose une introduction sur les pieds de poteaux et plus particulièrement sur la mise en œuvre de ceux-ci. En effet, l'objectif était de présenter aux lecteurs les différentes solutions qui existent pour transmettre les efforts de la structure vers la fondation. Dans ce travail, nous proposons un échantillon des solutions exploitées en pratique. Cette introduction permet également d'illustrer une première fois la géométrie et les termes propres aux assemblages de pieds de poteaux et de ne pas se limiter à des aspects purement théoriques. Enfin, nous rappelons toutes les notions essentielles pour comprendre au mieux ce travail.

La seconde étape de ce travail consistait à récolter un maximum de données dans le but d'établir une caractérisation complète de chaque composante en termes de résistance et en termes de rigidité. Nous nous sommes efforcés de comparer la littérature et de veiller à respecter les normes. Cependant, en cas d'absence d'information de la part des Eurocodes, nous proposons des solutions aux lecteurs.

Enfin, une fois la cartographie des composantes réalisée, l'élaboration du modèle mécanique restait primordiale pour déterminer les courbes Moment-Rotation associées à l'assemblage. Les résistances obtenues permettent également de construire des diagrammes d'interaction utiles conduisant à une analyse plus approfondie de l'assemblage. Sur ce plan, nous proposons deux méthodes de dimensionnement plus générales.

Ce résumé ne présente qu'une mince partie du travail et peut paraître incomplet tant les notions à développer sont nombreuses. Nous recommandons fortement de se référer au document original pour plus de précisions.

## 2. Bases théoriques

Dans cette section, quelques éléments théoriques essentiels sont rappelés afin de bien saisir l'ensemble des concepts repris dans ce travail. Celui-ci, constituant avant tout une recherche bibliographique, reprend de nombreux éléments théoriques tous ensemble dans l'optique d'obtenir une vision plus globale sur le sujet traité.

### 2.1. Préliminaires

Pour tout assemblage, une loi Moment-Rotation peut être associée. En effet, cette loi décrit la relation entre le moment fléchissant  $M_{j,sd}$  appliqué et la rotation relative  $\phi_{Ed}$  entre les éléments assemblés. La valeur  $\phi_{Ed}$  correspond à la rotation relative de l'extrémité entre les deux éléments assemblés comme illustré ci-dessous.

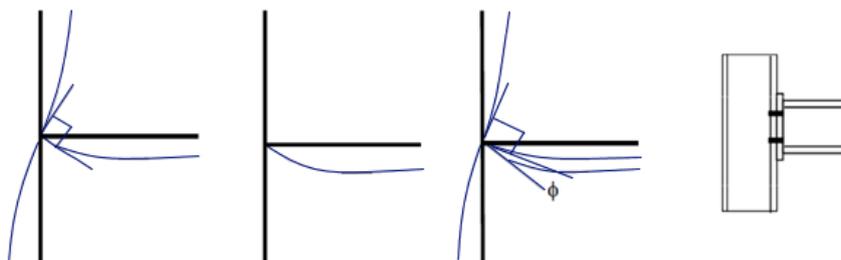


Figure 2-1 : Représentation de la rotation relative

Les courbes  $M - \phi$  correspondent généralement à des modèles non linéaires, comme illustré à la Figure 2-2 avec différents types d'assemblages poutre poteau (Figure 2-2 - a). Cependant, ces lois peuvent être approchées par des modèles linéaires basés sur des analyses globales simplifiées (Figure 2-2 - b).

Chaque assemblage présentera une courbe Moment-Rotation qui lui est propre. Cette courbe permettra de classer un assemblage dans une des catégories explicitées ci-dessous en fonction de l'analyse de la structure réalisée :

- Analyse globale élastique : cette analyse nécessite un classement des assemblages en fonction de leur rigidité en rotation ;
- Analyse globale rigide-plastique : cette analyse nécessite un classement des assemblages en fonction de leur résistance et de leur capacité de rotation ductile ;
- Analyse globale élasto-plastique : cette analyse nécessite un classement des assemblages en fonction de leur rigidité mais également de leur résistance.

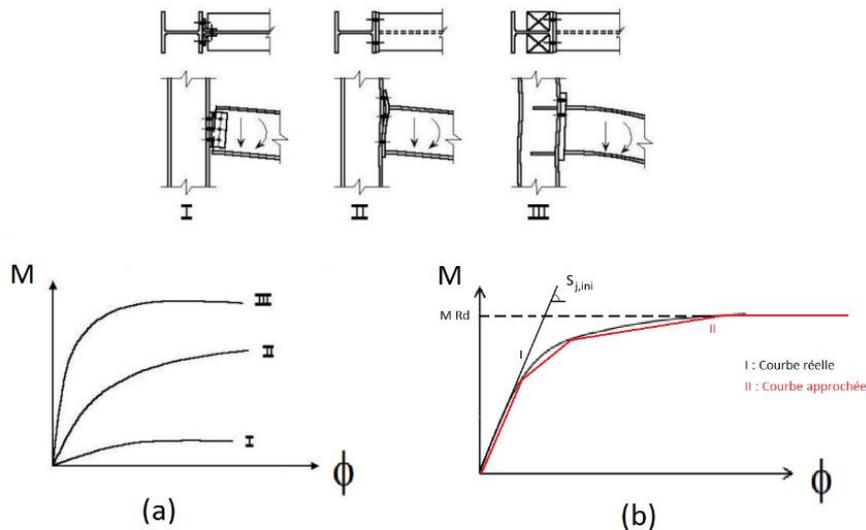


Figure 2-2 : Loi Moment-Rotation

Suite aux différentes analyses possibles, il semble évident que deux types de classification peuvent intervenir pour les assemblages : d'une part en fonction de leur rigidité flexionnelle et d'autre part selon leur capacité à reprendre les efforts qui leur sont appliqués.

## 2.2. Résistance d'un assemblage

La vérification d'un élément est méthodique. Il convient de comparer la valeur de résistance de l'élément à l'effort qui lui est imposé. Nous obtenons ainsi une valeur de résistance  $R_d$  comparée à une valeur « d'effet »  $E_d$ . Ainsi, l'analyse permet d'établir les efforts qui transitent dans l'assemblage ( $M_{Ed}$ ,  $N_{Ed}$  et  $V_{Ed}$ ) tandis que la méthode des composantes permet d'établir les valeurs de résistance ( $M_{Rd}$ ,  $N_{Rd}$  et  $V_{Rd}$ ). Si la résistance de l'élément analysé est supérieure au chargement appliqué, l'élément résiste. A l'inverse, l'assemblage ne résistera pas, devra être renforcé puis calculé de nouveau.

## 2.3. Capacité de rotation d'un assemblage

La capacité de rotation constitue en une mesure de la déformation maximale que peut subir l'assemblage avant que la ruine n'engendre une chute de la résistance flexionnelle. L'Eurocode 3 définit la capacité de rotation comme la rotation maximale que peut subir l'assemblage sans que son moment devienne inférieur au moment résistant de calcul. Généralement, les assemblages à comportement ductile

sont capables de développer des déformations importantes et contribuent à la sécurité de la structure lorsque celle-ci tend à être surchargée.

## 2.4. Moment résistant

Ce passage est inspiré intégralement de la thèse de Frédéric Cerfontaine qui décrit de manière exhaustive cette notion. Le moment résistant de calcul est basé sur l'application du théorème statique.

Trois types de distribution des efforts intérieurs peuvent être identifiés dans les rangées de boulon :

- Une distribution « plastique » ;
- Une distribution « élastique » ;
- Une distribution « élastique-plastique ».

La distribution appropriée dépendra de la capacité de déformation des composantes de l'assemblage. La Figure 2-3 illustre ces distributions.

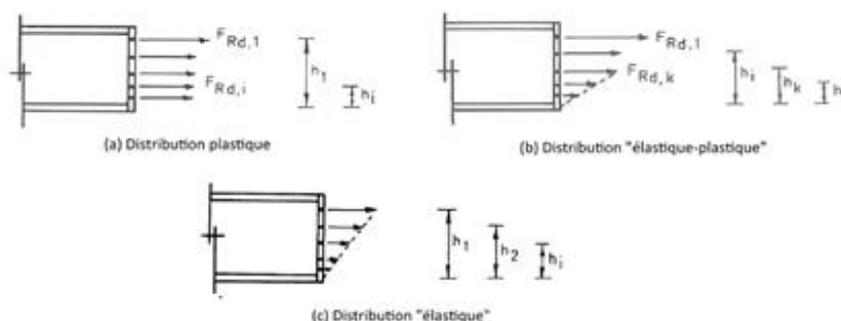


Figure 2-3 : Distribution intérieure des efforts

La Figure 2-3 (a) montre une distribution plastique des efforts intérieurs qui prend place progressivement de la rangée de boulons supérieure jusqu'aux rangées inférieures grâce aux capacités de déformation suffisantes des composantes considérées. Le moment résistant est alors considéré comme la somme des produits des efforts dans les rangées de boulons par leur bras de levier.

Dans d'autres configurations (Figure 2-3 (b)), la redistribution plastique des efforts est interrompue à cause du manque de capacité de déformation de la dernière rangée de boulons qui a atteint sa résistance de calcul et est conditionnée par la rupture des boulons ou de la platine. Dans les rangées de boulons situées sous cette rangée, les efforts sont distribués linéairement (à condition que leur résistance propre ne soit pas dépassée) suivant leur distance au centre de compression.

Enfin, la distribution élastique représentée à la Figure 2-3 (c) constitue un cas particulier de la distribution élasto-plastique où la première rangée atteint sa résistance et présente un comportement non ductile.

## 2.5. Rigidité d'un assemblage

Lors de l'analyse de la structure, il convient d'accorder une attention toute particulière à la rigidité de l'assemblage. En effet, la rigidité d'un assemblage conditionne les flèches et les déplacements relatifs de la structure dans lequel il se trouve ainsi que la reprise des efforts dans leur globalité.

L'Eurocode 3 définit la rigidité en rotation  $S_j$  comme « le moment nécessaire pour produire une rotation unitaire dans un assemblage ». « La raideur attire l'effort ». Ainsi, un assemblage à faible rigidité flexionnelle n'est pas en mesure de reprendre un moment de flexion important et sera considéré comme un assemblage dit « rotulé ».

## 2.6. La méthode des composantes

La méthode des composantes est une méthode de calcul applicable aux assemblages. Les grands principes de cette méthode sont détaillés dans l'Eurocode 3 et s'appliquent à tous les assemblages possibles. Le concept est basé sur une décomposition de l'élément étudié, l'assemblage, en un ensemble de « composantes » dans le même ordre d'idée qu'une analyse par éléments finis. Une fois chaque composante étudiée, il suffit de les regrouper pour déterminer le comportement de l'assemblage.

Trois types d'efforts dans les composantes sont identifiables : une partie en traction, une autre en compression et la dernière soumise au cisaillement. Chaque composante correspond à un mode de ruine possible de l'assemblage.

### *Methodologie*

L'Eurocode 3 définit une composante d'un assemblage comme étant « une partie d'un assemblage qui apporte une contribution identifiée à une ou plusieurs de ses propriétés structurales ».

L'application de la méthode des composantes revient à suivre trois étapes bien distinctes :

- Identifier les composantes activées dans l'assemblage ;
- Caractériser en termes de résistance et/ou de rigidité les composantes activées ;
- Assembler les composantes avec comme objectif final de déterminer la rigidité et la résistance de l'assemblage global.

La première étape d'identification est la plus importante. En effet, il s'agit d'identifier les zones de compression, de traction et de cisaillement dans

l'assemblage mais également d'envisager les modes de ruine qui peuvent se produire.

La seconde étape revient à connaître la manière dont se comporte chaque composante ainsi que la procédure pour caractériser la composante. Ce travail a pour objectif d'énumérer les composantes susceptibles d'apparaître dans un assemblage de pied de poteau et de déterminer la résistance et la rigidité de chacune d'entre elles. La dernière étape consiste à assembler les composantes pour obtenir la résistance et la rigidité de l'assemblage final. En pratique, cette étape revient à assembler les résistances de toutes les composantes activées pour obtenir le  $M_{Rd}$  et à assembler les rigidités associées en vue d'obtenir le  $S_{j,ini}$ .

Ainsi, nous obtenons un ressort équivalent qui caractérise l'assemblage analysé. L'illustration de cette dernière étape est nécessaire pour bien expliciter l'assemblage de ces composantes.

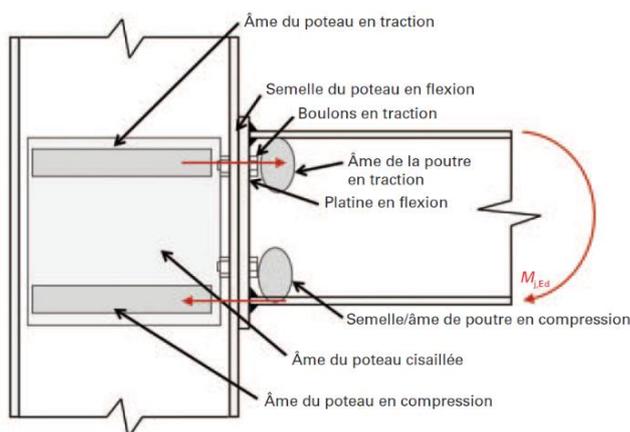


Figure 2-4 : Assemblage des composantes

La figure 2-4 montre la décomposition d'un assemblage par la méthode des composantes. Ainsi, sous un moment de flexion, il convient d'identifier les composantes « activées » et qui sont susceptibles de provoquer la ruine de l'assemblage. Une fois les composantes identifiées, la seconde étape consiste à caractériser chaque composante en termes de résistance et en termes de rigidité.

Cette étape revient à assimiler chaque composante à un ressort du modèle mécanique global de l'assemblage. Ce ressort est caractérisé par la rigidité et la résistance de la composante. Les Figure 2-5 et Figure 2-6 représentent donc chaque composante activée, sous la forme d'un ressort.

Ainsi, la Figure 2-5 illustre les composantes activées dans le cas d'un assemblage avec platine d'extrémité boulonnée. En (a), la rangée de ressorts supérieurs mis en série représente chaque composante activée par un ressort équivalent caractérisé par une rigidité et une résistance. Dans notre cas, il s'agit des déformations de la platine d'extrémité en flexion, des boulons en traction, de la semelle du poteau en flexion et de l'âme du poteau en traction.

Dès l'instant où chaque ressort est déterminé, nous pouvons simplifier le modèle et combiner ces composantes pour former un ressort effectif pour la rangée de boulons analysée  $k_{eff,r}$  représentée en (b).

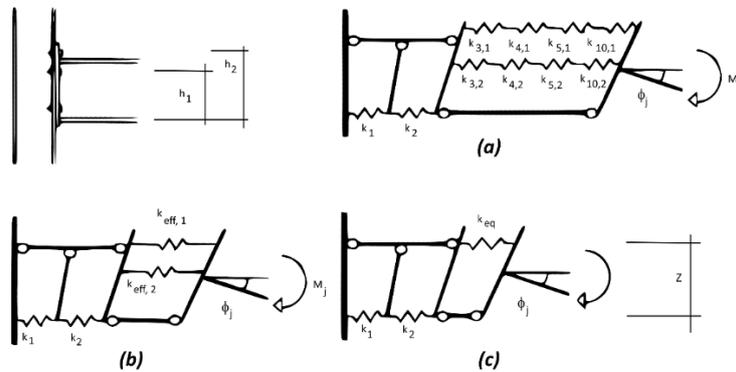


Figure 2-5 : Modélisation des composantes

L'expression du coefficient de rigidité équivalent de la rangée  $k_{eff,r}$  se calcule au moyen de l'équation suivante ( $r$  étant le numéro de la rangée de boulons étudiée) :

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}$$

Pour faire une analogie électrique, nous pouvons dire que le ressort équivalent  $k_{eff,r}$  de  $n$  composantes en série est équivalent à la mise en série de  $n$  condensateurs.

Nous devons également définir la notion de bras de levier équivalent  $z_{eq}$  qui est définie par l'équation suivante et illustrée à la Figure 2-5 (c). Ce bras de levier représente la distance entre le centre de compression et le centre de traction.

$$z = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r}$$

Après avoir défini les ressorts  $k_{eff,r}$ , la Figure 2-5 (c) illustre comment ces ressorts effectifs sont remplacés par un ressort équivalent unique  $k_{eq}$ . Pour reprendre une analogie électrique, des ressorts en parallèle  $k_{eff}$  sont assemblés comme des

résistances en série au prorata de leur bras de levier respectif. L'équation suivante définit ce bras de levier :

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z}$$

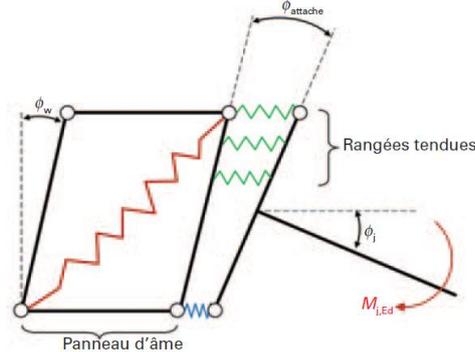


Figure 2-6 : Assemblage des composantes - les ressorts

Une fois que nous avons déterminé toutes ces caractéristiques, la rigidité initiale se détermine facilement en sachant que la rotation  $\phi$  est égale à  $(\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_{eq})/z$  pour le cas illustré. Ainsi, l'équation de la rigidité initiale  $S_{j,ini}$  vaut :

$$S_{j,ini} = \frac{M_{j,Sd}}{\phi_j} = \frac{F z}{\frac{\sum \Delta_i}{z}} = \frac{F z^2}{E \sum \frac{1}{k_i}} = \frac{E z^2}{\sum \frac{1}{k_i}}$$

### 3. Analyse

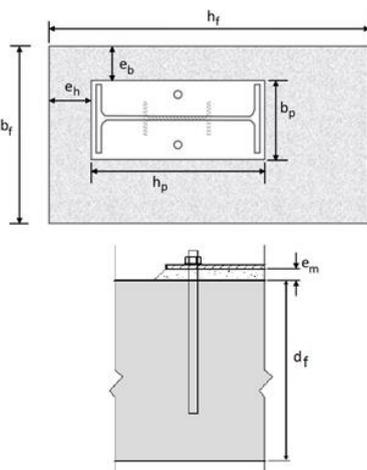
Cette section reprend l'ensemble de l'analyse effectuée dans le cadre de travail. La première étape consistait à caractériser les composantes actives au sein d'un assemblage de pied de poteau. L'analyse consistait à caractériser chaque composante en termes de résistance et en termes de rigidité.

La seconde étape menait à la réalisation d'un modèle mécanique en vue d'établir la courbe Moment-Rotation et le diagramme d'interaction lié à un assemblage déterminé. Ce document reprend une synthèse des résultats des recherches et explique de manière succincte le modèle mécanique.

#### 3.1. Composantes d'un assemblage de pied de poteau

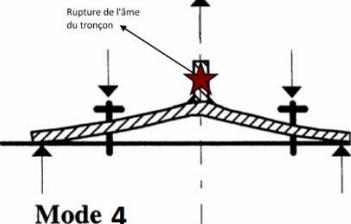
Voici une liste des composantes envisageables dans le cas de l'étude d'un assemblage de pied de poteau. Ces composantes sont systématiquement caractérisées en termes de résistances et de rigidité. Vu l'ampleur du travail de recherche, vous ne

trouvez dans ce tableau que les formules permettant de caractériser chaque composante. Chaque composante est analysée en profondeur dans le travail intégral.

Mode de ruine	Vérification
<p>Résistance du béton et de la platine en compression <math>N_{c,bc,Rd}</math></p> 	$N_{c,bc,Rd} = f_{jd} A_{eff}$ <p>Avec respectivement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>f_{jd} = \beta_j \alpha_{bf} f_{cd}</math> ;</li> <li>- <math>f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c}</math> ; - <math>\beta_j = 2/3</math> et <math>\alpha_{cc} = 1</math> ;</li> <li>- <math>\alpha_{bf} = \min \left[ 1 + \frac{d_f}{\max(h_p, b_p)} ; 1 + \frac{2e_h}{h_p} ; 1 + \frac{2e_b}{b_p} ; 3 \right]</math> ; - <math>e_b = b_f - b_{fc} - 2t_{fc}</math> ; - <math>e_h = (h_f - h_c - 2t_{fc})/2</math> ;</li> <li>- <math>c = t_p \sqrt{\frac{f_{y,p}}{3 f_{jd} \gamma_{M0}}}</math> ;</li> <li>- <math>A_{eff} = l_{eff} b_{eff}</math> ;</li> </ul> <p>Avec <math>l_{eff}</math> et <math>b_{eff}</math> qui sont définis dans le travail dans le cas d'un tronçon en T d'âme ou de semelle.</p>
<p>Mode 1 Plastification de la platine sans effet de levier <math>F_{T,1-2,Rd}</math></p>	$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$ <p>Note : <math>m</math> ou <math>m_x</math> en fonction de l'orientation du tronçon en T comme détaillé à la figure ci-contre.</p> <p>Avec :</p> $M_{pl,1,Rd} = \frac{l_{eff,1} t_p^2 f_{y,p}}{4 \gamma_{M0}}$

	<p><math>t_p</math> étant l'épaisseur de la platine et <math>l_{eff,1}</math> étant la longueur efficace liée au mode de rupture comme décrite dans le travail.</p> <p>Présence d'un effet de levier si :</p> $L_b \leq L_b^*$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>L_b = 8d + e_m + t_p + t_{wa} + 0,4d</math> ;</li> <li>- <math>L_b^* = \frac{4,4 m_x^3 \sum A_s}{l_{eff,1} t_p^3}</math> pour une rangée extérieure ;</li> <li>- <math>L_b^* = \frac{4,4 m^3 \sum A_s}{l_{eff,1} t_p^3}</math> pour une rangée intérieure.</li> </ul> <p>Avec <math>m</math> et <math>m_x</math> définis dans le travail</p>
<p style="text-align: center;"><b>Mode 1</b> Plastification totale de la platine avec effet de levier</p> <p style="text-align: center;"><math>F_{T,1,Rd}</math></p> <p style="text-align: center;"><b>Mode 1</b></p>	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m_x}$ <p>Avec <math>M_{pl,1,Rd} = \frac{l_{eff,1} t_p^2 f_{y,p}}{4\gamma_{M0}}</math></p> <p>Seconde méthode :</p> $F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w) 0,25 l_{eff,1} t_p^2 f_{y,p}}{\gamma_{M0} (2mn - e_w (m + n))}$ <p>Avec :</p> $n = \min(e; 1,25 m) = \min(e_x; 1,25 m_x)$ $e_w = d_w / 4$ <p>Remarque : Ces équations sont valables pour un tronçon en T avec une rangée de 2 à 4 boulons.</p>
<p style="text-align: center;">Ruine des tiges et plastification partielle de la platine avec effet de levier</p> <p style="text-align: center;"><math>F_{T,2,Rd}</math></p>	<p>Pour un tronçon constitué d'une rangée de 2 à 4 boulons extérieurs ou un tronçon d'une rangée de 2 boulons intérieurs :</p> $F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd,ancr,i}}{m_x + n}$ <p>Avec</p>

<p><b>Mode 2</b></p>	$M_{pl,2,Rd} = \frac{l_{eff,2} t_p^2 f_{y,p}}{4 \gamma_{M0}}$ <p><math>l_{eff,2}</math> étant la longueur efficace liée au mode de rupture et définie dans le travail.</p> <p>Pour un tronçon de 4 boulons intérieurs :</p> $F_{T,2,Rd} = \min(F_{T,2,Rd,p}; F_{T,2,Rd,np})$ $F_{T,2,Rd,p} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + \frac{\sum F_{t,Rd,ancr,i}}{2} \left( \frac{n_1^2 + 2n_2^2 + 2n_1n_2}{n_1 + n_2} \right)}{(m + n_1 + n_2)}$ $F_{T,2,Rd,np} = \frac{2M_{pl,1,Rd} + \frac{\sum F_{t,Rd,ancr,i}}{2} n_1}{(m + n_1)}$ <p>Avec :</p> $n = e_1 + e_2 \text{ et } n_1 = e_1 \text{ et } n_2 = e_2 ;$ $n \leq 1,25 m \text{ et } n_2 \leq 1,25m + n_1.$
<p>Résistance des tiges d'ancrage</p> $F_{T,3,Rd}$ <p><b>Mode 3</b></p>	$F_{T,3,Rd} = \sum_i F_{t,Rd,ancr,i}$ <p>Pour un tronçon à 4 boulons intérieurs, la résistance est réduite :</p> $F_{T,3,Rd} = 0,9 \sum_i F_{t,Rd,ancr,i}$ <p>Avec <math>F_{t,Rd,ancr,i}</math> qui représente la résistance individuelle d'une tige d'ancrage dépendant de :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Type d'ancrage (droite, coude, plaquette...)</li> <li>- Diamètre de la tige</li> <li>- ...</li> </ul> <p>Les résistances sont données dans le travail.</p>

<p>Plastification de l'âme du tronçon en T <math>F_{t,fc,Rd}</math> ou <math>F_{t,wc,Rd}</math></p>  <p>Mode 4</p>	<p>Dans le cas d'un tronçon en T avec une semelle (rangée de boulons extérieure) :</p> $F_{t,fc,Rd} = \frac{b_{eff,t} t_{fc} f_{y,fc}}{\gamma_{M0}}$ <p>Avec :</p> <p><math>t_{fc}</math> qui est l'épaisseur de la semelle de la colonne ;  <math>b_{eff,t} = \min(l_{eff,1}; l_{eff,2})</math> qui représente une longueur efficace fonction du tronçon en T.</p> <p>Dans le cas d'un tronçon en T d'âme (rangée de boulons intérieure) :</p> $F_{t,wc,Rd} = \frac{b_{eff,t} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$
<p>Résistance des soudures <math>F_{t,w,Rd}</math></p>	<p>Pour de la traction pure :</p> $F_{t,w,Rd} = 2 l_{eff,1} a_{wc} \frac{f_u}{\sqrt{3} \gamma_{M2} \beta_w} \leq \sum l_{wi} a_i \frac{f_u}{\sqrt{3} \gamma_{M2} \beta_w}$ <p>Avec</p> $2 l_{eff,1} \leq l_{w,wb} = \sum l_{wi} a_i$ <p><math>\beta_w</math> est défini dans le Tableau 4.1 de l'EN 1993-1-8</p> <p>Pour une vérification plus générale indépendante de l'effort :</p> $\min\left(\frac{a}{t}\right) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ \frac{f_y}{f_u} \frac{\beta_w \gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \right]$ <p>Avec :</p> <p><math>t</math> étant l'épaisseur de la plaque liée au cordon ;  <math>a</math> étant la dimension de la gorge du cordon de soudure.</p>

	<p>Méthode simplifiée de l'Eurocode :</p> $F_{w,Rd} = f_{vw,d} \times a$ <p>Avec <math>f_{vw,d} = \frac{f_u/\sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}</math></p>
<p>Résistance au frottement <math>F_{f,Rd}</math></p>	<p>Sous un effort de compression, résistance pouvant être mobilisée contre le cisaillement :</p> $F_{f,Rd} = C_{f,d} N_{c,Ed}$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>C_{f,d}</math> est le coefficient de frottement dont la valeur est de 0,2 ;</li> <li>- <math>N_{c,Ed}</math> est l'effort de compression à l'ELU appliqué sur le pied de poteau.</li> </ul>
<p>Résistance d'une tige cisailée <math>F_{v,Rd}</math></p>	$F_{v,Rd} = \min(F_{vb,Rd}; F_{p,cd})$ <p>La première résistance est donnée par :</p> $F_{vb,Rd} = \beta_{anc} \frac{\alpha_{bc} f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>Et :</p> $\alpha_{bc} = 0,44 - 0,0003 f_{yb}$ $\beta_{anc} = 0,85$ <p>Avec les conditions suivantes à respecter :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>235 \text{ N/mm}^2 \leq f_{y,b} \leq 640 \text{ N/mm}^2</math> ;</li> <li>- <math>400 \text{ N/mm}^2 \leq f_{u,b} \leq 800 \text{ N/mm}^2</math>.</li> </ul> <p>La seconde résistance est donnée par :</p> $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$

	<p>Lorsque le plan de cisaillement passe par la partie filetée du boulon (<math>A_s</math> est l'aire de la section résistante en traction du boulon) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\alpha_v = 0,6</math> pour les classes 4.6, 5.6 et 8.8 en nuance d'acier S235/S275/S355 ;</li> <li>- <math>\alpha_v = 0,5</math> pour les autres classes (4.8, 5.8, 6.8 et 10.9).</li> </ul> <p>Lorsque le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du boulon :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>\alpha_v = 0,6</math>.</li> </ul>
Rigidité de la partie tendue $K_T$	<p>Il convient de déterminer les coefficients de rigidité suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>k_{15}</math> qui représente la rigidité associée à la flexibilité de la platine ;</li> <li>- <math>k_{16}</math> qui est la rigidité associée aux tiges d'ancrage.</li> </ul> <p>Ainsi, la rigidité est donnée par :</p> $K_T = \frac{1}{\frac{1}{k_{15}} + \frac{1}{k_{16}}}$
Rigidité de la platine $k_{15}$	<p>Le coefficient <math>k_{15}</math> se détermine par les équations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si l'effet de levier est présent :</li> </ul> $k_{15} = \frac{0,85 l_{eff} t_p^3}{m_x^3}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si l'effet de levier n'est pas présent :</li> </ul> $k_{15} = \frac{0,425 l_{eff} t_p^3}{m_x^3}$
Rigidité des tiges d'ancrage $k_{16}$	<p>Le coefficient se détermine par les équations suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si l'effet de levier est présent :</li> </ul>

	$k_{16} = 0,8 \frac{\sum A_s}{L_b}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>- Si l'effet de levier n'est pas présent :</li> </ul> $k_{16} = \frac{\sum A_s}{L_b}$
Rigidité de la partie comprimée $K_c$	<p>Le coefficient de rigidité de la partie comprimée se détermine de la manière suivante :</p> $K_c = k_{13} = \frac{E_c \sqrt{l_{eff} b_{eff}}}{1,275 E}$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <math>E_c</math> représente le module de Young du béton défini dans le travail</li> <li>- <math>l_{eff}</math> et <math>b_{eff}</math> représentent la surface de béton comprimé ;</li> <li>- <math>E</math> est le module de Young de l'acier.</li> </ul>

### 3.2. Modèle mécanique d'un assemblage de pied de poteau

#### *Introduction*

La thèse de Frédéric Cerfontaine établit un ensemble d'équations générales qui permettent de calculer la rigidité flexionnelle et extensionnelle d'un assemblage quelconque. Cette thèse n'a jamais été exploitée dans le cadre des assemblages de pieds de poteaux et nous avons pu montrer dans ce travail la validité des équations générales de Cerfontaine vis-à-vis de l'Eurocode. Nous allons reprendre dans la suite de ce travail l'ensemble des équations établissant les rigidités en fonction des efforts, qu'il s'agisse d'un moment de flexion, d'un effort normal de compression/traction ou bien d'une combinaison des deux.

#### *Rigidité sous M+N*

L'excentricité se détermine au moyen de l'équation suivante et son sens physique est illustré à la Figure 3-1. L'excentricité n'est autre que la distance nécessaire entre l'axe neutre et un effort normal pour créer un effort équivalent de flexion.

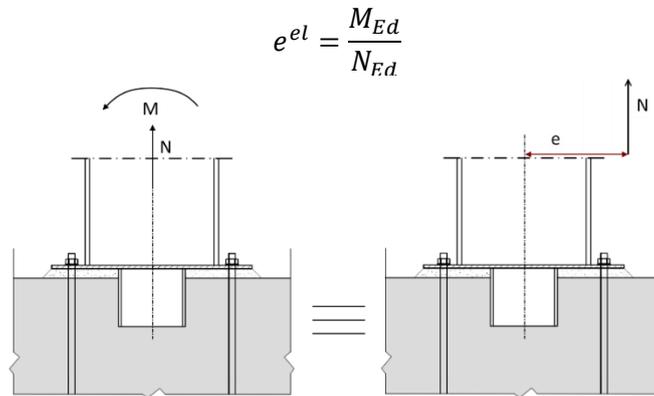


Figure 3-1 : Sens physique de l'excentricité

L'équation ci-dessous représente le paramètre  $h_0^{el}$ . Celui-ci permet de connaître directement les rangées chargées (tendues) et donc de pouvoir déterminer le coefficient de rigidité à appliquer pour une rangée de boulons donnée. Ce paramètre  $h_0^{el}$  représente l'« axe neutre » et caractérise plus couramment « le point de déplacement nul en régime élastique ». Il est valable uniquement dans le domaine élastique et ne peut être employé que pour le calcul de la rigidité initiale.

$$h_0^{el} = \frac{\sum K_{i,ini} h_i (h_i - e^{el})}{\sum K_{i,ini} (h_i - e^{el})}$$

La Figure 3-2 permet d'illustrer le déplacement de  $h_0^{el}$  en fonction de la valeur de l'excentricité  $e^{el}$ , tous les autres paramètres restant constants. Ceci suppose un effort de traction constant et un moment de flexion qui augmente entre (a) et (b), et par conséquent l'excentricité augmente également. Ainsi, lorsque l'excentricité augmente, l'axe neutre  $h_0^{el}$  se déplace et induit un modèle mécanique différent : la seconde rangée de boulons est maintenant tendue (en rouge) dans cet exemple.

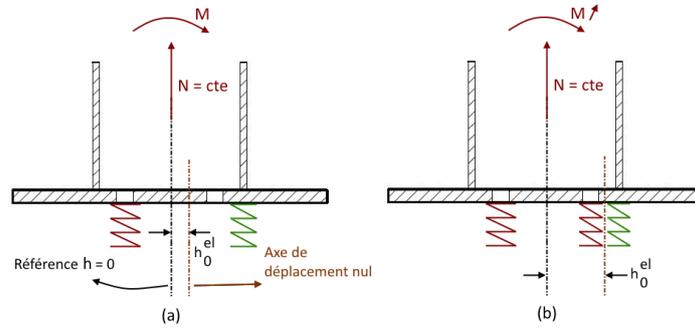


Figure 3-2 : Déplacement du  $h_0^{el}$  en fonction de l'effort appliqué

Il convient également de définir les paramètres  $h_i$  et  $K_{i,ini}$ . La valeur  $h_i$  représente le bras de levier entre la référence ( $h = 0$ ) et le point d'application du ressort. Le second paramètre  $K_{i,ini}$  représente la rigidité du ressort équivalent de la rangée étudiée dans l'assemblage. Il peut s'agir soit d'un élément tendu  $K_t$  soit d'un élément comprimé  $K_c$ . Dans la Figure 3-2, sur l'illustration de droite, les deux boulons en traction seront liés à un coefficient de rigidité  $K_t$  tandis que le ressort en compression (en vert à droite) sera lié à un coefficient  $K_c$ .

### Détermination de $h_0^{el}$

En pratique, la valeur de  $h_0^{el}$  est inconnue lorsque la rigidité de l'assemblage doit être déterminée. Les seules données en notre possession sont les efforts appliqués sur le pied de poteau et par conséquent l'excentricité  $e^{el}$ . Il convient alors de réaliser une hypothèse sur  $h_0^{el}$  et de procéder par itération.

La rigidité extensionnelle  $K_N^{el}$  représente le déplacement vertical de l'assemblage dû à un effort de traction/compression. La rigidité flexionnelle  $K_M^{el}$  correspond, quant à elle, à la rotation de l'assemblage due à un moment de flexion.

$$K_N^{el} = \frac{\sum K_{i,ini} \sum K_{i,ini} h_i^2 - (\sum K_{i,ini} h_i)^2}{\sum K_{i,ini} h_i (h_i - e^{el})}$$

$$K_M^{el} = S_{j,ini} = \frac{e^{el} (\sum K_{i,ini} \sum K_{i,ini} h_i^2 - (\sum K_{i,ini} h_i)^2)}{\sum K_{i,ini} (e^{el} - h_i)}$$

Sur base de ces premières équations, nous pouvons établir la relation remarquable entre  $K_M^{el}$  et  $K_N^{el}$  :

$$K_M^{el} = S_{j,ini} = -e^{el} h_0^{el} K_N^{el}$$

### Modèle mécanique général

Fort des analyses précédentes, un modèle mécanique plus général peut être proposé. La configuration ordinaire d'un pied de poteau est répétitive. Il est constitué de deux rangées capables de reprendre un effort de compression (les semelles du profilé) et de  $n$  rangées de boulons en mesure de subir un effort de traction. Ainsi, le modèle mécanique peut être assimilé à la Figure 3-3 suivante. Ce modèle général permet de calculer la rigidité d'un pied de poteau quelconque pour autant qu'on soit en possession des coefficients de rigidité associés à chaque rangée de l'assemblage. La méthode permet de résoudre les cas proposés par l'Eurocode ainsi que des cas plus complexes qui peuvent se présenter.

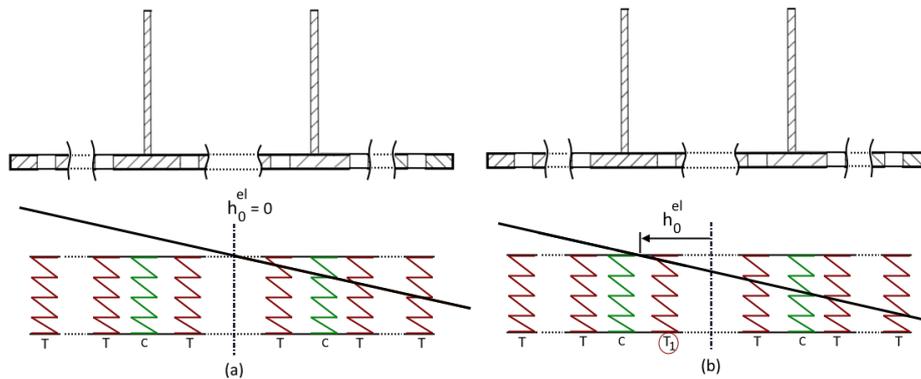


Figure 3-3 : Modèle mécanique général d'un pied de poteau

En fonction de la position de l'axe neutre  $h_0^{el}$ , les rangées chargées sont déterminées et le modèle mécanique établi. En (a), les rangées à gauche de l'axe neutre sont chargées en traction. Par conséquent, la rangée en compression (c, en vert) est inactive vu que la semelle du profilé ne peut pas reprendre de traction. À droite de l'axe neutre, les rangées sont en compression et donc seul la semelle du profilé est active vu que les boulons ne peuvent pas reprendre de compression. En (b), le déplacement de l'axe neutre dû à un changement hypothétique de l'effort entraîne la désactivation de la rangée de boulons  $T_1$  qui est désormais en compression et qui ne peut donc reprendre aucun effort de compression.

En résumé, le modèle mécanique d'une configuration donnée quelconque peut être établi sur base de cette figure.

### 3.3. Diagramme d'interaction

Le diagramme d'interaction moment de flexion-effort normal d'un assemblage de pied de poteau définit une « surface » à l'intérieur de laquelle tous les couples  $M -$

$N$  constituent des efforts acceptables par l'assemblage. Dans le cas où les efforts  $M - N$  appliqués se trouvent en dehors de la surface, le pied de poteau ne résistera pas. Enfin, le périmètre du diagramme d'interaction constitue une caractéristique de la ruine de l'attache. Toute combinaison de moment et d'effort normal se trouvant sur le périmètre représente une combinaison  $M + N$  conduisant l'assemblage à la ruine.

La thèse de Cerfontaine définit de nombreux éléments qui permettent d'introduire un procédé général de construction du diagramme d'interaction. La construction du diagramme selon cette méthode permet également de prendre en compte les effets de groupe. Cette thèse a été démontrée au moyen d'essais expérimentaux et de nombreux concepts sont introduits dans cette thèse. Le lecteur peut consulter cet ouvrage pour comprendre le moindre détail des éléments introduits dans la suite.

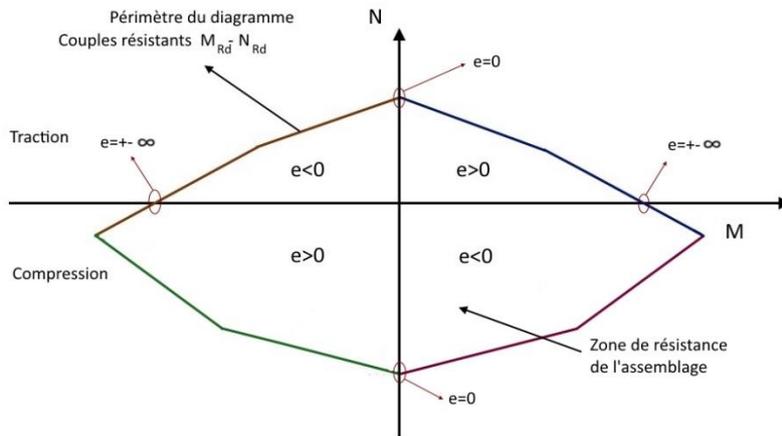


Figure 3-4 : Forme générale du diagramme d'interaction  $M-N$

Au moyen de cette méthode, il est aisé d'établir un diagramme d'interaction comme illustré à la figure 3-5. Néanmoins, nous n'entrerons pas dans les détails dans le cadre de ce résumé. La méthode complète est explicitée dans le travail et montre son efficacité vis-à-vis de la méthode classique proposée par l'Eurocode. Plus rapide, plus complète et permettant de résoudre des cas plus complexes, la possession de la rigidité et du diagramme d'interaction d'un assemblage conduit à la création de la courbe Moment-Rotation, élément ultime de caractérisation d'un assemblage.

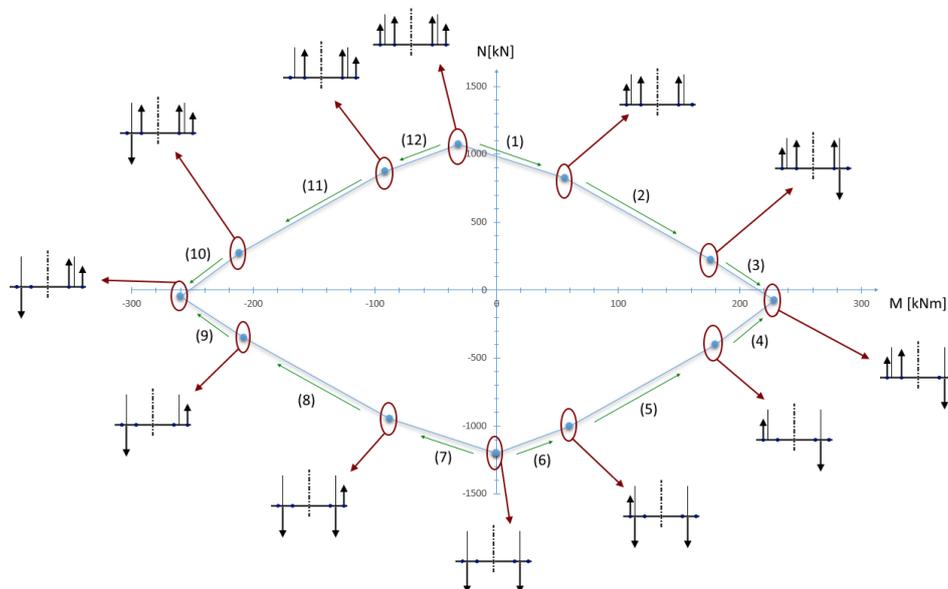


Figure 3-5 : Diagramme d'interaction et distribution des efforts dans l'assemblage

### 3.4. Conclusions et perspectives

Le travail de fin d'étude avait pour objectif de rassembler et de synthétiser la littérature disponible sur les assemblages de pieds de poteaux. L'Eurocode EN 1993-1-8 reste discret sur le dimensionnement de ce type d'assemblage et ne permet pas de modéliser un ensemble de situations pourtant présentes dans le domaine de la construction.

Cette synthèse a permis de caractériser les différentes composantes d'un assemblage de pied de poteau sous  $M$ ,  $N$  et  $V$  et principalement de faire le point sur les techniques de calculs existantes et les limites de celles-ci. Un grand nombre de portes s'ouvrent d'ores et déjà pour combler le manque d'information et permettre de dimensionner des assemblages de pieds de poteaux plus complexes et répondant aux exigences des normes actuelles.

L'application de la thèse de Cerfontaine a permis de mettre en place une nouvelle approche pour calculer la rigidité d'un assemblage sous une combinaison  $M + N$ . Cette méthode, plus simple et plus généraliste, permet de calculer la rigidité d'un assemblage quelconque, pour autant qu'on soit en possession des coefficients de rigidité associés à chaque rangée de l'assemblage. Ce travail a également permis de mettre en place un outil systématique de calculs des diagrammes d'interaction, élément clés dans le cadre d'un bureau d'étude, la connaissance d'un diagramme d'interaction permettant de dimensionner au plus juste les assemblages et de connaître l'influence de tel ou tel paramètre sur la résistance globale de l'assemblage.

Cependant, de nombreuses questions restent sans réponses face aux demandes toujours plus complexes de l'industrie. Notamment, les tronçons en T à quatre boulons par rangée nécessitent également un travail conséquent d'analyse et de recherche pour mettre au point un modèle fonctionnel et des critères adaptés en vue de réaliser des outils de calculs performants. Les longueurs efficaces en présence de raidisseurs ou les effets de groupes entre rangées intérieures restent toujours des points d'interrogation dans le dimensionnement des assemblages de pied de poteaux et représentent un ensemble d'informations auquel nous n'avons pas encore accès, de nombreuses recherches étant toujours en cours.

En conclusion, ce travail a permis de rassembler un nombre suffisant de documents et met à disposition les connaissances et les outils nécessaires en vue d'approfondir l'étude des assemblages de pieds de poteaux. De nombreuses études sont néanmoins nécessaires en vue de modéliser des assemblages plus complexes répondant aux exigences toujours plus contraignantes du domaine de la construction.

#### 4. Sources

*N.B. : L'entièreté des sources est disponible dans le travail complet.*

- [1] IVOR, R., *Assemblages des pieds de poteaux en acier. Dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux métalliques encastrés et articulés*, Marne-la-Vallée, CSTB, 2010.
- [2] *EN 1993-1-8: Eurocode 3: Calcul des structures en acier. Partie 1-8 : calcul des assemblages*, Bruxelles, Comité Européen de Normalisation, 2005.
- [3] CERFONTAINE, F., *Étude de l'interaction entre moment de flexion et effort normal dans les assemblages boulonnés*, Liège : Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 2004.
- [4] JASPART, J-P., *Recent advances in the field of steel joints column bases and further configurations for beam-to-column joints and beam splices*, Liège: Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 1997.
- [5] WALD, F., SOKOL, Z. & JASPART, J-P., *Base plate in bending and anchor in tension*, HERON, Volume 53 No 2/3, 2008, 30 pages.
- [6] STEENHUIS, M. *et al.*, *Concrete in compression and base plate in bending*, HERON, Volume 53 No 2/3, 2008, 18 pages.

- [7] JASPART, J.-P. *et al.*, *Steel Column base classification*, HERON, Volume 53 No 2/3, 2008, 18 pages.
- [8] DEMONCEAU, J.-F. *et al.*, Marne-la-Vallée, CSTB, 2010. *Connections with four bolts per horizontal row*, EUROSTEEL 2010, September 2011, Budapest – Hungary, 6 pages.
- [9] DEMONCEAU, J.-F. *et al.*, *Application of Eurocode 3 to steel connections with four bolts per horizontal row*, September 2010, Rio de Janeiro, Brazil, 8 pages.
- [10] PISAREK Z. & KOZŁOWSKI A., *End-plate steel joint with four bolts in the ow*, Rzeszów University of Technology, 2006, Rzeszów, Poland, 10 pages.