

Interface entre les structures métalliques et leurs fondations

Auteur : Beckers, Fanny

Promoteur(s) : Jaspard, Jean-Pierre; Demonceau, Jean-Francois

Faculté : Faculté des Sciences appliquées

Diplôme : Master en ingénieur civil des constructions, à finalité spécialisée en "civil engineering"

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/6762>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Université de Liège
Faculté des Sciences Appliquées

Interface entre les structures métalliques et leurs fondations

En collaboration avec l'entreprise Solvay

Travail de fin d'études réalisé par

Fanny BECKERS

En vue de l'obtention du grade de Master Ingénieur Civil des Constructions

Membres du jury:

Jean-Pierre JASPART (Promoteur) – Université de Liège
Jean-François DEMONCEAU (Co-promoteur) – Université de Liège
Boyana MIHAYLOV – Université de Liège
Philippe HORMAN - Solvay

Année académique 2018-2019

Remerciements

A travers ce travail marquant la fin de 6 années d'études, je tiens à remercier et à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur Monsieur J-P. JASPART et mon co-promoteur Monsieur J-F. DEMONCEAU pour leur disponibilité et pour m'avoir fait confiance, m'avoir accueillie, encadrée, aidée et conseillée.

Ensuite, j'aimerais remercier Monsieur P. HORMAN pour sa présence à différentes réunions, sa disponibilité et sa réactivité à mes diverses questions.

Je souhaiterais également remercier ma famille et mes proches pour leurs encouragements, leur soutien et plus particulièrement, mes parents pour la relecture de ce travail.

Enfin, je remercie l'Université de Liège et l'École des Mines d'Alès, et tous leurs professeurs, intervenants, pour m'avoir procuré un enseignement de qualité et l'envie de m'épanouir dans le secteur de l'ingénierie de la construction.

Énoncé

Titre du travail de fin d'études:

Interface entre les structures métalliques et leurs fondations

Lorsque Solvay, groupe belge leader mondial de la chimie, réalise des travaux de génie civil (constructions de nouvelles usines, rénovations et modifications de structures existantes), l'interface entre les structures en béton et les structures métalliques est systématiquement source de difficultés.

Ces difficultés sont dues à quatre facteurs principaux. Premièrement, les entrepreneurs et les bureaux d'études concernés par les structures en béton sont distincts de ceux confrontés aux structures métalliques. Deuxièmement, les délais sur chantier sont très courts. Ensuite, l'exécution sur site est souvent incompatible avec les études et les entrepreneurs locaux qui sont la plupart du temps peu habitués aux exigences de qualité. Enfin, la coordination entre les différents intervenants du projet est compliquée.

De ce fait, les ingénieurs du Central Design Office de chez Solvay souhaitent simplifier le travail de leurs équipes en améliorant les standards et les exigences liés au design et aux calculs de ces interfaces ; plus particulièrement, dans le cadre de ce projet, la liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation.

Pour cela, Solvay fait appel aux chercheurs de l'Université de Liège. En effet, l'université est un atout pour les ingénieurs puisqu'ils souhaitent prendre en compte, dès à présent dans leurs standards, les évolutions techniques et théoriques (nouvelles méthodes de calculs, nouvelles théories) tout en intégrant la réalité de terrain et en respectant leurs exigences particulières.

Les propositions d'adaptation et d'amélioration des standards de liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation en béton font l'objet de ce projet de fin d'études. Ce projet se décomposera en différentes phases. Premièrement, une étude des différentes configurations d'assemblage sera réalisée. Deuxièmement, afin d'évaluer la résistance de l'assemblage, le choix d'une méthode de calcul sera posé sur base des méthodes proposées dans la littérature (Eurocodes, articles scientifiques, documents du CTICM, etc.) et sera particularisée au contexte précis de la société Solvay. Enfin, des exemples d'applications rencontrés classiquement seront proposés.

Membres du jury :

Jean-Pierre JASPART
(Promoteur, ULiège)



Jean-François DEMONCEAU
(Co-promoteur, ULiège)



Boyan MIHAYLOV
(ULiège)



Philippe HORMAN
(Solvay)



Résumé

Lorsque Solvay, groupe belge leader mondial de la chimie, réalise des travaux de génie civil (constructions de nouvelles usines, rénovations et modifications de structures existantes), l'interface entre les structures en béton et les structures métalliques est systématiquement source de difficultés. Ces difficultés sont dues à quatre facteurs principaux. Premièrement, les entrepreneurs et les bureaux d'études concernés par les structures en béton sont distincts de ceux concernés par les structures métalliques. Deuxièmement, les délais sur chantier sont très courts. Ensuite, l'exécution sur site est souvent incompatible avec les études et les entrepreneurs locaux qui sont la plupart du temps peu habitués aux exigences de qualité. Enfin, la coordination entre les différents intervenants du projet est compliquée.

De ce fait, les ingénieurs du Central Design Office de chez Solvay souhaitent simplifier le travail de ses équipes en améliorant les standards et les exigences liés au design et aux calculs de ces interfaces, plus particulièrement, dans le cadre de ce projet, la liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation. Pour cela, Solvay fait appel aux chercheurs de l'Université de Liège. En effet, l'université est un atout pour les ingénieurs puisqu'ils souhaitent prendre en compte, dès à présent dans leurs standards, les évolutions techniques et théoriques (nouvelles méthodes de calculs, nouvelles théories) tout y en associant la réalité de terrain et y en conservant certaines exigences.

Les propositions d'adaptations et d'améliorations des standards de liaison de Solvay entre les colonnes métalliques et leur fondation en béton font l'objet de ce projet de fin d'études. Celui-ci se décompose en cinq grandes phases.

Dans un premier temps, une bibliothèque de solutions d'ancrage existantes, autant articulées qu'encastées, a été créée. Cette bibliothèque contient le descriptif de chacune de ces solutions ainsi qu'une explication sur leur mise en œuvre et leurs conditions d'utilisation.

Dans un second temps, une étude comparative de ces solutions a été menée. Cette étude a notamment permis d'identifier et de comparer les composantes de chacune des solutions.

Ensuite, afin d'effectuer le design des assemblages, une méthode de calcul qui permet de déterminer leur résistance doit être choisie. C'est en analysant les méthodes proposées dans la littérature que le choix de la méthode des composantes est posé.

Sur cette base, pour chaque type d'effort (compression, traction, cisaillement et flexion) et leurs combinaisons (M-N, N-V et M-N-V), la résistance des composantes est déterminée à l'aide des formules identifiées dans la littérature (Eurocodes, articles scientifiques, documents du CTICM, etc.). La résistance de l'assemblage global est alors évaluée.

Enfin, à partir de ces recherches, Solvay souhaite définir les dimensions d'une grande partie de ses assemblages. Par conséquent, des feuilles de calcul ont été élaborées pour différentes configurations couramment rencontrées chez Solvay.

Abstract

When Solvay, a Belgian group leading in chemistry field over the world, carries out civil engineering works (building of new plants, renovations and modifications of existing structures), the interface between concrete and metallic structures is systematically a source of difficulties. These difficulties are due to four main factors. Firstly, contractors and design offices involved in concrete structures are distinct from those facing metallic structures. Secondly, the deadlines on sites are very short. Then, the on-site execution is often incompatible with studies and local contractors. Those ones are often unaccustomed to quality requirements. Finally, the coordination between the various stakeholders of the project is complicated.

As a result, Solvay's Central Design Office engineers want to simplify the work of their teams by improving the standards and requirements related to the design and calculation of these interfaces, especially, in the context of this project, the connection between the metallic columns and their foundation.

For this, Solvay calls on researchers from the University of Liège. Indeed, the university is an asset for the engineers since they wish to consider, as of now in their standards, the technical and theoretical evolutions (new calculation methods, new theories) while associating the on-site reality and keeping some of their requirements.

The suggestions to adapt and improve Solvay's standards for the connection between metallic columns and their concrete foundation are the subject of this end-of-study project. This project is divided into five main phases.

As a first phase, a library of existing anchoring solutions, both articulated and embedded, was created. This library contains a description of each solution as well as an explanation of their execution and conditions of use.

In a second step, a comparative study of these solutions was carried out. This study allowed to identify and compare the components of every solution.

Then, in order to design the assemblies, a calculation method, to determine their strength, must be chosen. By analyzing the methods proposed in the literature, the choice of the component method is made.

On this basis, for each type of effort (tension, compression, shear and bending) and their combinations (M-N, N-V and M-N-V), the strength of the components is determined using the formulas identified in the literature (Eurocodes, scientific articles, CTICM documents, etc.). The strength of the overall assembly is then evaluated.

Finally, from this research, Solvay wants to define most of their assemblies' dimensions. Therefore, Design Sheets were developed for different configurations commonly found at Solvay.

Table des matières

Remerciements.....	2
Énoncé.....	3
Résumé.....	4
Abstract.....	5
Table des matières	6
Table des illustrations	8
Table des notations	10
CHAPITRE 1 : Introduction	11
1. Mise en contexte	11
1.1. Solvay.....	11
1.2. Projet de stabilité	11
2. Problématique	13
3. Objectif	13
4. Méthodologie du travail de recherche.....	14
CHAPITRE 2 : État de l'art	15
1. Introduction.....	15
2. Solutions de base.....	15
2.1. Conditions d'utilisation	18
2.2. Mises en œuvre	19
3. Variantes	23
3.1. Fondation en béton	23
3.2. Tiges d'ancrage.....	24
3.3. Section du profilé	26
3.4. Forme de la platine.....	27
3.5. Raidisseurs	27
3.6. Châssis	31
3.7. Bêches.....	33
4. Conclusion	35
CHAPITRE 3 : Choix d'une méthode de calcul.....	36
CHAPITRE 4 : Dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux	38
1. Introduction.....	38
1.1. Objectif	38
1.2. Démarche.....	38
1.3. Modes de ruine	39
1.4. Ouvrages de référence.....	39
2. Dimensionnement des assemblages soumis à de la traction	40
2.1. Identification des composantes actives.....	40
2.2. Étude de la colonne	42
2.3. Étude des soudures	42
2.4. Étude de l'assemblage boulonné.....	43
2.5. Étude de l'assemblage en pied de poteau	51
3. Dimensionnement des assemblages soumis à de la compression.....	52

3.1.	Identification des composantes actives	52
3.2.	Étude de la colonne	53
3.3.	Étude des soudures	53
3.4.	Étude de l'assemblage boulonné.....	53
3.5.	Étude de l'assemblage en pied de poteau	58
4.	Dimensionnement des assemblages soumis à de la flexion	59
4.1.	Étude de la colonne	59
4.2.	Étude des soudures	59
4.3.	Étude de l'assemblage boulonné.....	60
4.4.	Étude de l'assemblage en pied de poteau	62
5.	Dimensionnement des assemblages soumis à une combinaison M-N	63
5.1.	Étude de la colonne	63
5.2.	Étude des soudures	64
5.3.	Étude de l'assemblage boulonné.....	64
5.4.	Étude de l'assemblage en pied de poteau	68
6.	Dimensionnement des assemblages soumis à du cisaillement	68
6.1.	Identification des composantes actives.....	68
6.2.	Étude de la colonne	70
6.3.	Étude des soudures	70
6.4.	Étude de l'assemblage boulonné.....	71
6.5.	Étude de l'assemblage en pied de poteau	78
7.	Dimensionnement des assemblages soumis à une combinaison N-V ou M-N-V	79
7.1.	Identification des composantes actives.....	79
7.2.	Étude de la colonne	80
7.3.	Étude des soudures	80
7.4.	Étude de l'assemblage boulonné.....	80
7.5.	Étude de l'assemblage en pied de poteau	81
8.	Conclusion	82
CHAPITRE 5 : Exemples d'application		85
1.	Introduction.....	85
2.	Solutions exploitées par Solvay	85
2.1.	Solutions articulées.....	85
2.2.	Solutions encastées.....	87
2.3.	Variantes.....	87
2.4.	Dispositions particulières.....	90
3.	Feuilles de calcul	90
4.	Conclusion	92
CHAPITRE 6 : Conclusions et perspectives d'évolution		93
1.	Conclusions.....	93
2.	Perspectives d'évolution.....	94
Bibliographie		96
Annexes.....		98
Annexe 1 : Feuille de calcul – Solution articulée 1.....		98
Annexe 2 : Feuille de calcul – Solution articulée 2		119
Annexe 3 : Feuille de calcul – Solution encastée 1		142
Annexe 4 : Feuille de calcul – Solution encastée 2		169

Table des illustrations

FIGURE 1 - ORGANIGRAMME HIERARCHIQUE D'UN PROJET DE STABILITE CHEZ SOLVAY	12
FIGURE 2 – DÉFINITION DE L'ORIENTATION DES SECTIONS EN I OU H	15
FIGURE 3 – MISE EN PLACE DE LA PLAQUE D'ASSISE NON-PRESCHELLEE	19
FIGURE 4 - MISE EN PLACE DE LA PLAQUE D'ASSISE EN DEUX PHASES	19
FIGURE 5 - SOUDURES ENTRE LA COLONNE ET LA PLATINE	19
FIGURE 6 - MISE EN ŒUVRE AVEC PLATS PERCES	20
FIGURE 7 - MISE EN ŒUVRE AVEC TIGES NON-PRESCHELLEES	21
FIGURE 8 – ENCASTREMENT PEU PROFOND ET REGLAGE HORIZONTAL PAR CALES EN BOIS	22
FIGURE 9 - ENCASTREMENT PROFOND ET TRANSMISSION DES EFFORTS NORMAUX	22
FIGURE 10 – DIMENSIONS DE LA FONDATION EN BÉTON	23
FIGURE 11 - TIGE DROITE	24
FIGURE 12 - TIGE RECOURBEE	24
FIGURE 13 - TIGE AVEC CONTRE-COURBURE	24
FIGURE 14 - TIGE EN QUEUE DE CARPE	24
FIGURE 15 - TIGE À TÊTE MARTEAU	24
FIGURE 16 - TIGE AVEC PLAT	24
FIGURE 17 - TIGE AVEC PLAT ET GAINE	24
FIGURE 18 - PIED DE POTEAU AVEC CONTREVENTEMENT	25
FIGURE 19 - SOLUTION 2-1 AVEC 4 TIGES D'ANCRAGE	26
FIGURE 20 - SOLUTION 2-1 AVEC 8 TIGES D'ANCRAGE ET DES RAIDISSEURS	26
FIGURE 21 - SOLUTION 2-1 AVEC 8 TIGES EXTÉRIEURES	26
FIGURE 22 - SOLUTION 2-1 AVEC 4 TIGES EXTERIEURES ET 4 INTERIEURES	26
FIGURE 23 – COLONNE ARTICULÉE À SECTION CIRCULAIRE	26
FIGURE 24 - COLONNE ARTICULÉE À SECTION CARRÉE	26
FIGURE 25 - SECTION CARRÉE AVEC 4 TIGES SUR LES CÔTÉS	27
FIGURE 26 - SECTION CARRÉE AVEC 4 TIGES DANS LES COINS	27
FIGURE 27 - PLATINE CIRCULAIRE	27
FIGURE 28 - PLATINE ANNULAIRE	27
FIGURE 29 - RAIDISSEURS DANS LE PROLONGEMENT DES SEMELLES	28
FIGURE 30 - RAIDISSEURS DANS LE PROLONGEMENT DE L'ÂME	28
FIGURE 31 – RAIDISSEURS AUX EXTRÉMITÉS DES SEMELLES	28
FIGURE 32 - SECTION CARRÉE AVEC PLATINE SIMPLEMENT RAIDIE	29
FIGURE 33 - SECTION CARRÉE AVEC RAIDISSEURS DIAGONAUX	29
FIGURE 34 - SECTION CARRÉE AVEC RAIDISSEURS DIAGONAUX ET TUBES SOUDÉS	29
FIGURE 35 - SECTION CARRÉE AVEC RAIDISSEURS PARALLÈLES AUX BORDS DE LA PLATINE	29
FIGURE 36 - SECTION CARRÉE AVEC DOUBLES RAIDISSEURS PARALLÈLES AUX BORDS DE LA PLATINE	29
FIGURE 37 - SECTION RECTANGULAIRE AVEC RAIDISSEURS PARALLELES AUX BORDS DE LA PLATINE	29
FIGURE 38 - PLATINE CIRCULAIRE AVEC RAIDISSEURS ET ANNEAU DE COMPRESSION	30
FIGURE 39 - PLATINE CIRCULAIRE AVEC RAIDISSEURS ET TUBES SOUDÉS	30
FIGURE 40 - RAIDISSEURS D'ÂME INCLINÉS	31
FIGURE 41 - RAIDISSEURS D'ÂME INCLINÉS AVEC RÉDUCTION DE LA SECTION DU PROFILÉ	31
FIGURE 42 - RAIDISSEURS D'ÂME VERTICAUX	31
FIGURE 43 - ÂME RENFORCEE	31
FIGURE 44 - CHÂSSIS AVEC RAIDISSEURS DANS LE PROLONGEMENT DE L'ÂME	32
FIGURE 45 - CHÂSSIS AVEC RAIDISSEURS DANS LE PROLONGEMENT DES SEMELLES	32
FIGURE 46 - CHASSIS CONSTITUANT UNE POUTRE	32
FIGURE 47 - CHÂSSIS AVEC CORNIÈRES	32
FIGURE 48 - SECTION CIRCULAIRE AVEC CHÂSSIS DISCONTINU	33
FIGURE 49 - SECTION CIRCULAIRE AVEC CHÂSSIS CONTINU	33
FIGURE 50 - BÊCHE EN I OU H	34
FIGURE 51 - BECHE EN CORNIERE	34

FIGURE 52 - BECHE : METHODE FRANÇAISE	34
FIGURE 53 - DOUBLE BÊCHE : MÉTHODE BELGE	34
FIGURE 54 – BECHE : METHODE BELGE	34
FIGURE 55 - SOLUTION 2-1 AVEC 4 RANGÉES DE TIGES	44
FIGURE 56 – EXEMPLE DE MODÉLISATION PAR TRONÇONS EN T-ÉQUIVALENTS TENDUS	44
FIGURE 57 - EFFET DE LEVIER	45
FIGURE 58 - MODE DE RUINE 1 EN TRACTION.....	45
FIGURE 59 - MODE DE RUINE 2 EN TRACTION.....	45
FIGURE 60 - MODE DE RUINE 1-2 EN TRACTION.....	45
FIGURE 61 - MODE DE RUINE 3 EN TRACTION.....	46
FIGURE 62 - MODE DE RUINE 4 EN TRACTION.....	46
FIGURE 63 - RUPTURE PAR EXTRACTION-GLISSEMENT	46
FIGURE 64 - RUPTURE PAR CÔNE DE BÉTON	46
FIGURE 65 - RUPTURE PAR ÉCLATEMENT DU BÉTON	46
FIGURE 66 - RUPTURE COMBINÉE DU BÉTON ET PAR EXTRACTION-GLISSEMENT	46
FIGURE 67 - RUPTURE PAR FENDAGE DU BÉTON.....	46
FIGURE 68 - ÉTAT DES RÈGLES FOURNIES PAR LES EUROCODES POUR LE DIMENSIONNEMENT EN TRACTION	51
FIGURE 69 - DIFFUSION MAXIMALE	55
FIGURE 70 - DIFFUSION LIMITÉE PAR LA HAUTEUR DE LA FONDATION.....	55
FIGURE 71 - DIFFUSION LIMITÉE PAR LES DIMENSIONS EN PLAN DE LA FONDATION	55
FIGURE 72 - TRONÇONS EN T COMPRIMÉS D'UNE SECTION EN I RAIDIE	55
FIGURE 73 - TRONÇONS EN T COMPRIMÉS D'UNE SECTION CARRÉE	55
FIGURE 74 - MATAGE DU GRAIN DE LA SOLUTION 1-2 SOUS UN EFFORT DE COMPRESSION	57
FIGURE 75 - ÉTAT DES RÈGLES FOURNIES PAR LES EUROCODES POUR LE DIMENSIONNEMENT EN COMPRESSION	59
FIGURE 76 - PROFILÉ EN I RAIDI SOUMIS À DE LA FLEXION SEULE	61
FIGURE 77 - SECTION CARRÉE SOUMISE À DE LA FLEXION SEULE	61
FIGURE 78 - RÉPARTITION DES CONTRAINTES POUR LA PARTIE DE LA COLONNE DE LA SOLUTION 2-2 NOYÉE DANS LE BÉTON SOUS UNE COMBINAISON D'EFFORTS M-V	62
FIGURE 79 - ÉTAT DES RÈGLES FOURNIES PAR LES EUROCODES POUR LE DIMENSIONNEMENT EN FLEXION	63
FIGURE 80 - DIAGRAMME D'INTERACTION M-N CONSTRUIT SUR BASE DE L'EUROCODE.....	67
FIGURE 81 - BÊCHE EN I OU H SOUS UN EFFORT TRANCHANT $V_{Ed,x}$: DISTRIBUTION DES EFFORTS	74
FIGURE 82 - BÊCHE EN I OU H SOUS UN EFFORT TRANCHANT $V_{Ed,y}$: DISTRIBUTION DES EFFORTS	74
FIGURE 83 – BÊCHE EN CORNIÈRE: DISTRIBUTION DES EFFORTS.....	75
FIGURE 84 - CISAILLEMENT DES TIGES	76
FIGURE 85 - ÉTAT DES RÈGLES FOURNIES PAR L'EUROCODE POUR LE DIMENSIONNEMENT EN CISAILLEMENT.....	79
FIGURE 86 - SOLVAY: SOLUTION ARTICULÉE 1	86
FIGURE 87 - SOLVAY : SOLUTION ARTICULÉE 1 AVEC 4 TIGES	86
FIGURE 88 – SOLVAY: SOLUTION ARTICULÉE 2.....	86
FIGURE 89 - SOLVAY: SOLUTION ENCASTREE 1.....	87
FIGURE 90 - SOLVAY: SOLUTION ENCASTREE 2.....	87
FIGURE 91 - SOLVAY : SOLUTION ARTICULÉE 1 AVEC TIGES DROITES	88
FIGURE 92 – SOLVAY : SOLUTION ARTICULÉE 1 AVEC BÊCHE	88
FIGURE 93 - SOLVAY : SOLUTION ARTICULÉE 1 AVEC DES RAIDISSEURS DANS LE PROLONGEMENT DES SEMELLES	88
FIGURE 94 - SOLVAY : SOLUTION ARTICULÉE 1 AVEC DES RAIDISSEURS DANS LE PROLONGEMENT DE L'ÂME.....	88
FIGURE 95 - RONDELLES	89

Table des notations

a	Dimension de la gorge des soudures
A_s	Section résistante d'une tige
b_{eff}	Largeur efficace
c	Largeur d'appui additionnelle
d	Déplacement horizontal de la structure
e	Excentricité de l'effort axial
$F_{C,i,Rd}$	Effort résistant du tronçon en T i comprimé
$F_{T,i,Rd}$	Effort résistant du tronçon en T i tendu
L_b	Longueur efficace d'une tige d'ancrage
L_b^*	Longueur limite d'une tige d'ancrage
l_{eff}	Longueur efficace
$l_{eff,1}$	Longueur efficace du tronçon en T-équivalent pour le mode de ruine 1
M_{Ed}	Effort de flexion appliqué à l'assemblage
M_{Rd}	Moment résistant
$M_{C,Rd}$	Moment résistant de la partie comprimée de l'assemblage boulonné
$M_{T,Rd}$	Moment résistant de la partie tendue de l'assemblage boulonné
n_b	Nombre total de tiges ou nombre de tiges de la rangée considérée
N_{Ed}	Effort axial appliqué à l'assemblage
N_{Rd}	Résistance de calcul en traction ou en compression
$N_{sed,T}$	Effort secondaire de traction
$N_{sed,C}$	Effort secondaire de compression
t	Plus petite épaisseur des éléments assemblés par soudures
t_p	Épaisseur de la semelle du tronçon en T-équivalent
$V_{a,Rd}$	Effort tranchant résistant de l'assemblage boulonné, correspondant à l'effort maximal transmissible
$V_{b,Rd}$	Résistance de calcul par cisaillement d'une tige
$V_{Ed,n,x}$	Effort tranchant appliqué à la bêche dans la direction x
$V_{Ed,n,y}$	Effort tranchant appliqué à la bêche dans la direction y
$V_{f,Rd}$	Résistance de calcul par frottement
$V_{n,Rd}$	Résistance de calcul par cisaillement de la bêche
$V_{Rd,n,x}$	Résistance de calcul par cisaillement de la bêche dans la direction x
$V_{Rd,n,y}$	Résistance de calcul par cisaillement de la bêche dans la direction y
x	Direction parallèle à l'axe faible de la section
y	Direction parallèle à l'axe fort de la section
z_C	Distance entre le centre de compression et l'axe de rotation de la colonne, le centre de compression étant défini comme le centre de gravité de l'ensemble des aires de répartition des tronçons en T de la partie comprimée
$z_{C,i}$	Distance entre le centre de gravité du tronçon en T i comprimé et l'axe de rotation de la colonne
z_T	Distance entre le centre de traction et l'axe de rotation de la colonne, le centre de traction étant défini comme le centre de résistance, situé au droit de la résultante des résistances en traction de toutes les rangées de tiges du côté en traction de l'assemblage
$z_{T,i}$	Distance entre le centre de gravité du tronçon en T i tendu et l'axe de rotation de la colonne
σ_b	Contraintes de pression sur le béton
σ_v	Contraintes induites par l'effort de cisaillement
σ_M	Contraintes induites par l'effort de flexion

CHAPITRE 1 : Introduction

1. Mise en contexte



1.1. Solvay

Solvay, né en Belgique en 1863, est un groupe leader mondial dans les domaines de la chimie et des matériaux. Ce groupe est engagé dans le développement de solutions innovantes, efficaces, durables et adaptées aux enjeux mondiaux actuels dans différents domaines tels que la santé, l'aéronautique, la construction, etc.

En construction, Solvay développe des solutions qui permettent de diminuer la consommation énergétique des bâtiments. Parmi ces solutions, nous retrouvons des mousses isolantes de haute performance à base de produits fluorés, des fenêtres à triple vitrage, des peintures et revêtements composés de solvants biodégradables.

Afin d'être à la pointe dans le développement de ses solutions, le groupe Solvay, dont le siège se trouve à Bruxelles, emploie aujourd'hui 27 000 collaborateurs présents dans 62 pays, dont 1000 personnes à Bruxelles. Ce groupe est cependant en perpétuelle évolution. Ainsi, Solvay continue de s'agrandir et de s'améliorer. Dès lors, de nouvelles usines sont construites dans des pays stratégiques, d'autres sont agrandies ou rénovées. Quotidiennement, quatre ingénieurs stabilité (trois belges et un français), parmi l'ensemble des collaborateurs, travaillent sur l'agrandissement et l'amélioration des usines de chez Solvay.

1.2. Projet de stabilité

Lors du développement dans un certain pays d'un marché en accord avec les activités de Solvay, l'entreprise étudie l'intérêt stratégique de s'y implanter. Si celui-ci est suffisamment important, un projet de construction d'une nouvelle usine peut y être lancé. Ce projet est alors étudié en trois phases distinctes détaillées ci-après.

1. Études préliminaire (ESQ : Études d'esquisses)

Durant cette première phase de projet, les ingénieurs qualifiés en stabilité et le personnel en charge des techniques (responsables des équipements, du piping, etc.) évaluent grossièrement (sans aucun calcul) ce dont ils auront besoin pour la construction de la nouvelle usine. Grâce à cela, ils remettent un prix estimé à 30% du prix réel. Cette première analyse et estimation du projet sont alors envoyées à la Global Business Unit (GBU). La GBU est l'entité hiérarchique qui englobe l'ensemble des Business Units (voir *Figure 1*) ; une Business Unit est une entreprise qui appartient au groupe Solvay. Il existe une GBU par catégorie de produits. Une fois les ESQ validées par la GBU, elles sont envoyées au Conseil d'Administration qui doit également les valider afin de passer à la seconde étape du projet.

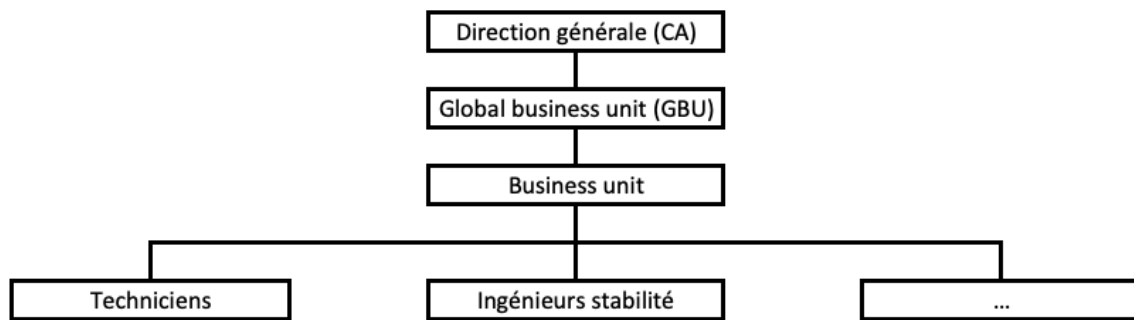


Figure 1 - Organigramme hiérarchique d'un projet de stabilité chez Solvay

2. Basic design (APS : Avant-projet sommaire)

Les ingénieurs experts en stabilité réalisent une modélisation complète en 3D (de type REVIT), sur laquelle l'ensemble des disciplines peuvent travailler en même temps. Ce modèle évolue donc en permanence et permet de s'assurer que l'emplacement des différents éléments de stabilité (poutres, colonnes, contreventements, etc.) et des diverses installations techniques (conduites de produits chimiques, piping, etc.) concordent.

Durant cette seconde étape du projet, les premiers calculs sont effectués afin de définir les concepts généraux de stabilité, les dimensions des poutres et des colonnes, etc. Des plans guides, utiles à la troisième phase du projet, sont alors produits.

Cette fois, le coût du projet est estimé à 10% du prix réel et les résultats doivent également être validés par la GBU et le CA.

3. Etude de projet (Detail engineering)

Cette dernière phase correspond aux études finales du projet. Un bureau d'études extérieur est choisi. Ce bureau d'études est responsable de toutes les disciplines. Il étudie aussi bien les réservoirs que le piping, la stabilité, l'instrumentation, etc., sur base de ce qui a été fait et budgétisé précédemment. Il s'occupe également des engagements architecturaux, du suivi des travaux, de trouver des sous-traitants pour certaines parties si besoin, de consulter des bureaux d'études locaux dans la mesure du possible, etc.

C'est à ce moment-là que les difficultés commencent : ce bureau d'études n'est pas toujours spécialisé dans tous les domaines de la stabilité, en particulier en acier. Des discordances (au niveau des tolérances, de la conception) sont donc régulièrement rencontrées, d'une part en ce qui concerne l'étude de l'interface entre les structures métalliques et leurs fondations, d'autre part, entre ce que font les ingénieurs spécialisés en béton et ceux experts en acier. Ceux-ci sont la plupart du temps différents. Solvay a donc par le passé imposé quelques standards (concernant notamment les garde-corps, les échelles, les caillebotis, les tôles armées, la peinture, les réservoirs, etc.) que le bureau d'études doit utiliser ou adapter aux normes locales.

2. Problématique

Comme mentionné, lors d'études et de travaux en stabilité chez Solvay, l'interface entre les structures en béton et celles en métal est systématiquement source de difficultés. Ces difficultés sont dues à quatre facteurs principaux.

1. Les entrepreneurs et les bureaux d'études concernés par les structures en béton sont distincts de ceux confrontés aux structures métalliques et ces deux disciplines ne communiquent pas suffisamment.
Or, les tolérances d'exécution de chacune d'elles sont différentes ; pour l'acier, elles sont de l'ordre du millimètre et pour le béton, du centimètre. Cette non-coordination mène alors, par exemple, à l'oubli, par les experts en acier, des distances aux bords des éléments en béton.
Les bêtes, qui font partie des détails d'assemblages des structures métalliques, sont rarement définies lors des études de génie civil. Elles sont régulièrement ajoutées lors de modifications tardives des plans. Ainsi, pendant l'exécution sur site, les réservations dans le béton sont souvent oubliées, ce qui peut mener à des prises de décisions très légères, du type « couper la bête ».
2. Les délais sur chantier sont très courts. Dès lors, si les délais d'études sont lents, les entrepreneurs sont amenés à prendre des décisions permettant d'accélérer l'exécution, comme par exemple, modifier le type de tiges prévu.
3. L'exécution sur site est souvent incompatible avec les études et les entrepreneurs locaux qui sont la plupart du temps peu habitués aux exigences de qualité. Par exemple, les exigences d'implantation des structures en acier sont difficilement réalisables sur site. Ainsi, il arrive régulièrement que les trous dans les plaques d'assise soient agrandis, ce qui est rarement validé par le bureau d'études.
De plus, Solvay se développe dans des pays « exotiques » où les technologies et donc, les moyens de précision sont peu évolués et la main d'œuvre moins qualifiée et suivie de loin. En outre, dans ce type de pays, le coût du mortier sans retrait est élevé. Par conséquent, il est remplacé par des produits plus économiques mais non adaptés. Les produits utilisés pour les ancrages chimiques ou mécaniques sont également rarement conformes aux calculs.
4. Enfin, la coordination entre les différents intervenants du projet est compliquée.

Pour l'ensemble de ces raisons, Solvay a défini un certain nombre de standards. Toutefois, ceux-ci sont parfois surdimensionnés, ne prennent pas en compte l'ensemble des données spécifiques du projet, ne sont plus toujours conformes aux exigences de calculs actuelles, etc.

3. Objectif

Les ingénieurs du Central Design Office de chez Solvay souhaitent simplifier le travail de ses équipes. A cette fin, ils aimeraient améliorer les standards et les exigences liés au design et aux calculs des interfaces entre les structures métalliques et leurs fondations ; plus particulièrement, dans le cadre de ce projet, la liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation. Ces améliorations doivent toutefois être sans conséquence en termes de coût et de planning.

Pour cela, Solvay fait appel aux chercheurs de l'Université de Liège. En effet, l'université est un atout pour les ingénieurs puisqu'ils souhaitent prendre en compte, dès à présent dans leurs standards, les évolutions techniques et théoriques (nouvelles méthodes de calculs, nouvelles théories) associées à la réalité de terrain et à certaines exigences propres à l'entreprise. Parmi ces exigences, nous retrouvons

des rehausses en béton de minimum 200mm d'épaisseur sous chaque poteau ou équipement posé sur le sol afin de les protéger des produits corrosifs présents sur certains sites ainsi que la prise en compte d'une perte de diamètre de 3mm sur chacune des tiges d'ancrage.

L'objectif de ce projet est donc de proposer des adaptations et des améliorations qui permettent de définir les dimensions d'une grande partie des standards d'ancrage de Solvay.

4. Méthodologie du travail de recherche

La réflexion autour des propositions d'adaptations et d'améliorations des standards de liaison de Solvay s'est construite en cinq grandes phases.

La première étape fut de rassembler de la documentation sur les pieds de poteaux dans l'optique de créer une bibliothèque de solutions d'ancrage existantes, autant articulées qu'encastées. Huit solutions principales, présentant chacune différentes variantes possibles, ont été identifiées. Cette bibliothèque contient le descriptif et la schématisation de chacune de ces solutions ainsi qu'une explication sur leur(s) méthode(s) de mise en œuvre et leurs conditions d'utilisation.

Dans un second temps, une étude comparative de ces solutions a été menée en vue de relever leurs avantages et inconvénients. Cette étude a également permis d'identifier et de comparer les composantes de chacune des solutions.

Ensuite, afin d'effectuer le design des assemblages, une méthode de calcul qui permet de déterminer leur résistance a été choisie. C'est en analysant les méthodes proposées dans la littérature que le choix de la méthode des composantes est posé. Cette méthode née dans les années 80 est aujourd'hui largement utilisée pour la conception des assemblages de toutes sortes. Son principe est expliqué dans le *Chapitre 3* de ce mémoire.

Sur cette base, pour chaque type d'effort et leurs combinaisons, la résistance des composantes est déterminée à l'aide de formules identifiées dans la littérature (Eurocodes, articles scientifiques, documents du CTICM, etc.). La résistance globale de l'assemblage est alors évaluée.

Enfin, à partir de ces recherches, Solvay souhaite définir les dimensions d'une grande partie de ses assemblages. Par conséquent, pour quatre configurations d'assemblage couramment rencontrées chez Solvay, des feuilles de calcul ont été élaborées (*Chapitre 6*). Celles-ci sont composées de trois parties principales : une définition de l'assemblage étudié et des différents paramètres, l'ensemble des données qui doivent être connues par l'utilisateur et les formules nécessaires à la vérification de la résistance d'une part des composantes et d'autre part de l'assemblage global et ce pour chaque type d'effort et leurs combinaisons.

CHAPITRE 2 : État de l'art

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de rassembler les solutions couramment utilisées pour la liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation ainsi que d'en comprendre leurs spécificités, leur(s) méthode(s) de mise en œuvre, leurs dispositions constructives et leurs conditions d'utilisation. La condition d'utilisation d'une solution peut aussi bien être liée au type et à la dimension de la colonne (colonne d'une usine industrielle, colonne d'un bâtiment de moindre importance, colonne d'une barrière, etc.) qu'à la catégorie d'efforts que l'assemblage peut transmettre. Dans cette partie, les caractéristiques de chaque élément composant l'assemblage seront également exposées.

Yvon Lescouarc'h est l'auteur de deux ouvrages importants pour cette partie de la recherche : « Les pieds de poteaux articulés en acier », publié en 1982 [17] et « Les pieds de poteaux encastres en acier », publié en 1988 [18]. Ces ouvrages reprennent la majorité des configurations d'assemblages utilisées aujourd'hui. Quelques configurations supplémentaires ou variantes à ce qu'Yvon Lescouarc'h a proposé ont été identifiées par consultation d'entreprises ou en lisant des documents et des ouvrages à disposition. Huit solutions principales ont finalement été identifiées. Celles-ci sont appelées « les solutions de base ». Elles sont présentées dans la section ci-après. Ensuite, les nombreuses variantes à ces solutions seront exposées.

2. Solutions de base

Deux grandes familles d'assemblages sont distinguées : les assemblages dits articulés transmettant des efforts normaux et tranchants et ceux dits encastres, transmettant en plus des moments de flexion. Il arrive également qu'un assemblage soit considéré comme articulé dans une direction mais pas dans l'autre. Par exemple, les assemblages à axe d'articulation (voir *Tableau 1*) constituent une articulation dans une direction seulement (dans la direction x de la *Figure 2*¹).

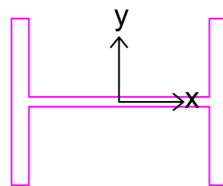


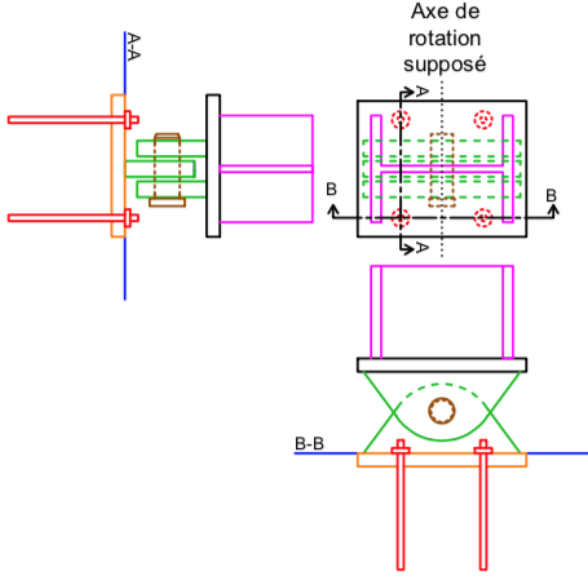
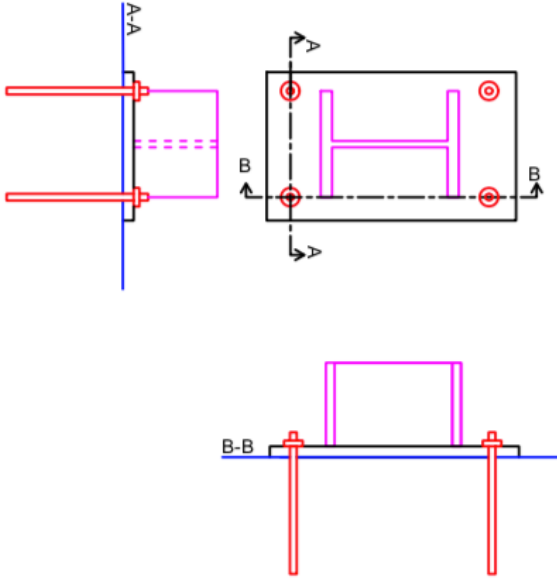
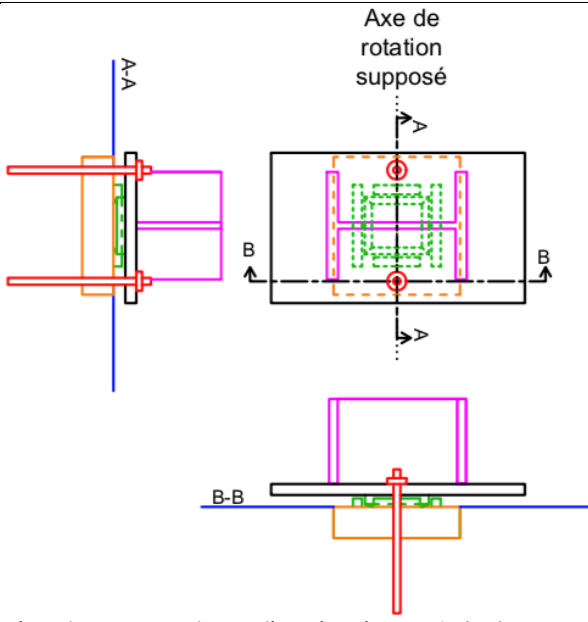
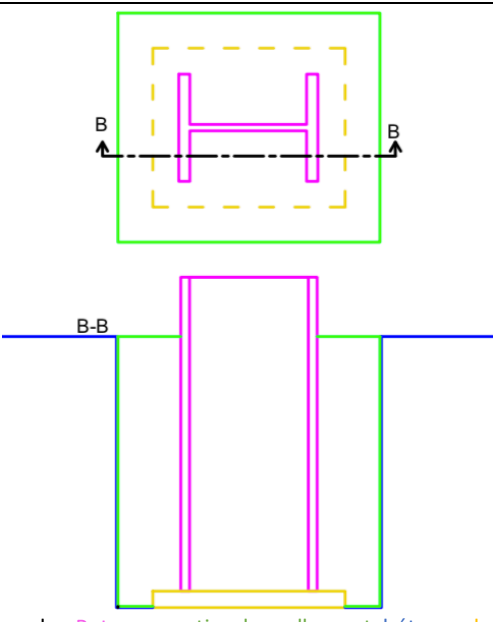
Figure 2 – Définition de l'orientation des sections en I ou H

Il faut noter que les assemblages sont « dits » articulés ou encastres. En effet, aucun assemblage n'est parfaitement rigide et donc, ne constitue un encastrement parfait. De même, il est impossible d'obtenir un assemblage parfaitement articulé. Tout assemblage articulé reprend toujours une part de moment. Toutefois, cela ne pose pas de problème pour autant que les critères de ductilité soient vérifiés. Des critères d'évaluation de la rigidité des assemblages et des conditions d'articulation existent et sont présentés dans l'Eurocode 3 partie 1-8 [6]. Ils ne seront toutefois pas vérifiés dans le cadre de ce projet.

¹ Dans la suite de ce rapport, la direction x correspond à la direction parallèle à l'axe faible de la section et la direction y à celle parallèle à l'axe fort.

On supposera que les assemblages dits encastrés, présentés dans le *Tableau 1*¹ ci-après, respectent les critères de rigidité présentés dans l’Eurocode. Néanmoins, certains sont plus rigides que d’autres. Ils sont classés dans le tableau du plus rigide au moins rigide.

Les solutions d’assemblages articulés proposées sont quant à elles classées de la solution la plus proche d’une vraie rotule à la plus éloignée.

Solutions articulées	Solutions encastrées
<p data-bbox="309 465 687 495">Solution 1-1 : Axe d’articulation</p>  <p data-bbox="229 1095 770 1153">Légende - Poteau, platine d’extrémité, tiges, plats d’articulation, axe d’articulation, plaque d’assise, béton</p>	<p data-bbox="836 450 1370 510">Solution 2-1 : Poteau fixé par tiges et platine d’extrémité</p>  <p data-bbox="858 1095 1359 1124">Légende - Poteau, platine d’extrémité, tiges, béton</p>
<p data-bbox="341 1160 655 1189">Solution 1-2 : Boîte à grain</p>  <p data-bbox="204 1812 794 1861">Légende - Poteau, platine d’extrémité, tiges, boîte à grain et grain, plaque d’assise, béton</p>	<p data-bbox="858 1160 1347 1189">Solution 2-2 : Poteau noyé dans le béton</p>  <p data-bbox="836 1812 1385 1861">Légende - Poteau, mortier de scellement, béton, cale de réglage vertical</p>

¹ La plupart des figures de ce rapport sont dessinées, sur le logiciel *AutoCad 2018*, en s’inspirant des sources bibliographiques [17] et [18].

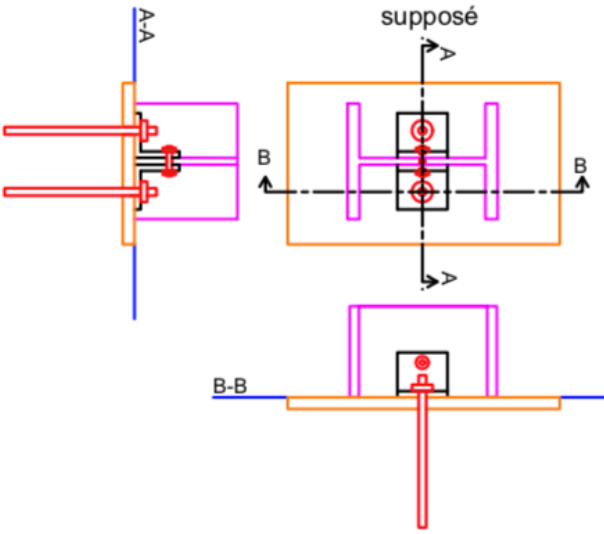
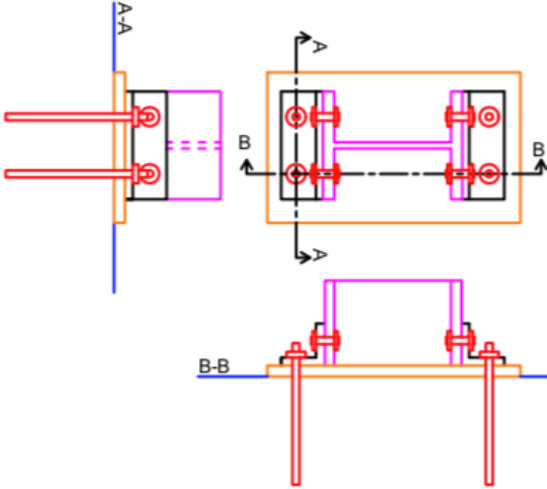
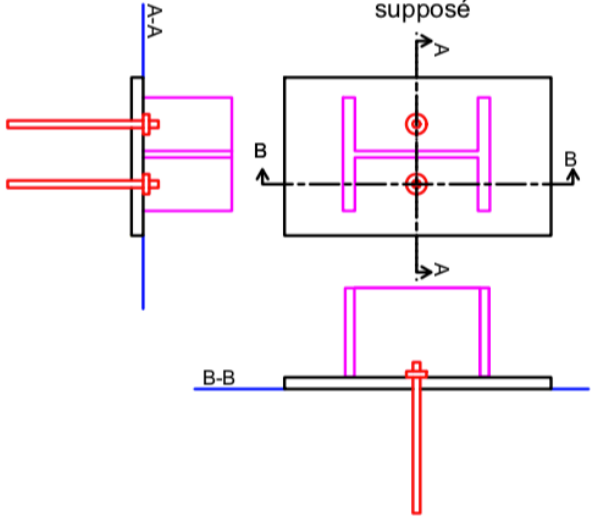
Solution 1-3 : Poteau fixé par cornières	Solution 2-3 : Poteau fixé par cornières
<p data-bbox="582 226 686 315">Axe de rotation supposé</p>  <p data-bbox="225 817 786 846">Légende - Poteau, cornières, plaque d'assise, tiges, béton</p>	 <p data-bbox="863 817 1361 880">Légende - Poteau, cornières, plaque d'assise, tiges, béton</p>
Solution 1-4 : Poteau fixé par tiges et platine d'extrémité	
<p data-bbox="582 954 686 1043">Axe de rotation supposé</p>  <p data-bbox="204 1541 810 1570">Légende - Poteau, platine d'extrémité, tiges d'ancrage, béton</p>	

Tableau 1 - Les solutions de base

2.1. Conditions d'utilisation

Le choix entre une solution articulée ou encadrée se fait généralement au cas par cas par une étude qui détermine la solution la plus avantageuse, sachant que les configurations encadrées sont souvent plus importantes et plus coûteuses. Toutefois, elles se révèlent être plus avantageuses dans trois situations.

Premièrement, ce type d'ancrage est adopté pour des structures lourdes et fortement chargées.

Deuxièmement, si les limitations sur les déplacements admissibles sont sévères, par exemple dû à la présence d'un pont roulant dans la structure, ce type d'assemblage est choisi. Celui-ci étant rigide, il empêche toute rotation et translation.

Enfin, lorsque les couches de sol de fondation sont résistantes, un assemblage encadré est de préférence mis en œuvre. Remarquons d'ailleurs que si la structure métallique repose sur une fondation en béton, les assemblages articulés ne seront pas plus économiques ; la structure en béton existant déjà, il suffira juste parfois de l'agrandir un peu.

Parmi les solutions encadrées, se retrouvent les poteaux noyés dans le béton. Cette configuration est peu utilisée et principalement adoptée pour les petits poteaux (supports de bardage, par exemple). En effet, elle nécessite d'une part la création d'une réservation lors de l'exécution de la fondation en béton (fréquemment oubliée) et donc, du mortier de scellement pour remplir la cavité, qui est onéreux. D'autre part, l'encastrement n'est effectif qu'une fois le mortier de scellement durci, donc des supports temporaires doivent être mis en place. Toutefois, cette solution bien mise en œuvre se révèle très intéressante lorsque la structure est soumise à des efforts de cisaillement alternés, apparaissant notamment lors de séismes.

La solution 2-3 n'est également utilisée que pour de petites structures (charges faibles et petites sections), en raison de la résistance limitée du système de fixation.

La solution 1-3 est similaire à cette dernière. Elle se différencie par la position des cornières, la rapprochant d'une réelle articulation. La flexibilité des cornières et la possibilité d'un déplacement relatif entre l'âme de la colonne et les cornières, autorisé par les boulons, favorisent également un comportement comparable à celui d'une rotule.

Pour des structures, avec des pieds de poteaux encadrés, plus conséquentes (importants efforts à reprendre), la solution 2-1 très simple sera adoptée. Plus les efforts à reprendre sont importants, plus le nombre de tiges augmente (voir *Section 3.2.2*).

La solution articulée 1-4 est similaire à cette solution à la différence que les tiges sont généralement au nombre de deux et situées sur l'axe équidistant entre les deux semelles.

Au contraire, lorsqu'on veut se rapprocher le plus possible d'une solution parfaitement articulée, la solution 1-2 ou encore mieux, la solution 1-1 sera adoptée. En outre, ces solutions admettent la reprise d'efforts importants (plus particulièrement d'efforts tranchants) et donc, conviennent bien pour des sections importantes, généralement fermées. Toutefois, elles sont complexes et onéreuses.

2.2. Mises en œuvre

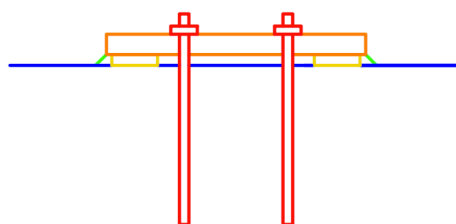
2.2.1. Tiges préscellées

Pour les différentes solutions présentées dans le *Tableau 1*, à l'exception de la solution 2-2 dont la mise en œuvre sera étudiée par après, les tiges sont généralement préscellées, c'est-à-dire qu'elles sont mises en place avant le coulage du béton. L'entièreté de la fondation est alors coulée en une seule fois. Cette méthode de préscellement permet de gagner du temps lors du montage de structures importantes et d'éviter l'utilisation de mortier sans retrait (également appelé mortier de scellement), qui est onéreux et dont les caractéristiques sont parfois méconnues.

La plaque d'assise peut également être préscellée. Elle permettra de maintenir la position des tiges. Toutefois, la planéité de cette dernière est difficile à assurer lors du coulage du béton. Ainsi, on préférera soit la mettre en place ultérieurement et régler sa position grâce à des cales et du mortier de scellement (*Figure 3*), soit effectuer un préscellement en deux phases (*Figure 4*).

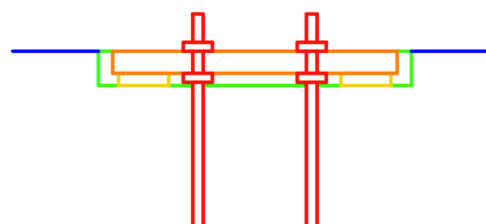
Le préscellement en deux phases consiste à noyer les tiges, maintenues par un gabarit, dans le béton sur une partie de leur hauteur. Ensuite, après durcissement de la fondation, la plaque d'assise est mise en place. Sa planéité est assurée grâce à des écrous ou des cales. Du mortier est alors bourré dans les différentes cavités. Remarquons que dans ce cas, les tiges ont une longueur libre de se déformer. Par conséquent, si elles n'ont pas été correctement positionnées et que les trous dans la plaque ne sont pas surdimensionnés, elles peuvent se déformer en flexion.

Pour les solutions 1-4 et 2-1, l'utilisation d'une plaque d'assise est également possible, et même indispensable si une bêche préscellée est utilisée (voir *Section 3.7*).



Légende - Tiges, plaque d'assise, cales de réglage, mortier de scellement, béton

Figure 3 – Mise en place de la plaque d'assise non-préscellée



Légende – Tiges, plaque d'assise, cales de réglage, mortier de scellement, béton

Figure 4 - Mise en place de la plaque d'assise en deux phases

Pour toutes les solutions, hormis celles assemblées par cornières, la platine d'extrémité est fixée en usine à la base de la colonne par des soudures d'angle sur tout le périmètre de la section. Le dimensionnement des soudures pour la transmission des efforts de compression est onéreux. De ce fait, le transfert de ce type d'efforts par contact direct entre la platine et le profilé est préféré (*Figure 5*). Les soudures sont réalisées en usine afin d'assurer les meilleures conditions possibles (précision de la position, propreté, main d'œuvre mieux qualifiée, etc.). Cependant, parfois, pour faciliter le transport, elles sont réalisées sur site.

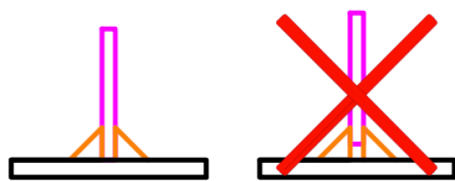
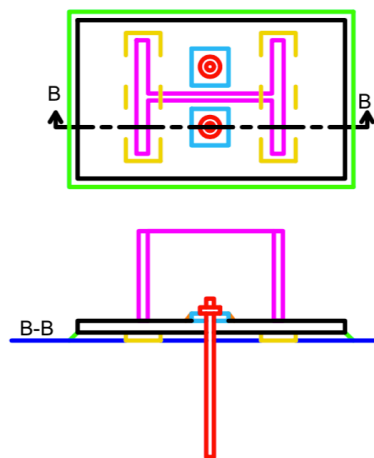


Figure 5 - Soudures entre la colonne et la platine

La platine d'extrémité et/ou la plaque d'assise non-préscellée et/ou les cornières est/sont ensuite mise(s) en place. Ces éléments sont percés pour faire passer les tiges d'ancrage. Le diamètre des trous étant supérieur de seulement 2mm à celui des boulons, il rend impossible le réglage de la position horizontale de la structure. Ainsi, le positionnement des tiges préscellées doit être soigné. L'utilisation de gabarits entre les différentes colonnes peut aider, pour autant que les colonnes ne soient pas trop éloignées (maximum 5-6m).

Dans le cas où une précision correcte des tiges ne peut pas être assurée, les trous dans les plaques, platines, cornières peuvent être surdimensionnés. Des plats percés (Figure 6) de trous non surdimensionnés sont alors soudés sur chantier sur la platine, la plaque d'assise ou les cornières. Toutefois, ces plats n'empêcheront pas la flexion des tiges lorsque celles-ci doivent transférer l'effort de cisaillement dans la plaque d'assise.

La position verticale de la structure est quant à elle réglée à l'aide de cales placées sous la platine d'extrémité dans le prolongement des semelles du profilé. Du mortier sans retrait est ensuite bourré sous la platine (Figure 6).



Légende – Poteau, platine, tiges, plats, soudures, cales, mortier de scellement, béton

Figure 6 - Mise en œuvre avec plats percés

Le tout est alors solidarisé par le serrage des écrous sur la partie filetée de la tête des boulons. Parfois, le serrage des écrous est forcé pour tenter de rattraper le défaut de planéité de la plaque/platine. Dès lors, si les boulons n'ont pas une certaine longueur libre de se déformer (soit une certaine longueur hors du béton), ils risquent de se rompre.

2.2.2. Tiges non-préscellées

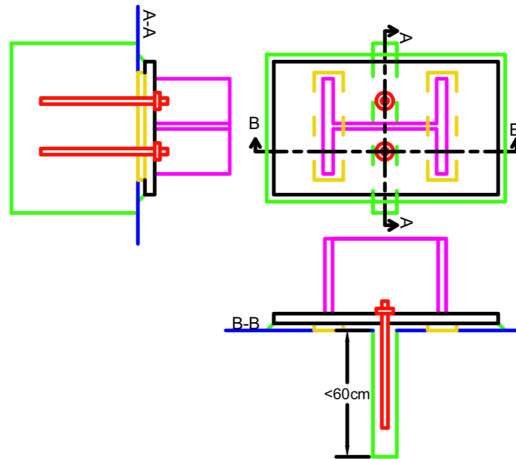
Quand les structures sont plus petites, afin de faciliter le réglage horizontal, les tiges ne sont pas préscellées. Des réservations sont réalisées à l'aide de gabarits à l'emplacement de celles-ci dans la fondation en béton (Figure 7). La profondeur de ces alvéoles (et donc la longueur des tiges dans le béton) est limitée à 60cm de manière à éventuellement retirer l'eau et les déchets accumulés.

De plus, en vue d'assurer une bonne liaison entre le béton du massif de fondation et le mortier de scellement, les parois de la réservation doivent être suffisamment rugueuses. Il existe différentes dispositions aidant à augmenter cette rugosité : l'utilisation d'un gabarit en polystyrène ou en bois donnant une surface rugueuse, le repiquage des parois de la réservation avant scellement, l'évasement vers le bas de la réservation avec disposition d'armatures transversales pour éviter l'éclatement du massif, la réalisation de trous de scellement par coffrage perdu, l'utilisation de tiges avec clé d'ancrage (voir Section 3.2), etc.

L'ensemble constitué des tiges d'ancrage, de la plaque d'assise et/ou de la platine d'extrémité et/ou des cornières et du poteau est alors positionné correctement sur le bord de la réservation. Cet ensemble s'appuie sur des cales. Ces cales sont positionnées dans le prolongement des semelles du

profilé et rendent possible le réglage de la position verticale. Ensuite, l'ensemble du système d'ancrage est solidarisé grâce au serrage des écrous. L'alvéole, prolongée au-delà de la platine, et l'espace sous la platine sont remplis de mortier sans retrait.

Ce type de mise en œuvre est réalisé avec des tiges droites ou avec des tiges à « clé d'ancrage » et dites « à tête marteau » (voir Section 3.2.1). Néanmoins, l'oubli régulier des réservations lors du coulage de la fondation limite l'usage de cette méthode.



Légende – Poteau, platine, tiges, plats, cales, mortier de scellement, béton

Figure 7 - Mise en œuvre avec tiges non-préscellées

2.2.3. Spécificités propres à chaque solution

Pour la solution 1-2, le positionnement horizontal des tiges est encore plus important puisque la boîte à grain et le grain sont préalablement soudés respectivement à la plaque d'assise et à la platine d'extrémité. De plus, un grand soin doit être apporté au façonnage du grain.

De la même façon que pour la solution 1-2 pour la configuration 1-1, le positionnement horizontal précis des tiges est d'autant plus important que les plats d'articulation sont préalablement soudés à la plaque d'assise et à la platine d'extrémité et que l'axe d'articulation doit passer au travers de ces deux éléments. La mise en place de l'axe d'articulation doit être soignée et est complexe.

Pour les solutions 1-3 et 2-3, la colonne n'est pas soudée à la plaque d'assise. Sa base doit être bien plane étant donné que l'effort de compression est transmis uniquement par contact direct entre celle-ci et la plaque d'assise.

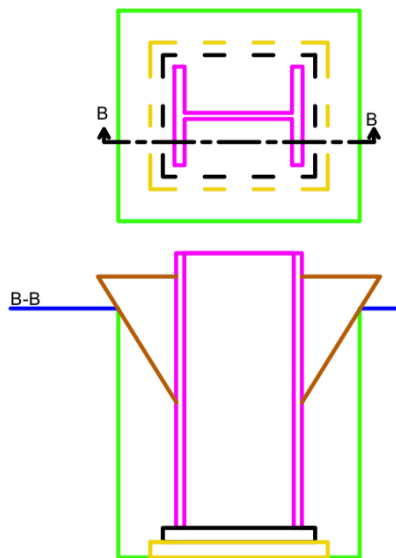
La colonne est fixée à la plaque d'assise par l'intermédiaire de cornières. Ces cornières sont boulonnées à la fois à la plaque et au poteau. Une variante pourrait être de souder les cornières au poteau. Toutefois, les efforts transmis seraient encore plus faibles, le dimensionnement des soudures étant onéreux.

Pour la solution 2-2, la méthode de mise en œuvre est différente. Lors du coulage de la fondation, des réservations sont réalisées à l'aide de gabarit à l'emplacement des colonnes. Pour les mêmes raisons que précédemment, la profondeur de ces alvéoles est limitée à 60cm et les parois doivent être rugueuses. Remarquons cependant, que pour que l'encastrement soit effectif, la profondeur d'encastrement doit être supérieure à 1,5 fois la hauteur du profilé.

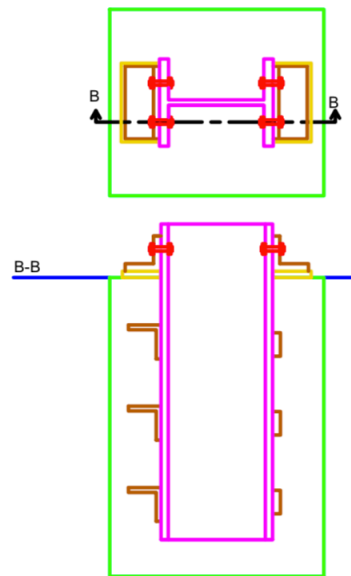
Une cale métallique est disposée dans le fond de la réservation. Elle permet le réglage vertical de la colonne et aussi, d'obtenir une surface d'appui plane et résistante. La colonne préalablement soudée ou non à une platine d'extrémité est placée dans le fond de la réservation. Une fois la position horizontale bloquée à l'aide de coins en bois (Figure 8), le mortier de scellement est coulé.

Lorsque la profondeur d'encastrement dépasse 60cm, le fond de la réservation n'est plus accessible. Le réglage en hauteur de la colonne est, dans ce cas, réalisé à l'aide de cales disposées sur le bord de la cavité et sur lesquelles s'appuient des cornières ou profilés en U. Ces éléments sont soudés sur les semelles de la colonne à un niveau supérieur à celui de la surface de béton (Figure 9).

Quelle que soit la méthode de mise en oeuvre, les efforts normaux sont transmis soit par la platine d'extrémité soit, par des connecteurs (plats, cornières, ronds, etc.) fixés par des soudures à différents niveaux des semelles de la colonne (Figure 9). Toutefois, l'encastrement n'est effectif que lorsque le mortier de scellement a durci. Dès lors, la stabilité de la structure est assurée temporairement par des dispositifs provisoires. L'utilisation de cette solution est donc limitée à des petits poteaux.



Légende – Poteau, platine d'extrémité, cale (réglage vertical), cales (réglage horizontal), mortier de scellement, béton de fondation
 Figure 8 – Encastrement peu profond et réglage horizontal par cales en bois



Légende – Poteau, boulons, cornières ou plats, cales, mortier de scellement, béton de fondation
 Figure 9 - Encastrement profond et transmission des efforts normaux

3. Variantes

Les solutions présentées au point 1 sont dites de « base ». En fonction des efforts à transmettre, diverses améliorations sont possibles. Le *Tableau 2* indique pour quelles solutions du *Tableau 1* les différentes variantes proposées ci-après sont couramment employées.

	Fondation béton	Tiges d'ancrage	Section du profilé	Forme de la platine	Raidisseurs de platine	Raidisseurs d'âme	Châssis	Bêches
Solution 1-1	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓
Solution 1-2	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✓
Solution 1-3	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓
Solution 1-4	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✓
Solution 2-1	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Solution 2-2	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Solution 2-3	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✓

Tableau 2 - Variantes applicables en fonction de la solution de base considérée

3.1. Fondation en béton

Les dimensions de la fondation en béton sont variables. Si c'est un socle, ses dimensions sont limitées, c'est-à-dire que les dimensions en plan (L et l) sont proches de celles de la platine. C'est souvent le cas pour des colonnes isolées.

Lorsque différentes colonnes sont alignées et proches, la fondation est constituée de plusieurs socles juxtaposés, formant ainsi un élément en béton similaire à une longrine, de dimensions l finie et L pouvant être considérée infinie (ou inversement).

Enfin, l'ensemble de la charpente métallique repose parfois sur un radier général avec les dimensions L et l considérées infinies. Dans ce cas, il arrive que la colonne soit construite sur une rehausse afin de la protéger (voir *Chapitre 5*).

La hauteur H de la fondation est également variable.

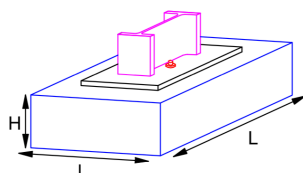


Figure 10 – Dimensions de la fondation en béton

3.2. Tiges d'ancrage

Une tige d'ancrage est composée d'un boulon noyé dans le béton et d'une tête filetée hors du béton sur laquelle se fixe un écrou. Cet écrou maintient la tige dans sa position au contact de l'élément en acier sur lequel repose l'écrou, si les trous sont surdimensionnés. Une tige sert principalement à la reprise des efforts de traction et éventuellement à ceux de cisaillement.

3.2.1. Types de tiges

Pour toutes les solutions hormis la 2-2, différents types de tiges (voir *Figure 11* à *Figure 17* ci-après) peuvent être utilisés en fonction de l'effort de traction à transmettre et du moyen de mise en œuvre de l'assemblage.

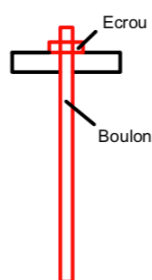


Figure 11 - Tige droite

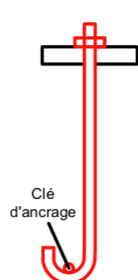


Figure 12 - Tige recourbée



Figure 13 - Tige avec contre-courbure



Figure 14 - Tige en queue de carpe

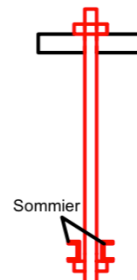


Figure 15 - Tige à tête marteau

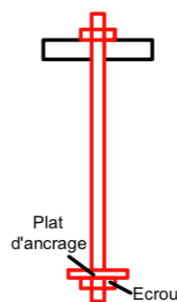


Figure 16 - Tige avec plat

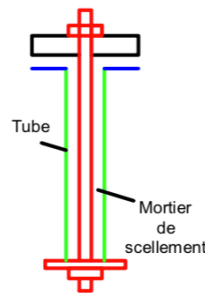


Figure 17 - Tige avec plat et gaine

La solution la plus basique est celle d'une tige droite (*Figure 11*). Celle-ci est néanmoins peu utilisée. En effet, d'une part, elle ne permet pas le blocage de la structure en phase de construction, si elle n'est pas préscellée et d'autre part, seuls de faibles efforts de traction pourront être transmis.

Les tiges à queue de carpe sont également peu utilisées pour les mêmes raisons. L'avantage de cette géométrie est que les écrous sont serrés sans provoquer de torsion dans les boulons.

Pour pallier aux inconvénients de ces deux premières géométries, des tiges recourbées ou à contre-courbure sont employées. La contre-courbure fait coïncider le centre de la courbure avec l'axe de la tige.

Ces deux types de tiges permettent le transfert d'un effort de traction plus important, grâce à la clé d'ancrage assurant une bonne liaison entre le mortier de scellement et le massif de fondation. Cette clé, consistant en une barre horizontale, doit donc être soigneusement dimensionnée et mise en œuvre lors du coulage de la fondation. Si la tige n'est pas préscellée, lors du montage, elle s'accroche sur la clé d'ancrage (toujours préscellée) et est serrée contre la platine grâce à un écrou.

Pour un même effort, la ruine de l'assemblage par perte d'adhérence des tiges est moins susceptible d'apparaître avec ce type de fixation. En effet, cette solution bloque efficacement la structure, même en phase de montage.

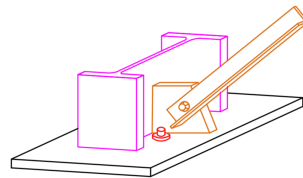
La solution avec plat boulonné ou soudé sur la tige droite (*Figure 16*) peut notamment être adoptée lorsque la clé d'ancrage risque d'être oubliée lors du bétonnage de la fondation. Cette solution offre également les avantages de transmettre des efforts de traction très importants et d'assurer le blocage de la charpente lors du montage. Les efforts de traction repris seront plus élevés que pour les configurations précédentes grâce, entre autres, au plat mobilisant un cône de béton plus important. Cette géométrie présente toutefois l'inconvénient d'être obligatoirement préscellée.

Sur le plat, un tube entourant le boulon peut être soudé (*Figure 17*). Dès lors, la tige n'est pas directement complètement noyée dans le béton, ce qui peut offrir deux avantages principaux. Premièrement, le défaut de positionnement des tiges peut être repris sans surdimensionner les trous dans la platine, par flexion des tiges (seulement possible sous certaines conditions à respecter). Deuxièmement, la longueur de précontrainte des tiges est augmentée.

Les tiges à tête marteau (*Figure 15*) s'accrochent sur un « sommier » constitué de deux barres en U encastrées dans le béton, de la même façon et offrant les mêmes atouts que les clés d'ancrage. Cette configuration permet également de reprendre des efforts de traction très importants.

3.2.2. Nombre de tiges

Pour les assemblages articulés, les tiges sont en général au nombre de deux et placées sur l'axe équidistant entre les semelles. Une exception existe toutefois. Lorsqu'un élément du système de stabilité (par exemple, une barre de contreventement) se fixe au niveau du pied de poteau (*Figure 18*), deux tiges sont placées de chaque côté de l'assemblage, de part et d'autre de cet élément.



Légende – Poteau, tiges, platine, contreventement
Figure 18 - Pied de poteau avec contreventement

Pour les assemblages encastés tels que les solutions 2-1 et 2-3, le nombre de tiges peut varier (2, 4, 8 tiges ou plus) suivant l'importance des efforts à reprendre. Sur la *Figure 19* à la *Figure 22*, des exemples sont présentés pour la solution 2-1. La disposition des tiges est également variable. Toutefois, plus celles-ci sont éloignées de l'axe de rotation de la section, meilleure est la reprise du moment. Par exemple, pour un moment M_y (autour de l'axe y), la configuration présentée à la *Figure 21* est plus efficace que celle de la *Figure 22*. Cette dernière solution présente néanmoins l'avantage d'équilibrer symétriquement l'effort de traction transmis par la semelle tendue, évitant ainsi toute flexion de cette semelle. Lorsque la colonne est soumise à une flexion bi-axiale, il peut être nécessaire d'utiliser des boulons d'ancrage le long des quatre bords de la platine d'extrémité (*Figure 20*).

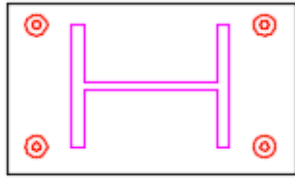


Figure 19 - Solution 2-1 avec 4 tiges d'ancrage

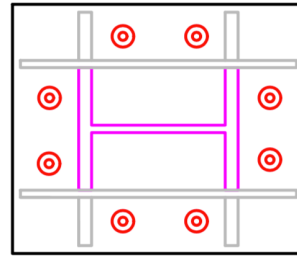


Figure 20 - Solution 2-1 avec 8 tiges d'ancrage et des raidisseurs

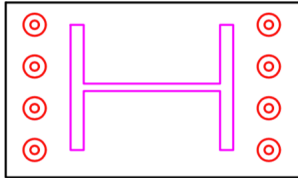


Figure 21 - Solution 2-1 avec 8 tiges extérieures

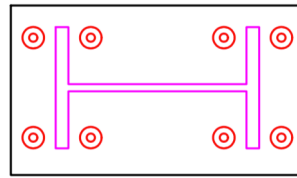


Figure 22 - Solution 2-1 avec 4 tiges extérieures et 4 intérieures

3.3. Section du profilé

Les solutions articulées 1-1 et 1-2, supportant des efforts importants, sont principalement utilisées avec des sections fermées carrées ou circulaires. La solution articulée 1-3 peut également être employée avec ce type de profilé. Dans ces cas, la disposition des tiges est telle que présentée à Figure 23 et à la Figure 24.

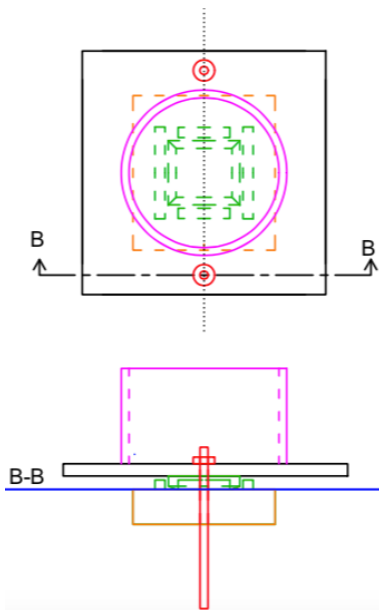


Figure 23 – Colonne articulée à section circulaire

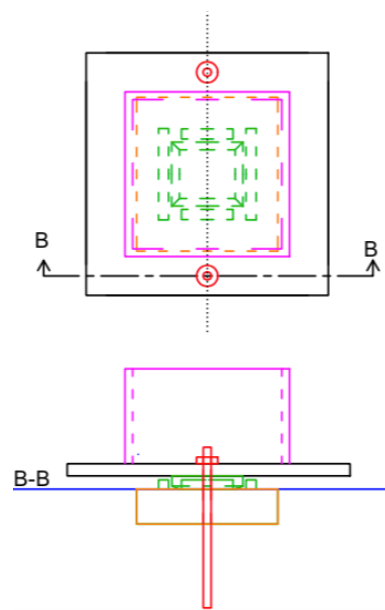


Figure 24 - Colonne articulée à section carrée

Remarquons que cette disposition réalise un encastrement dans une direction pour les solutions dites articulées. La disposition avec un profilé en I ou H, comme présentée dans le *Tableau 1*, constitue également un encastrement dans une direction. Toutefois, le moment M_x (autour de l'axe x) pouvant être repris est faible, les tiges étant proches de l'axe de rotation.

Sans raidisseur ni châssis (voir *Sections 3.5.1* et *3.6* de ce chapitre), la meilleure disposition des tiges avec une section carrée pour la solution encastree 2-1 est présentée à la *Figure 25*. Bien que le

positionnement des tiges de la *Figure 26* soit plus efficace pour la reprise d'un moment, si les efforts de traction sont importants, les tiges risquent de produire des concentrations de contraintes inadmissibles dans les soudures situées près des angles du tube et dans les coins de la platine.

Pour les sections circulaires, des dispositions identiques seront adoptées et comme précédemment, en fonction des efforts à transmettre, le nombre de tiges varie.

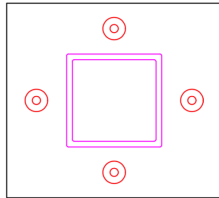


Figure 25 - Section carrée avec 4 tiges sur les côtés

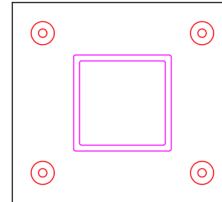


Figure 26 - Section carrée avec 4 tiges dans les coins

Un avantage de ces types de section est d'être doublement symétriques. Cela peut être intéressant lorsque des efforts importants sont à reprendre dans les deux directions principales de l'assemblage. Dans le cas d'une section carrée, si le moment est nettement plus important dans une des directions, une section rectangulaire sera adoptée.

3.4. Forme de la platine

Pour les colonnes à section circulaire, si les efforts à transmettre nécessitent un nombre important de tiges, la platine est parfois circulaire (*Figure 27*). Si, en plus, le diamètre du tube est considérable et qu'à l'intérieur, il peut être intéressant de faire passer des gaines techniques, une platine annulaire (*Figure 28*) est alors utilisée avec de nombreuses tiges (16, 20, etc.). Dans ce cas, des tiges seront, si possible, placées de part et d'autre de la paroi du tube afin d'éviter la flexion locale de celle-ci. La découpe de ces genres de platine est onéreuse.

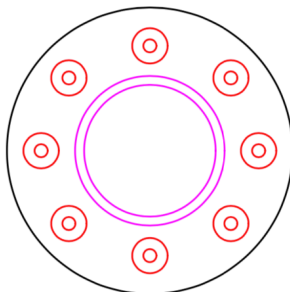


Figure 27 - Platine circulaire

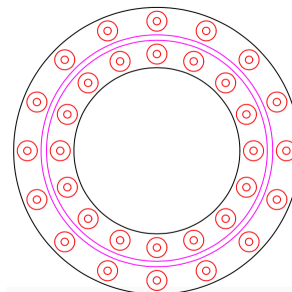


Figure 28 - Platine annulaire

3.5. Raidisseurs

Un raidisseur est un plat en acier qui permet de renforcer, raidir un assemblage. Pour un pied de poteau, on distingue deux types principaux de raidisseurs : les raidisseurs de platine et les raidisseurs d'âme.

3.5.1. Raidisseurs de platine

Ce type de raidisseurs est utilisé dans différentes situations. Premièrement, il permet d'amincir la platine lorsque les calculs mènent à une platine épaisse par rapport aux épaisseurs des parois du profilé de la colonne, qui rend alors les soudures difficiles à réaliser.

Deuxièmement, pour une solution encadrée, un moment de flexion important peut mener à une longue platine dans la direction de celui-ci. Ainsi, cette platine doit être raidie. Dans ce cas, les raidisseurs transmettent les efforts de traction aux tiges.

Cependant, l'utilisation des raidisseurs est limitée. Ceux-ci sont coûteux et nécessitent de nombreuses soudures supplémentaires.

Afin d'éviter le voilement local de leur bord libre, les raidisseurs sont rigidement assemblés sur la colonne et leur épaisseur est supérieure à un $1/25^e$ de la longueur de ce bord libre. De plus, leurs angles sont coupés (Figure 30). En effet, les cordons de soudure doivent contourner la tranche des raidisseurs.

Les raidisseurs de platine peuvent être aussi bien utilisés avec des sections ouvertes que fermées, toutefois, leur disposition varie. Les différentes configurations possibles sont également à adapter à la solution de base considérée. Par exemple, pour la solution 1-3, il est impossible de mettre en place la disposition des raidisseurs présentée à la Figure 31.

Sections ouvertes

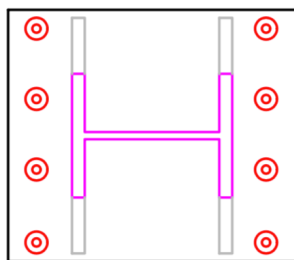


Figure 29 - Raidisseurs dans le prolongement des semelles

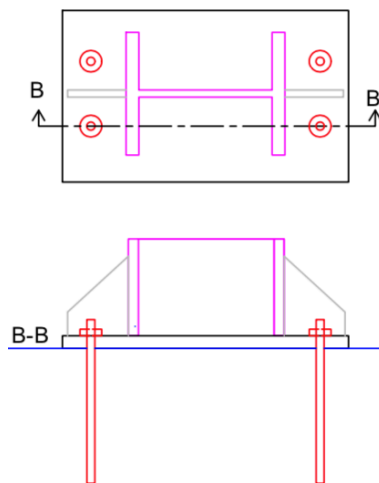


Figure 30 - Raidisseurs dans le prolongement de l'âme

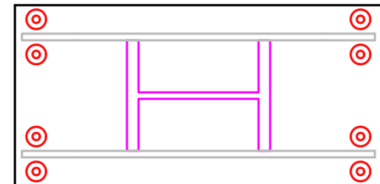


Figure 31 – Raidisseurs aux extrémités des semelles

Si les efforts restent faibles, la solution la plus courante et la plus économique consiste à placer des raidisseurs dans le prolongement de l'âme (Figure 30). En outre, cette disposition permet le serrage aisé des écrous.

Toutefois, si les efforts deviennent importants et nécessitent un plus grand nombre de tiges, cette disposition n'est pas optimale. En effet, si quatre tiges sont placées à chaque extrémité de la section (comme à la Figure 29), les tiges centrales, pour des raisons de comportement mécanique d'ensemble, reprendront des efforts plus importants.

Afin de pallier à ce problème, la solution de la Figure 29 est adoptée. Cette dernière permet en outre de respecter l'espacement exigé entre les boulons, grâce au positionnement des tiges au-delà des lignes joignant les extrémités des semelles. Sans raidisseur dans le prolongement des semelles, ce positionnement risque de provoquer des concentrations de contraintes dans les soudures. Pour cette même raison, l'axe des tiges ne dépassera pas les lignes joignant les extrémités des raidisseurs.

Cette configuration permet de remédier à un autre inconvénient de la solution précédente, pour laquelle si l'épaisseur des raidisseurs est vraiment plus grande que celle de l'âme de profilé de la colonne, les semelles sont fendues et une partie de l'âme est retirée afin d'y faire passer les raidisseurs.

La disposition proposée à la *Figure 31*, quelle que soit l'épaisseur des raidisseurs, ne demande pas non plus de fendre les semelles. Cette configuration est cependant peu courante et plus coûteuse. En effet, les soudures sont nombreuses et parfois difficiles à mettre en œuvre, notamment au niveau de la liaison avec les semelles (double cordon d'angle) et sur le tronçon (soudures moins importantes) entre les deux semelles.

De plus, le serrage des écrous est difficile et la position des raidisseurs crée des cavités entre les semelles. De l'eau risque donc de s'y accumuler provoquant notamment des problèmes de corrosion. Ainsi, soit, ce volume est fermé par un plat horizontal soudé soit, le pied de poteau est en phase définitive complètement noyé dans le béton soit, un trou est percé en bas des raidisseurs permettant à l'eau de s'écouler. Toutefois, au fil du temps, ce trou risque d'être obstrué par toutes sortes de déchets.

Cette solution est néanmoins utilisée lorsque le moment de flexion M_y est important et qu'il nécessite une platine de grande longueur. Dans ce cas, l'effort de traction est transmis aux quatre tiges situées à chaque extrémité de l'assemblage par les raidisseurs. Une variante possible de cette disposition consiste à placer uniquement deux tiges entre les raidisseurs de chaque côté de l'assemblage.

Afin de réaliser un bon encastrement dans les deux directions pour un assemblage soumis à de la flexion bi-axiale, il est intéressant de placer des tiges dans les quatre coins de la platine et éventuellement, le long des quatre bords. Elles seront ainsi éloignées des deux axes principaux de la section. Pour cela, la solution présentée à la *Figure 20* sera adoptée avec 4, 8 ou 12 boulons.

Sections fermées

Les dispositions des raidisseurs pour les sections fermées sont analogues à celles présentées pour les sections ouvertes. Elles sont présentées ci-dessous de la *Figure 32* à la *Figure 37* pour une section carrée. Toutefois, elles sont, pour la plupart, applicables à une section circulaire.

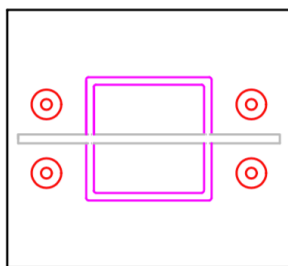


Figure 32 - Section carrée avec platine simplement raidie

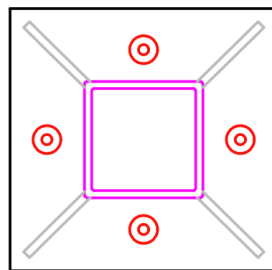


Figure 33 - Section carrée avec raidisseurs diagonaux

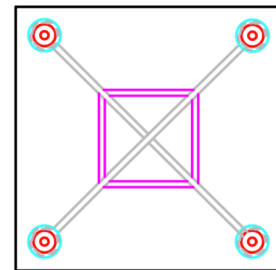


Figure 34 - Section carrée avec raidisseurs diagonaux et tubes soudés

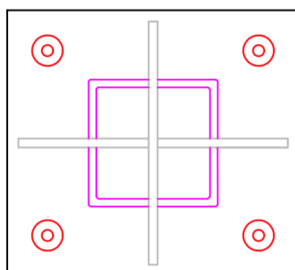


Figure 35 - Section carrée avec raidisseurs parallèles aux bords de la platine

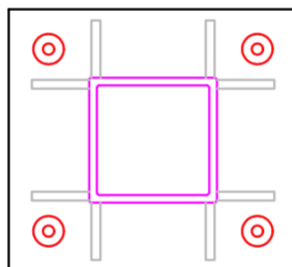


Figure 36 - Section carrée avec doubles raidisseurs parallèles aux bords de la platine

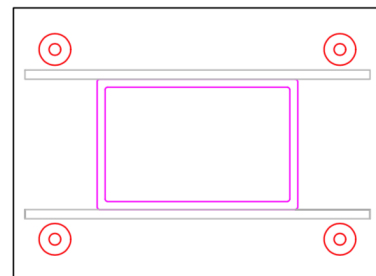


Figure 37 - Section rectangulaire avec raidisseurs parallèles aux bords de la platine

La solution la plus simple et la plus économique, présentée à la *Figure 32*, est similaire à la disposition de la *Figure 30* pour les sections ouvertes. Elle est généralement utilisée pour des moments importants

dans une direction, tout comme la configuration proposée à la *Figure 37*. Cette dernière est analogue à celle pour une section fermée avec des raidisseurs placés aux extrémités des semelles.

Pour des moments importants dans les deux directions principales, les autres solutions sont employées. Pour des tiges placées aux quatre coins de la platine, la solution avec des raidisseurs parallèles au bord de la platine (*Figure 35*) est moins efficace que celle avec des raidisseurs en angle (*Figure 36*), qui peuvent être soit deux plats soudés à chaque angle, soit des cornières. Ces configurations ne permettent néanmoins pas d'éviter les concentrations de contraintes dans les coins de la platine et dans les soudures d'angle en cas d'efforts de traction importants. Afin d'éviter ces concentrations de contraintes, la solution de la *Figure 34* sera préférée. L'effort de traction est transmis des raidisseurs aux tubes, soudés à un plat horizontal et puis enfin aux tiges.

Autant que possible, les raidisseurs sont prolongés à l'intérieur de la section du profilé afin de protéger cette dernière d'un éventuel poinçonnement au niveau de l'extrémité supérieure du raidisseur. De plus, on veillera à ne pas souder les raidisseurs trop près des arêtes d'une section carrée formée à froid, le métal étant écroui dans cette zone.

Lorsque la platine est circulaire, dans beaucoup de cas, les calculs conduisent à une grande épaisseur de la platine par rapport à celle de la paroi du profilé. Ainsi, des raidisseurs triangulaires (*Figure 38*) sont mis en place. Toutefois, ceux-ci risquent de poinçonner le tube à leur extrémité supérieure. Ils sont donc soit, prolongés à l'intérieur du tube soit, chapeautés d'une ceinture de répartition (également appelée anneau de compression). Dans cette configuration (*Figure 38*), les écrous sont difficiles à serrer. Pour pallier à cela mais également pour faciliter la transmission des efforts, les tiges sont placées en pied de raidisseurs (*Figure 39*). Dans ce cas, afin d'éviter des concentrations de contraintes, des tubes soudés sont alors mis en place (solution similaire à celle de la *Figure 34*).

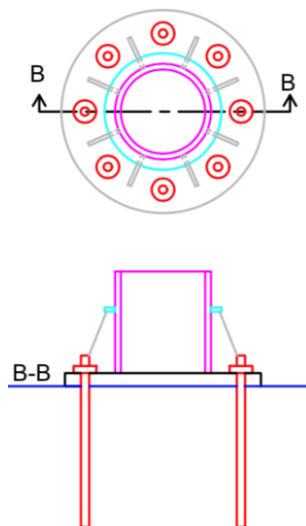


Figure 38 - Platine circulaire avec raidisseurs et anneau de compression

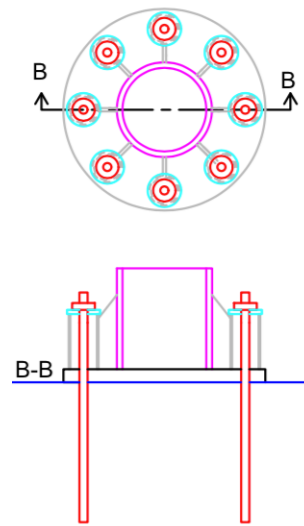


Figure 39 - Platine circulaire avec raidisseurs et tubes soudés

3.5.2. Raidisseurs d'âme

Les raidisseurs d'âme consistent en des plats métalliques soudés à la section (*Figure 40 à Figure 42*) ou en une augmentation de l'épaisseur de l'âme du profilé de la colonne (*Figure 43*).

Sous des efforts de compression et de cisaillement élevés, des déformations hors plan sont susceptibles de se produire (flambement local). Ainsi, les raidisseurs d'âme améliorent la capacité en charge de l'âme (surtout pour des charges localisées) en la rigidifiant.

Ce flambement local se produit lorsqu'une section transversale est suffisamment élancée et non retenue. Il n'a pas lieu dans les semelles, l'âme servant de raidisseur pour ces dernières.

Ce type de raidisseurs est principalement utilisé avec les solutions à axe d'articulation et avec boîte à grain. En effet, pour ces deux configurations, les efforts de compression et de cisaillement sont directement transmis de l'âme, respectivement, aux plats d'articulation et au grain. Ainsi, la portion d'âme située juste au-dessus de ces éléments subit une concentration de contraintes.

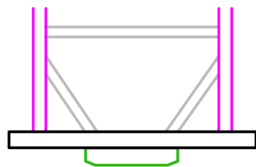


Figure 40 - Raidisseurs d'âme inclinés

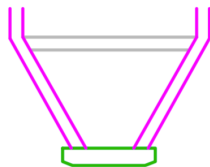


Figure 41 - Raidisseurs d'âme inclinés avec réduction de la section du profilé

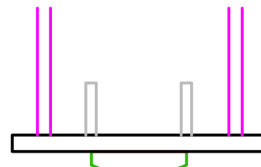


Figure 42 - Raidisseurs d'âme verticaux

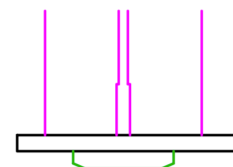


Figure 43 - Âme renforcée

Les deux solutions de raidisseurs inclinés sont dimensionnées de la même façon. La disposition de la *Figure 41* sera plutôt utilisée pour de grandes sections (hauteur du profilé supérieure à 500mm). Les raidisseurs sont, généralement, inclinés à 60° et de façon à arriver au bord du grain. Ils reprennent avec la portion d'âme entre eux l'effort normal dans le poteau.

Dans la configuration de la *Figure 42*, les efforts sont transmis des semelles de la colonne aux raidisseurs verticaux et à la portion d'âme entre eux par cisaillement de cette dernière. La longueur de ces éléments verticaux est donc notamment choisie de façon à ce que l'âme résiste à ce cisaillement local.

3.6. Châssis

Comme vu précédemment, afin d'avoir une épaisseur de platine acceptable, des raidisseurs sont mis en place au besoin. Pour la solution 2-1, si les moments sont vraiment très importants, le raidissage de la platine n'est plus suffisant. Les solutions de fixation de poteau par châssis deviennent alors intéressantes.

Un châssis est constitué de plats verticaux au-dessus desquels se trouvent des plats horizontaux. Les écrous s'appuient sur les éléments horizontaux, ce qui facilite leur serrage.

Les tiges sont ainsi prolongées au-dessus de la surface du béton. Elles possèdent une longueur libre, leur laissant une capacité de déformation importante avant rupture. Les tiges peuvent donc se déformer plastiquement. Cette capacité de déformation est particulièrement intéressante dans trois cas de figure.

Premièrement, comme mentionné précédemment, quand les tiges sont préscellées, il faut parfois, lors du serrage des écrous, rattraper le défaut de planéité de la plaque d'assise, provoquant ainsi la déformation des tiges.

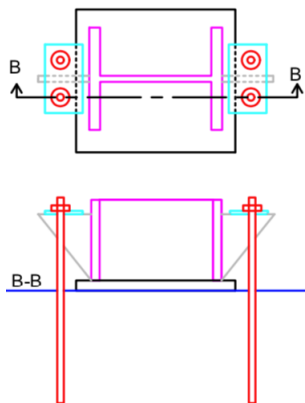
Deuxièmement, la longueur de précontrainte de la tige est augmentée.

Enfin, généralement, ce type de système de fixation étant très rigide, quelle que soit la disposition des tiges, l'effort de traction repris par chacune d'elles est sensiblement identique. Toutefois, il arrive, en raison, par exemple d'un défaut de mise en œuvre, que certaines tiges soient plus sollicitées que d'autres. Le domaine de déformations plastiques pouvant être atteint, il y aura une redistribution plastique des efforts, augmentant ainsi la capacité en charge de l'assemblage.

Les plats verticaux sont analogues aux raidisseurs présentés dans la *Section 3.5.1*. D'ailleurs, les possibilités de dispositions sont similaires. Quelques exemples de systèmes fixés par châssis sont

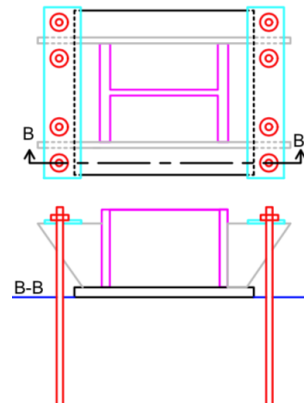
présentés sur les schémas de la *Figure 44* à la *Figure 49*. Les solutions sont exposées pour une section en I ou en H mais elles sont applicables à une section carrée ou rectangulaire.

Les plats horizontaux peuvent ou non être soudés aux raidisseurs. S'ils ne le sont pas, les tiges sont positionnées de part et d'autre des raidisseurs pour les maintenir en position (*Figure 44* et *Figure 45*). Plus les tiges sont placées près des plats verticaux, plus la flexion du plat horizontal est limitée et donc plus le système est rigide. Toutefois, pour la configuration de la *Figure 44*, le plat risque de glisser si la mise en œuvre n'est pas soignée.



Légende – Colonne, platine, tiges, raidisseurs, plats, béton

Figure 44 - Châssis avec raidisseurs dans le prolongement de l'âme

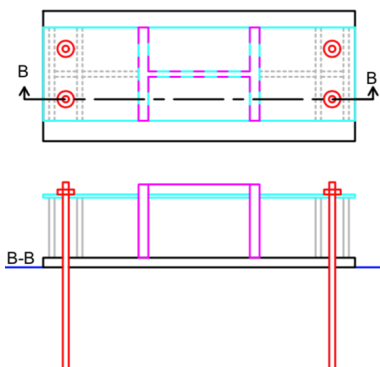


Légende – Colonne, platine, tiges, raidisseurs, plats, béton

Figure 45 - Châssis avec raidisseurs dans le prolongement des semelles

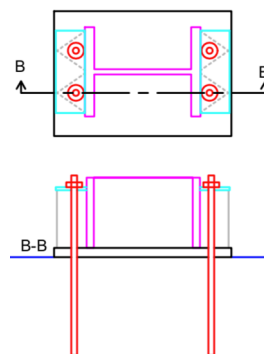
Lorsque le moment de flexion est vraiment très important dans une direction, comme suggéré dans la section consacrée aux raidisseurs, la platine peut être allongée. Dans ce cas, le châssis constitue une sorte de poutre horizontale et peut être avantageusement remplacé par une portion de poutre en U, I ou H. En effet, dans ce cas de figure, les plats horizontaux et la platine constituent les semelles d'une poutre et le ou les raidisseur(s) parallèle(s) à l'âme de la colonne, l'âme ou les âmes de cette poutre. Les tiges sont généralement entourées de raidisseurs verticaux.

Les plats verticaux sont parfois remplacés par des cornières ou des demi-tubes soudés au poteau (*Figure 47*). Les soudures sont alors continues avec celles fixant le plat supérieur et étanches afin d'éviter l'accumulation d'eau dans la cavité créée par la cornière. Cette solution possède l'avantage d'être peu encombrante. Toutefois, elle est onéreuse et vu la difficulté de mise en œuvre (une cornière par tige, donc beaucoup de soudures), elle n'est utilisée que pour des sollicitations de moyenne importance.



Légende – Colonne, platine, tiges, raidisseurs, plats, béton

Figure 46 - Châssis constituant une poutre

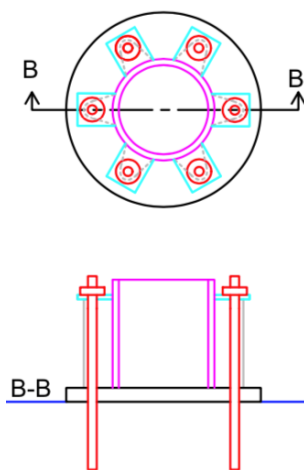


Légende – Colonne, platine, tiges, raidisseurs, plats, béton

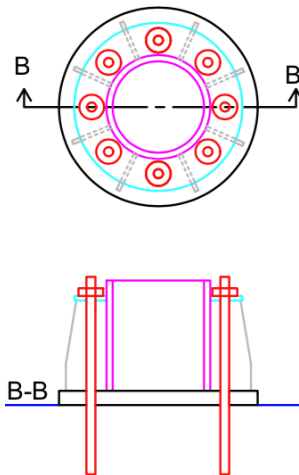
Figure 47 - Châssis avec cornières

Le diamètre des sections circulaires soumises à des moments importants étant grand, on adoptera souvent une platine circulaire. Une solution de châssis pour les sections circulaires avec platine carrée est toutefois proposée à la *Figure 34*. La *Figure 48* et la *Figure 49* illustrent des configurations avec platine circulaire.

Rappelons que comme les raidisseurs d'une platine circulaire risquent de poinçonner le tube, une ceinture circulaire est placée en tête de ceux-ci (*Figure 38*). Sur la *Figure 49*, une disposition analogue est retrouvée avec cette fois, les écrous fixés sur cette ceinture. La configuration de la *Figure 48* est également similaire, la différence est que dans ce cas, la ceinture est discontinue.



Légende – Colonne, platine, tiges, raidisseurs, plats, béton
Figure 48 - Section circulaire avec châssis discontinu



Légende – Colonne, platine, tiges, raidisseurs, plats, béton
Figure 49 - Section circulaire avec châssis continu

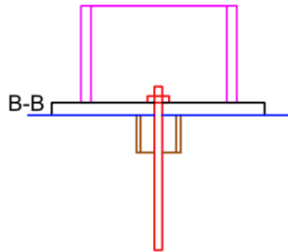
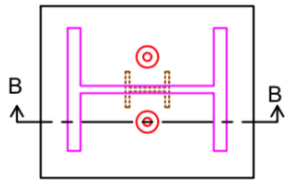
3.7. Bêches

Si l'assemblage boulonné est soumis à un effort de compression, il résiste à l'effort de cisaillement, dans un premier temps, par frottement entre la platine et le béton. Dans un second temps, lorsque toute la charge ne peut pas être reprise de cette façon ou lorsque l'effort axial est nul ou de traction, deux solutions existent soit, les tiges résistent par cisaillement (seulement pour de très faibles efforts) soit, une bêche noyée dans le béton sous la platine transmet l'effort par butée contre le béton.

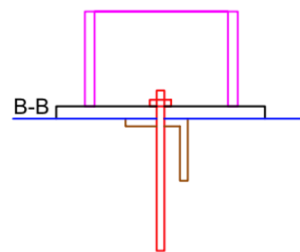
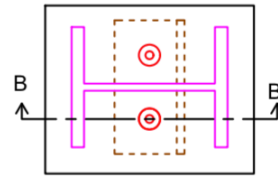
Il existe deux grandes familles principales de bêches : les bêches en I ou en H (*Figure 50*) et les bêches en cornières (*Figure 51*).

Les cornières sont utilisées lorsque le reliquat d'effort tranchant à transmettre est faible. Elles sont positionnées sous la platine de façon à ce que l'aile verticale soit décalée par rapport à l'axe fort du profilé de la colonne et qu'elle n'interfère pas avec les tiges. Les tiges peuvent ou non traverser la partie horizontale de la cornière. Généralement, la plus petite aile est soudée à la platine. L'orientation de la cornière sur la *Figure 51* est efficace pour un effort tranchant dirigé dans la direction x .

Les bêches formées d'un tronçon de profilé laminé à chaud en I ou en H sont soudées sous la platine ou sous la plaque d'assise soit, parallèlement soit, perpendiculairement à la colonne, suivant la direction de l'effort tranchant le plus important. La hauteur du profilé de la bêche sera faible par rapport à celle de la colonne afin de ne pas créer un encastrement.

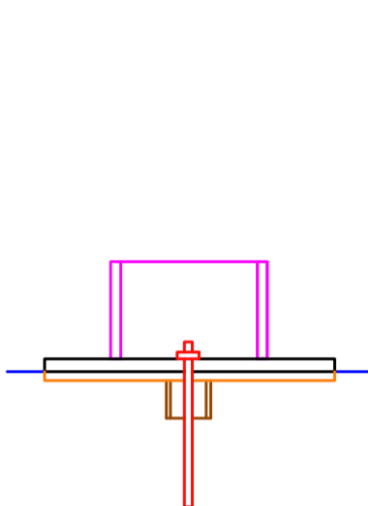


Légende - Colonne, platine, tiges, bêche, béton
Figure 50 - Bêche en I ou H

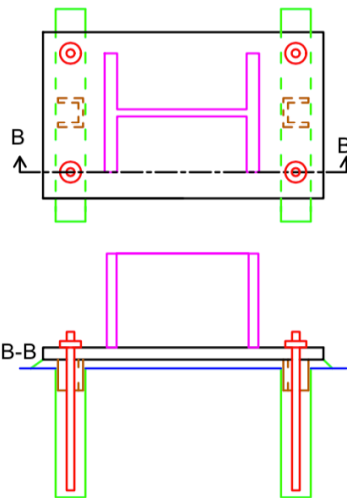


Légende - Colonne, platine, tiges, bêche, béton
Figure 51 - Bêche en cornière

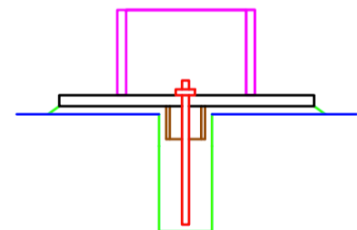
Deux méthodes principales de mise en œuvre sont distinguées. Elles se différencient par leur origine : la méthode française (Figure 52) et la méthode belge (Figure 54).



Légende - Colonne, platine d'extrémité, plaque d'assise, bêche, tiges, béton
Figure 52 - Bêche : méthode française



Légende - Colonne, platine, bêches, tiges, mortier de scellement, béton
Figure 53 - Double bêche : méthode belge



Légende - Colonne, platine, bêche, tiges, mortier de scellement, béton
Figure 54 - Bêche : méthode belge

Dans la méthode française, la bêche est préscellée avec la plaque d'assise. Le problème est que le béton est parfois très visqueux et composé de gros granulats. Ainsi, il ne se répartit pas toujours correctement tout autour de la bêche. L'adhérence entre le béton et la bêche est donc mauvaise ce qui n'est pas efficace pour la transmission des efforts.

La méthode propose de pallier à cela en soudant la platine sur le béton. Toutefois, les tolérances d'exécution du béton étant d'environ 2cm, la plaque d'assise n'est pas toujours mise en œuvre parfaitement horizontalement. Les tolérances d'exécution de l'acier n'étant elles que de 2mm, il devient alors difficile d'effectuer cette soudure.

La méthode belge consiste à créer dans la fondation en béton une réservation pour la bêche. Cette réservation est néanmoins fréquemment oubliée. C'est pourquoi si les tiges ne sont pas non plus préscellées et qu'au moins une rangée se trouve dans l'alignement de la bêche, la réservation pour ces deux types d'éléments est identique. Remarquons cependant que ce type de réservation commune

est également réalisable lorsque deux tiges sont placées au-delà des semelles à chaque extrémité de la platine. En effet, dans ce cas, il arrive que deux petites bêtes (souvent formées de profilés en U) soient placées dans les cavités des tiges (*Figure 53*). Dans cette configuration, la platine n'est plus raidie au niveau de la bête par l'âme du poteau. Ainsi, si l'effort est important et la platine mince, elle risque de fléchir sous l'effet de la bête. Dans ce cas, des raidisseurs dans le prolongement de l'âme sont mis en place.

Une fois la fondation coulée, la platine d'extrémité ou la plaque d'assise sous laquelle la bête est soudée est positionnée sur le bord de la réservation. Du mortier de scellement est ensuite coulé. Le mortier de scellement est généralement plus liquide que le béton, il remplira donc plus facilement toutes les cavités autour de la bête de façon à garantir une bonne adhérence. En outre, pour s'assurer que le mortier de scellement s'est bien réparti tout autour de la bête et jusqu'à la face inférieure de la platine ou de la plaque, deux trous sont percés dans la platine ou dans la plaque. Par ceux-ci, l'air pourra remonter et le mortier en sortira lorsqu'il aura rempli toutes les cavités.

4. Conclusion

A première vue, en balayant rapidement la littérature sur les pieds de poteaux, il semblerait que des centaines de configurations d'ancrage différentes existent. Néanmoins, en menant une étude plus approfondie, nombreuses d'entre-elles se ressemblent. Les solutions les plus couramment rencontrées peuvent être classées en huit familles, à moins que les solutions articulées et encastrées ne soient pas différenciées. Dans ce cas, six familles seraient définies, en rassemblant les solutions de base 1-4 et 2-1 ainsi que les solutions 1-3 et 2-3. Toutefois, dans le cadre de ce projet, les solutions articulées sont différenciées des solutions encastrées. Ces deux catégories ne reprennent pas les mêmes types d'efforts. Ceci simplifiera donc les études de dimensionnement du *Chapitre 4*.

D'ailleurs, en fonction des efforts transmis mais également des conditions de mise en œuvre, huit variantes peuvent potentiellement être utilisées avec les solutions de base définies. Ces variantes consistent aussi bien en des modifications géométriques des éléments de base de l'assemblage (par exemple, modification de la forme des tiges, du type de profilé, etc.) qu'en l'ajout d'éléments renforçant l'assemblage (par exemple, des raidisseurs, une bête, etc.).

Les solutions trouvées dans la littérature ne pouvant être classées dans une des huit familles principales ne sont pas reprises dans ce rapport. Ce sont généralement des solutions développées pour des cas d'assemblage bien spécifiques. Par exemple, lorsque l'assemblage doit reprendre des efforts particuliers, s'il doit assurer certaines fonctions en phase de montage ou encore, lorsque les dispositions du lieu de mise en œuvre sont telles que la géométrie du système d'ancrage doit être adaptée.

Dans le cadre de ce projet, il n'est, pas nécessaire de s'intéresser à des solutions très particulières. En effet, l'objectif est de montrer à Solvay les solutions qui existent aujourd'hui et qui peuvent être dimensionnées avec les règles de calcul trouvées dans des ouvrages de référence, validées dans la plupart des pays où l'entreprise est implantée (voir *Chapitre 4*). Or, les règles de calcul nécessaires au dimensionnement de solutions particulières, voir uniques sont généralement propres à l'entreprise les ayant développées.

De plus, comme nous le verrons au *Chapitre 5*, les solutions les plus couramment utilisées par l'entreprise Solvay font partie des huit catégories définies.

CHAPITRE 3 : Choix d'une méthode de calcul

Dans le chapitre précédent, les solutions les plus courantes de liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation ont été répertoriées et décrites. Il est maintenant intéressant d'aborder le dimensionnement de ces solutions.

Suivant la configuration, les assemblages de pieds de poteaux sont supposés supporter des efforts de flexion, traction, compression et cisaillement ainsi que leurs combinaisons. Les dimensions des différents éléments composants l'assemblage doivent donc être choisies de manière à résister à ces sollicitations. A cette fin, il existe deux façons inverses de procéder. Soit, les efforts appliqués sont connus et donc, on détermine les dimensions minimales de l'assemblage pour qu'il y résiste. Soit, inversement, les dimensions de l'assemblage sont choisies et donc, les sollicitations maximales admissibles sont déterminées.

Dans le cadre de ce projet, le dimensionnement des assemblages étudiés est réalisé sur base de cette seconde manière de procéder à l'aide de la méthode des composantes.

La méthode des composantes est une méthode de dimensionnement des assemblages, qui s'est développée en 1982. Depuis son approbation, elle est largement utilisée puisqu'un de ses grands avantages est d'être applicable à tous les assemblages possibles, des plus simples aux plus complexes (assemblages poutre-poutre, poutre-colonne, en pieds de poteaux, etc.), qu'ils soient soudés ou boulonnés. De plus, les règles sont applicables et modifiables pour des cas de figure dépassant le cadre de l'Eurocode.

Le grand principe de cette méthode est basé sur la décomposition d'un assemblage en un ensemble de composantes élémentaires qui coexistent et qui fournissent une contribution à une ou plusieurs propriétés structurelles.

Appliquer cette approche revient à suivre 3 étapes : l'identification des composantes, leur caractérisation et leur assemblage.

1. Identification :

Cette étape est la plus importante. Premièrement, il s'agit d'identifier les composantes actives, c'est-à-dire les composantes susceptibles d'activer la ruine de l'assemblage, pour chaque type de sollicitations (traction, compression, cisaillement, flexion et leurs combinaisons). Deuxièmement, le ou les mode(s) de ruine associés à chacune des composantes sont déterminés. Parmi ceux-ci, certains seront à favoriser afin, notamment, d'assurer la robustesse de la structure.

2. Caractérisation :

Dans un second temps, chaque composante est caractérisée en termes de résistance et de rigidité. La partie 1-8 de l'Eurocode 3 [6] fournit, pour différentes composantes, des règles de calcul qui permettent d'évaluer ces caractéristiques.

Dans ce projet, seule la résistance sera évaluée. La caractérisation de la résistance permettra de déterminer les efforts maximaux transmissibles par chacune des composantes afin d'éviter leur ruine.

3. Assemblage :

Dès que la résistance (et/ou la rigidité) de chacune des composantes est déterminée, elles sont regroupées afin de caractériser le comportement global de l'assemblage de pied de poteau. Ce regroupement est basé sur une distribution interne des efforts qui respecte la compatibilité des déplacements entre composantes et le théorème statique. Ce théorème impose que l'assemblage des composantes soit réalisé en respectant les critères de plasticité et de déformation maximale ainsi que l'équilibre entre les efforts intérieurs et les efforts extérieurs.

Dans le chapitre suivant, la méthode des composantes est donc utilisée afin d'évaluer les efforts maximaux transmissibles par les différentes configurations d'assemblage présentées au chapitre précédent.

CHAPITRE 4 : Dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux

1. Introduction

1.1. Objectif

L'objectif de ce chapitre est de fournir les éléments nécessaires à l'évaluation de la résistance des différentes configurations d'assemblage présentées au *Chapitre 2*, sur base de la méthode des composantes. Pour chaque type de sollicitations, la détermination de la résistance de l'assemblage permettra d'obtenir les efforts maximaux transmissibles en pied de poteau.

Les assemblages de pieds de poteaux sont divisés en trois parties principales : la colonne, les soudures et l'assemblage boulonné. Les efforts maximaux qu'ils pourront transmettre seront donc relatifs à la plus faible de ces trois parties, c'est-à-dire celle qui supportera les efforts les moins importants. L'évaluation des sollicitations maximales acceptables par les soudures est réalisée en fonction des soudures actives pour le cas de chargement considéré. De même, celle de l'assemblage boulonné est déterminée en fonction de la résistance des composantes actives qui le composent.

Les composantes actives sont différentes suivant l'effort transmis, de même que les règles de dimensionnement. Selon le cas de figure, l'assemblage peut devoir supporter un effort de traction N^+ , de compression N^- , de cisaillement V (selon l'axe x et/ou y), un moment de flexion M (autour de l'axe x ou y) ou une combinaison de ces efforts. Les différents cas de chargement seront donc étudiés indépendamment.

1.2. Démarche

Les sections suivantes de ce chapitre correspondent à la démarche générale à suivre pour évaluer les efforts maximaux transmissibles en pied de poteau. Les étapes de cette démarche sont :

1. Détermination de la résistance de l'assemblage sous l'effet d'un effort axial seul (traction ou compression) ;
2. Détermination de la résistance de l'assemblage sous l'effet d'un moment de flexion seul ;
3. Détermination de l'effort axial résistant réduit et du moment de flexion résistant, éventuellement réduit, sous l'effet d'une combinaison d'efforts M-N ;
4. Détermination de la résistance de l'assemblage sous l'effet d'un effort de cisaillement seul ;
5. Détermination des efforts résistants réduits sous l'effet d'une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V.

Les étapes à considérer dépendront de la configuration étudiée (configuration encastree ou articulée) et du cas de chargement.

Néanmoins, peu importe les sollicitations appliquées, pour chacune des étapes décrites ci-dessus, la méthodologie suivante est proposée pour déterminer les résistances et donc, les efforts maximaux transmissibles :

1. Pour toutes les configurations étudiées au *Chapitre 2*, les composantes actives sont identifiées ;
2. Les composantes communes à différentes solutions sont pointées afin de dresser une liste de l'ensemble des composantes potentiellement activables ;

3. Chacune des composantes de la liste est rattachée à une des trois parties principales de l'assemblage ;
4. Pour chacune des trois parties principales de l'assemblage :
 - Le ou les mode(s) de ruine associés à chaque composante sont identifiés ;
 - A l'aide des ouvrages de référence, en termes de dimensionnement des pieds de poteaux, les éléments nécessaires à la détermination des efforts maximaux transmissibles sont fournis pour chaque mode de ruine potentiel ;
 - Les sollicitations maximales acceptables, par la partie de l'assemblage considérée, sont déterminées.
5. Sur base de l'étude menée pour chacune des trois parties principales, les efforts maximaux acceptables par l'assemblage du pied de poteau sont évalués.

Aux étapes 3 et 5, les éléments nécessaires à la détermination des efforts maximaux transmissibles par le pied de poteau sont fournis en tenant compte d'une possible interaction entre les efforts. Les efforts obtenus à ces étapes sont comparés à ceux obtenus aux étapes précédentes. Les valeurs minimales seront retenues.

Remarquons que toutes les solutions du *Chapitre 2* ne sont pas étudiées dans les moindres détails. Les concepts généraux sont fournis. Ils permettent de dimensionner les solutions les plus couramment rencontrées. Pour des solutions très spécifiques telles que celle présentée sur la *Figure 39*, des études complémentaires devront être menées.

1.3. Modes de ruine

A chaque mode de ruine identifié pour une composante, afin qu'il ne se produise pas, on évalue l'effort maximal que la composante peut reprendre.

Deux types de mode ruine sont distingués : les modes ductiles et les modes fragiles. Ces derniers sont à craindre, notamment pour la robustesse des structures. En effet, les ruines fragiles sont soudaines, aucun signe précurseur ne permet de les détecter. Une redistribution plastique des efforts n'est donc pas possible. Ce mode de ruine provoque souvent la ruine en chaîne des éléments de la structure. Il apparaît majoritairement dans les assemblages très rigides.

Les modes de ruine ductiles, beaucoup plus prédictibles, sont donc à privilégier. Grâce à la ductilité élevée du matériau, des déformations plastiques importantes peuvent se produire. Ainsi, les efforts « ont le temps » de se répartir plastiquement entre les différents éléments de l'assemblage.

Parmi les composantes actives de l'assemblage, il faut idéalement éviter la ruine des soudures, de la section des boulons, du béton en traction et des armatures. Les efforts que ces éléments pourront transmettre devront donc être supérieurs à ceux que les composantes, présentant des modes de ruine ductiles, accepteront au maximum sans faillir.

Par exemple, en traction, la résistance associée à la rupture en section des boulons devra être supérieure à celle liée à la plastification de la platine. Un moyen d'assurer cela est de faire en sorte que la platine ne soit pas trop mince par rapport au diamètre des boulons. Les soudures devront quant à elles résister à des efforts plus importants que les éléments en acier qu'elles assemblent.

1.4. Ouvrages de référence

Les usines de Solvay étant implantées partout dans le monde, il est important de définir la résistance des assemblages à l'aide de règles validées par la majorité des pays. Les Eurocodes semblent donc être

de bons outils. Bien que développés et officiellement validés en Europe, ils sont utilisés partout dans le monde, surtout lorsqu'il s'agit du dimensionnement des assemblages.

C'est pourquoi afin de fournir les règles nécessaires au dimensionnement des pieds de poteaux, nous nous référencerons dans un premier temps à ces ouvrages. Dans un second temps, d'une part, lorsque les formules de vérification ne peuvent pas y être trouvées, d'autres documents de référence seront utilisés (publications scientifiques, documents du CTICM, livres d'Yvon Lescouarc'h, etc.). D'autre part, il arrive également que les Eurocodes proposent des méthodologies simplifiées d'évaluation des résistances. Ainsi, si une méthode plus précise est développée dans un autre ouvrage, elle sera proposée et comparée à celle de l'Eurocode.

Toutefois, il faudra être attentif au fait que les règles développées dans certains écrits peuvent être dépassées. C'est par exemple le cas de certains principes proposés dans les livres d'Yvon Lescouarc'h. Elles doivent donc faire l'objet d'une mise à jour, ce qui dépasse le cadre de ce travail.

Néanmoins, pour information, dans les sections suivantes, un code couleur est utilisé lorsque des ouvrages sont référencés. Écrits en vert, nous retrouvons les Eurocodes ; en orange, les ouvrages à la base des Eurocodes ou basés sur ceux-ci, c'est-à-dire dont les règles plus récentes ont été développées sur base des Eurocodes mais n'y figurent pas encore. Enfin en rouge, les documents plus anciens dont les principes doivent être considérés avec prudence, voire remis à jour.

A la fin de ce chapitre, il sera donc intéressant de faire un état de ce que couvrent les Eurocodes en termes de dimensionnement des pieds de poteaux.

2. Dimensionnement des assemblages soumis à de la traction

Dans cette section, les éléments nécessaires à la détermination de l'effort de traction maximal transmissible par les configurations d'assemblage étudiées au *Chapitre 2* sont fournis. Ces éléments serviront également à l'étude des assemblages soumis à de la flexion seule et à une combinaison d'efforts M-N.

2.1. Identification des composantes actives

En effectuant la descente de charges au travers des assemblages des pieds de poteaux étudiés, les composantes actives sont identifiées. La colonne de gauche du *Tableau 3* reprend l'ensemble des composantes potentiellement activables. Ensuite, dans les autres colonnes, les composantes participant effectivement à la transmission des efforts pour chacune des solutions étudiées et leurs variantes sont pointées.

Pour une solution donnée, en lisant le tableau du haut vers le bas, le chemin suivi par l'effort de traction depuis la colonne de la structure jusqu'à la fondation est décrit.

Comme vu précédemment, la mise en œuvre des solutions de base et l'importance des sollicitations appliquées peuvent varier. Ainsi, certains dispositifs peuvent être mis en place afin, notamment, de renforcer l'assemblage (variantes).

Lors de la mise en œuvre de certaines variantes, des composantes actives pour la transmission de l'effort de traction dans la solution de base deviennent inactives et inversement.

Dans le tableau ci-après, les variantes sont identifiables par des numéros. On considère que toutes les composantes actives pour la solution de base le sont aussi pour la variante considérée, sauf si le contraire est indiqué entre parenthèses. Par exemple, pour une solution fixée par cornières, lorsque les cornières sont soudées au poteau, les boulons de cornières ne sont plus des composantes actives. Par contre toutes les autres composantes pointées par un « V » ou un « V6 » sont actives.

Composantes actives	Solutions					
	1-1	1-2	1-3 et 2-3	1-4	2-1	2-2
Colonne	V	V	V	V	V	V
Raidisseurs d'âme et portion d'âme entre eux	V2	V2, V3				
Section de la colonne et raidisseurs de platine			V1	V1	V1, V4	
Soudures entre la colonne et les cornières			V6			
Boulons de cornières			V (V6)			
Soudures entre les raidisseurs d'âme et la portion d'âme entre eux et l'élément horizontal sur lequel ils se fixent (platine ou grain)		V2, V3				
Soudures entre la colonne (et les éventuels raidisseurs de platine) et la platine d'extrémité		V (V2, V3)		V	V (V4)	V7
Soudures entre les semelles du profilé et les connecteurs						V7
Connecteurs						V7
Platine d'extrémité		V		V	V (V4)	V7
Soudures entre les raidisseurs de platine et les plats horizontaux des châssis					V4	
Plats horizontaux					V4	
Cornières			V			
Grain		V3				
Plats supérieurs	V					
Axe d'articulation	V					
Plat inférieur	V					
Soudures entre le plat inférieur et la plaque	V					
Plaque d'assise	V					
Soudures entre les plats et l'élément sur lequel ils sont fixés	V5	V5	V5	V5	V5	
Plats	V5	V5	V5	V5	V5	
Tiges	V	V	V	V	V	
Béton	V	V	V	V	V	V
Légende :						
V : Solution de base V1 : Raidisseurs de platine V2 : Raidisseurs d'âme V3 : Raidisseurs d'âme inclinés sans platine d'extrémité			V4 : Châssis V5 : Trous surdimensionnés V6 : Cornières soudées au poteau V7 : Connecteurs et/ou platine d'extrémité			

Tableau 3 - Composantes actives lors de la transmission des efforts de traction pour les différentes solutions étudiées

A partir de ces descentes de charges, la résistance des trois parties principales de l'assemblage peut être déterminée. Pour rappel, ces trois parties sont :

- La colonne constituée, des composantes potentiellement actives suivantes : la colonne et les raidisseurs de platine ou d'âme ;
- Les soudures, soit toutes les soudures reprises dans le *Tableau 3* ;
- L'assemblage boulonné, composé de toutes les composantes non reprises dans les deux parties précédentes.

2.2. Étude de la colonne

L'effort maximal transmissible par la colonne dépend de la résistance en section de la colonne face à l'effort de traction appliqué. Afin de déterminer cette résistance, les formules, provenant de l'Eurocode 3 partie 1-1 [5], habituellement utilisées pour la résistance des sections en acier en traction, sont employées. Elles fournissent l'effort maximal que la colonne peut supporter en fonction de sa section et de la nuance d'acier.

L'effort maximal est déterminé pour une section de la colonne située juste au-dessus des raidisseurs de platine, s'il y en a. La contribution de ces raidisseurs est donc négligée. Néanmoins, la section de ces derniers devra être suffisante pour reprendre l'effort qui leur est transmis.

Pour les solutions 1-1 et 1-2, utilisées avec une section en I ou H, vu la rigidité du grain et des plats d'articulation, l'effort axial leur est directement transmis depuis la portion d'âme située juste au-dessus de ces éléments. Ainsi, cette portion d'âme subit une concentration de contraintes. Elle devra résister seule à l'effort axial appliqué. L'effort axial maximal acceptable sera donc fonction de la résistance de celle-ci.

Néanmoins, lorsque l'effort axial à transmettre est important et que l'âme ne peut pas résister seule, des raidisseurs d'âme sont ajoutés. Dans ce cas, l'effort de traction maximal acceptable par la colonne sera relatif au minimum entre la résistance en section du profilé de la colonne et la résistance en section, de la section constituée des raidisseurs d'âme et de la portion d'âme entre eux.

Le *Tableau 4* reprend les ouvrages auxquels il faut se référer afin de déterminer l'effort maximal pouvant être transmis par la colonne. Dans la colonne du milieu, les effets pouvant provoquer la ruine de l'assemblage sont repris. Dans ce cas, la ruine ne pourrait être provoquée que par un manque de résistance en section de la colonne ou par un manque de résistance de la section constituée des raidisseurs d'âme et de la portion d'âme entre ceux-ci.

Composantes	Effets pouvant provoquer la ruine	Ouvrages de référence
Colonne	- Résistance en section	[5]
Raidisseurs d'âme et portion d'âme entre eux	- Résistance en section → Raidisseurs inclinés → Raidisseurs droits → Âme renforcée	[17] [5] [5]

Tableau 4 - Identification dans les ouvrages de référence des règles nécessaires à l'évaluation de l'effort de traction maximal transmissible par la colonne

2.3. Étude des soudures

Les pièces assemblées par soudures en pieds de poteaux forment, dans tous les cas étudiés pour ce projet, un angle compris entre 60° et 120°. Ainsi, ce sont des soudures d'angle qui sont généralement réalisées. Toutefois, si les calculs mènent à des cordons de soudures trop importants, des soudures pleine pénétration ou à pénétration partielle (beaucoup plus complexes et coûteuses) pourront être envisagées. L'ouvrage [15] donne des recommandations à ce propos. Il propose, en fonction de la nuance des éléments assemblés, un ratio a/t à partir duquel une soudure pleine pénétration devrait être réalisée (a correspond à la dimension de la gorge des soudures et t à la plus petite épaisseur des éléments assemblés).

Afin de déterminer l'effort de traction maximal transmissible par chacune des soudures identifiées dans le *Tableau 3*, les règles établies par l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] sont utilisées. Cet ouvrage propose de déterminer la résistance des soudures en fonction des longueurs des soudures, de la dimension de la gorge des soudures et des caractéristiques des éléments à assembler.

Après avoir déterminé l'effort de traction maximal transmissible par chacune des soudures actives pour la configuration étudiée, la valeur minimale est retenue comme étant la valeur de l'effort de traction à ne pas dépasser pour assurer la résistance de toutes les soudures de l'assemblage du pied de poteau.

Remarquons que si des raidisseurs de platine sont prévus, la résistance des soudures au niveau de la platine d'extrémité est évaluée en tenant compte des soudures entre le profilé et la platine et des soudures entre les raidisseurs et la platine.

En complément des concepts proposés par l'Eurocode, l'ouvrage [21] propose de définir forfaitairement la dimension des gorges des soudures. Cette dimension forfaitaire assure la résistance de l'assemblage soudé à une combinaison d'efforts M-N-V quelle qu'elle soit. Selon le cas de figure, elle peut donc être surestimée.

2.4. Étude de l'assemblage boulonné

Afin de déterminer l'effort de traction maximal transmissible par l'assemblage boulonné, l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] propose de diviser l'assemblage en une série de tronçons en T-équivalents. Cette modélisation est applicable à la plupart des solutions étudiées au *Chapitre 2*. Elle permet d'évaluer l'effort de traction maximal acceptable par la majorité des composantes actives de l'assemblage boulonné. Dans cette section de ce rapport, on commence donc par évaluer l'effort maximal transmissible par les tronçons en T en fonction des différents modes de ruine possibles.

Ensuite, on évalue l'effort maximal transmissible par les composantes pouvant présenter des modes de ruine différents de ceux pris en compte par les tronçons en T.

Enfin, l'effort de traction maximal acceptable par l'assemblage boulonné est déterminé. Il sera relatif au mode de ruine, parmi tous ceux devant être pris en compte, apparaissant pour le plus petit effort de traction. Généralement, on fera en sorte qu'il soit relatif à un des modes de ruine pris en compte par les tronçons en T. En effet, les dispositions constructives sont généralement choisies telles que les efforts, susceptibles de provoquer les modes de ruine non pris en compte par les tronçons en T, soient supérieurs à ceux admissibles par les tronçons en T.

En guise de synthèse, le tableau de la dernière partie de cette section reprend toutes les composantes potentiellement actives de l'assemblage boulonné, les effets qui peuvent provoquer leur ruine et les ouvrages auxquels il faut se référer pour déterminer les efforts maximaux transmissibles.

2.4.1. Étude des tronçons en T-équivalents

Dans l'Eurocode 3 partie 1-8 [6], pour évaluer l'effort de traction maximal transmissible par l'assemblage boulonné du pied de poteau étudié, l'assemblage est modélisé par une série de tronçons en T-équivalents, ayant chacun leur propre résistance. La détermination de leur résistance permettra d'obtenir l'effort maximal qu'ils peuvent admettre.

Pour un assemblage soumis à un effort de traction seul, un tronçon en T, de longueur efficace l_{eff} , est défini pour chaque rangée de boulons ou pour chaque groupe de rangées. La détermination de la résistance de chacun des tronçons est réalisée selon les étapes suivantes (détaillées juste après) :

1. Choix de la modélisation de l'assemblage en tronçons en T-équivalents ;
2. Identification des modes de ruine à considérer ;
3. Détermination de la longueur efficace de chaque tronçon ;
4. Évaluation de la résistance de chaque tronçon.

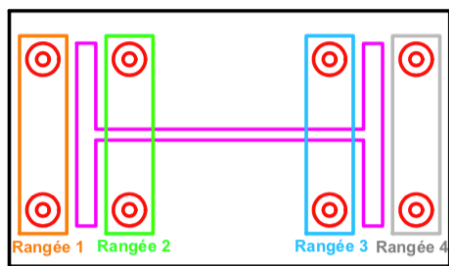
Cette modélisation en tronçons en T, proposée par l’Eurocode, est utilisée avec toutes les solutions étudiées au *Chapitre 2*, à l’exception de la solution 2-2, pour laquelle la résistance à la traction est évaluée plus tard dans cette section.

Étape 1.:

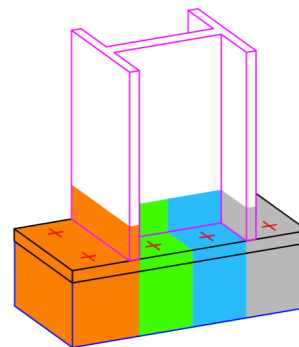
Quelle que soit la configuration, un tronçon en T-équivalent est constitué :

- D’une âme qui modélise, pour la solution 1-2, le plat inférieur du système d’articulation et pour toutes les autres solutions, une partie du profilé ou un raidisseur situé à proximité immédiate de la rangée de tiges considérée ;
- D’une semelle qui modélise le plat horizontal en acier sur lequel s’appuient les écrous des tiges. Suivant la solution considérée, ce plat horizontal peut correspondre aux différentes composantes suivantes : la platine d’extrémité, la plaque d’assise, une cornière, le plat horizontal d’un châssis, le grain ;
- D’une rangée de tiges d’ancrage en traction ;
- D’une portion de la fondation en béton.

La modélisation et le choix des tronçons en T dépendent du cas de figure considéré. Un exemple de modélisation est présenté à la *Figure 56* pour l’assemblage de la *Figure 55*.



Légende – Poteau, platine, tiges
Figure 55 - Solution 2-1 avec 4 rangées de tiges



Légende – Poteau, platine, tiges, béton, tronçon 1, tronçon 2, tronçon 3, tronçon 4
Figure 56 – Exemple de modélisation par tronçons en T-équivalents tendus

Tous les assemblages étudiés au *Chapitre 2* sont symétriques. Ainsi, l’étude des tronçons situés sur une moitié de l’assemblage suffira à la détermination de la résistance globale en traction de l’assemblage boulonné. Pour l’exemple ci-dessous, seuls les tronçons 1 et 2 devront être étudiés.

Étape 2.:

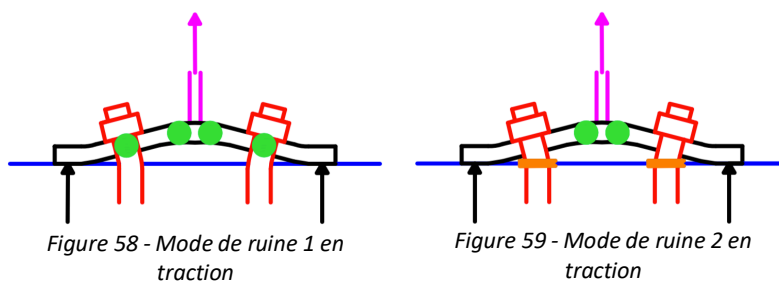
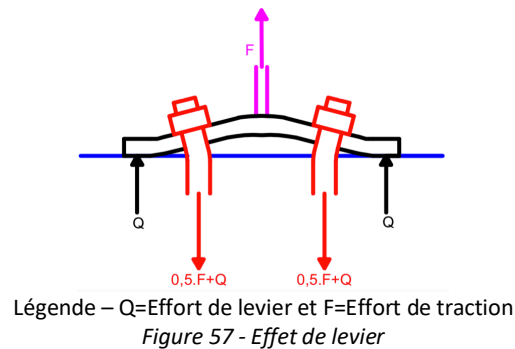
Chacune des composantes du tronçon en T-équivalent correspond au moins à un mode de ruine possible.

Pour la partie en acier du T, afin d’identifier les modes de ruine possibles, il convient de commencer par déterminer l’existence ou non d’un effet de levier.

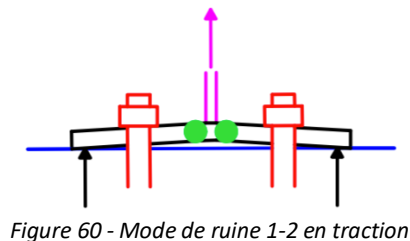
On parle d’effet de levier lorsque sous un effort de traction, la semelle du tronçon en T se déforme en flexion ce qui la sépare de la fondation en béton, sauf à ses extrémités où l’effet de levier apparaît (*Figure 57*).

Un effort de réaction Q apparaît donc aux extrémités des semelles. Celui-ci est équilibré par un effort de traction supplémentaire dans les tiges. Deux modes de ruine peuvent alors apparaître :

- Mode 1 (Figure 58) : Mécanisme complet de ruine par plastification totale des semelles du tronçon en T en flexion, le long des charnières plastiques provenant des trous des tiges ou les entourant ;
- Mode 2 (Figure 59) : Mécanisme partiel de ruine formé par la rupture des boulons combinée à la plastification partielle des semelles.



Au contraire, si l'effet de levier ne peut pas apparaître, par exemple, lorsque les semelles du T-équivalent sont rigides et les tiges extensibles, ces modes de ruine ne sont pas possibles. C'est alors le mode de ruine 1-2 (Figure 60) qui doit être considéré. Celui-ci correspond à la formation de rotules plastiques dans la semelle, à proximité de l'âme, lorsque la semelle se sépare de l'élément sur lequel elle repose.



Dans la pratique, l'existence d'un effet de levier est déterminée par un critère de longueur limite des tiges :

$$L_b \leq L_b^* \text{ avec}$$

L_b , la longueur d'une tige d'ancrage définie dans l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] ;
 L_b^* , la longueur limite.

L'Eurocode propose une formule pour définir la longueur limite. Toutefois, cette formule considère une rangée de deux tiges. Ainsi, pour un cas plus général, elle prend la forme suivante :

$$L_b^* = \frac{n_b \cdot 4,4 \cdot m^3 \cdot A_s}{l_{eff,1} \cdot t_p^3} \text{ avec}$$

n_b , le nombre de tiges de la rangée considérée ;
 m , une dimension géométrique définie dans l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] ;
 A_s , la section résistante d'une tige ;

$l_{eff,1}$, la longueur efficace relative au mode de ruine 1 définie à l'étape suivante ;
 t_p , l'épaisseur de la semelle du tronçon en T.

Deux autres modes de ruine, indépendants de l'effet de levier, peuvent également apparaître dans la partie en acier des tronçons en T :

- Mode 3 (Figure 61) : Ruine par rupture en section des boulons ;
- Mode 4 (Figure 62) : Ruine par plastification de l'âme du T-équivalent en traction.

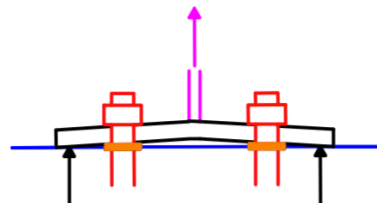


Figure 61 - Mode de ruine 3 en traction

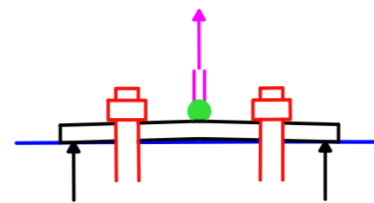


Figure 62 - Mode de ruine 4 en traction

Remarquons que la rupture en section des boulons est un mode de ruine fragile. Ainsi, les modes 1 et 4 sont à privilégier.

A l'interface entre les tiges et le béton, différents modes de ruine fragiles [4] peuvent également se produire. Ils sont illustrés de la Figure 63 à la Figure 67. Ceux-ci doivent être pris en compte dans l'évaluation des résistances associées aux modes 1 et 3. Toutefois, ils sont à éviter à tout prix. Ils représentent un danger structurel encore plus important que la rupture en section d'une tige. Ainsi, les dispositions constructives seront telles que la résistance associée à chacun d'eux soit toujours supérieure aux résistances correspondantes aux modes 1 et 3.

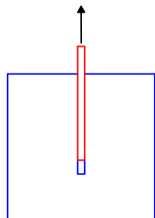


Figure 63 - Rupture par extraction-glisserment

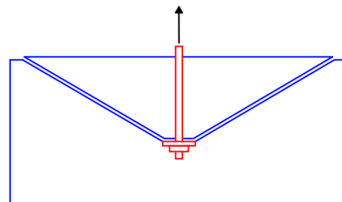


Figure 64 - Rupture par cône de béton

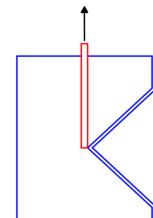


Figure 65 - Rupture par éclatement du béton

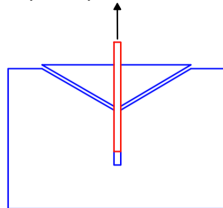


Figure 66 - Rupture combinée du béton et par extraction-glisserment

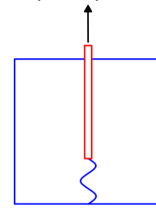


Figure 67 - Rupture par fendage du béton

En fonction du type de tiges utilisé et de la méthode de mise en œuvre, certains modes de ruine à l'interface entre les tiges et le béton sont plus susceptibles de se produire que d'autres. Par exemple, une rupture par extraction-glisserment (aussi dite par perte d'adhérence), pour un même effort et une même longueur d'ancrage, se produit plus facilement avec une tige droite ou en queue de carpe qu'avec tout autre type de tiges. Quel que soit le type de tiges, la ruine par perte d'adhérence n'est pas à considérer si les tiges sont protégées (galvanisation, zingage, etc.) ou entourées d'un tube, empêchant toute adhérence entre la tige et le béton.

De plus, les tiges avec plat ou à tête marteau mobilisent un plus grand cône de béton. Ainsi, la rupture par cône de béton sera moins susceptible de se produire avec ce type de tiges.

Les dimensions de la fondation peuvent influencer l'apparition d'un mode de ruine. En effet, par exemple, les dimensions restreintes de la fondation peuvent empêcher le développement complet d'un cône de béton. Dans ce cas, la résistance associée au mode de ruine concerné sera limitée. En outre, si la fondation est peu profonde, la rupture par fendage du béton a plus de risques de se produire.

Étape 3 :

Lors de la mise en traction, comme vu précédemment, la semelle du T-équivalent fléchit. Elle se plie et se plastifie donc suivant des lignes, appelées charnières plastiques, provenant des trous des boulons ou les entourant. Ces charnières se développent de plus en plus pour finir, si les tiges ne se sont pas rompues, par décomposer la semelle du tronçon en un réseau de facettes planes formant un mécanisme complet. A ce moment, la résistance de l'assemblage est atteinte. Plus les charnières plastiques peuvent se développer sur une grande longueur, plus la résistance de l'assemblage est augmentée. Pour le mode 2, on parle de mécanisme partiel de ruine, le développement des charnières plastiques étant limité par la rupture en section des tiges. Par contre, pour le mode 1, le mécanisme de ruine est complet, le développement des charnières n'étant pas limité. Ainsi, le calcul de la résistance du tronçon en T dépend de la longueur efficace de ces charnières. Cette longueur est fonction de différents paramètres :

- Le mode de ruine (mode 1, mode 2 ou mode 1-2) ;
- La forme du profilé (section ouverte ou fermée) ;
- La géométrie de la semelle du tronçon en T (platine carrée, rectangulaire ou circulaire, cornière, etc.) ;
- Les conditions de raidissage au voisinage de la rangée de boulons considérée ;
- La position des tiges sur la semelle du T-équivalent et dans l'assemblage (par exemple, une rangée de boulons située à l'intérieur des semelles d'un profilé en I ou H de la colonne donne des longueurs efficaces différentes d'une rangée placée à l'extérieur) ;
- L'effet de groupe de rangées de boulons : cet effet est à considérer pour des rangées voisines. Il est généralement pris en compte lorsqu'au moins trois rangées sont comprises entre deux éléments transversaux (raidisseurs ou semelles d'un profilé en I ou H) ;
- Le type de mécanismes de ruine. Il en existe deux types principaux : les mécanismes non circulaires et les mécanismes circulaires.

Le *Tableau 5* reprend les ouvrages auxquels il faut se référer pour déterminer les longueurs efficaces en fonction du type de profilé, de la géométrie de la platine, des conditions de raidissage et de la présence d'un effet de groupe ou non. Que la semelle du tronçon en T soit une portion de la platine d'extrémité, de la plaque d'assise, du grain, d'une cornière ou d'un plat de châssis, les formules restent identiques. Pour une solution fixée par cornières ou par axe d'articulation, les longueurs efficaces seront toujours celles utilisées avec un profilé en I ou H.

Certains cas de figure ne sont pas repris dans le tableau ci-dessous. Pour ceux-ci, aucune référence dans la littérature n'a été trouvée. Dans ce cas, les formules existantes devront faire l'objet d'une adaptation.

	Type de platine	Raidisseurs	Effet de groupe	Ouvrages de référence
Profilé en I ou H	Rectangulaire	Avec ou sans	Avec ou sans	[6]
Section carrée ou rectangulaire	Carrée ou rectangulaire	Sans	Sans	[3]
Section circulaire	Platine carrée	Sans	Sans	[12]

Tableau 5 - Longueurs efficaces des tronçons en T-équivalents tendus

Étape 4.:

Pour la partie en acier de l'assemblage boulonné, à chaque mode de ruine, identifié à l'étape 2, correspond une résistance à la traction $F_{T,i,Rd}$ (avec i , le nombre de tronçons en T). Cette résistance à la traction correspond à l'effort de traction maximal qu'il sera possible de transmettre sans provoquer le mode de ruine considéré.

Les résistances associées aux modes 2 et 3 (respectivement $F_{T,2,Rd}$ et $F_{T,3,Rd}$) devraient correspondre au minimum entre la résistance associée au mode considéré pour la partie en acier et les résistances liées aux modes de ruine possibles à l'interface entre les tiges et le béton. Toutefois, ces derniers étant d'office écartés grâce à des dispositions constructives adéquates, seuls les modes de ruine associés à la partie en acier sont considérés.

Ainsi, l'effort maximal transmissible par le tronçon en T i ($F_{T,i,Rd}$) est égal à :

- Si l'effet de levier apparaît : $F_{T,i,Rd} = \min (F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$
- Sans effet de levier : $F_{T,i,Rd} = \min (F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$

L'assemblage étant symétrique, cet effort est différent pour chacun des tronçons en T défini à l'étape 1, situé de même côté de l'assemblage. Ces tronçons sont donc étudiés séparément. L'effort maximal transmissible par l'assemblage boulonné en traction correspond alors à deux fois la somme des résistances associées aux différents tronçons situés d'un côté de l'assemblage.

Par exemple, pour la situation présentée à la *Figure 56*, l'évaluation de l'effort maximal acceptable par les tronçons 1 et 2 suffit et l'effort maximal transmissible par l'assemblage boulonné est égal à deux fois la somme des efforts maximaux transmissibles par ces deux tronçons.

Les formules d'évaluation des efforts maximaux transmissibles, associés aux différents modes de ruine, sont données par l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] et sont valables peu importe les composantes constituant les tronçons en T. Les paramètres s'y retrouvant doivent juste être adaptés au cas de figure étudié.

2.4.2. Étude des modes de ruine supplémentaires

Pour certaines configurations, l'étude des T-équivalents ne suffit pas à l'analyse globale de la résistance de l'assemblage boulonné. En effet, d'autres composantes actives peuvent provoquer la ruine de l'assemblage.

Quelle que soit la configuration, si les trous sont surdimensionnés, les plats soudés (*Figure 6*) peuvent se plastifier en flexion lors du transfert de l'effort de traction. Ces plats doivent également être vérifiés sous l'effet du poinçonnement des écrous.

Si les trous sont de dimensions standards, c'est le plat en acier sur lequel reposent les écrous (platine d'extrémité, grain, cornière, etc.) qui risque de périr sous l'effet du poinçonnement.

Dans le cas d'un assemblage fixé par cornières, l'effort de traction est transféré de l'âme ou des semelles du poteau aux boulons et ensuite, des boulons à la cornière par pression diamétrale. Cette pression ne doit pas provoquer la plastification des éléments assemblés.

De plus, les boulons doivent résister à l'effort de cisaillement qui leur est transmis. Pour tenir compte de la flexibilité du système fixé par cornières, l'effort de cisaillement dans chacun des boulons d'âme est égal à la moitié de l'effort axial [17].

La résistance en section des cornières, sous l'effort de traction, fait également l'objet d'une vérification.

Les mêmes vérifications sont effectuées pour un assemblage par axe d'articulation, avec cette fois, l'effort de traction transmis par pression diamétrale des plats supérieurs à l'axe d'articulation puis de

celui-ci au plat inférieur. L'axe d'articulation et les plats doivent également résister en section à l'effort appliqué.

Pour une solution fixée par châssis, la modélisation par des tronçons en T est utilisée. Les plats horizontaux supérieurs constituent les semelles des T-équivalents et les raidisseurs, les âmes de ces T. Ces plats sont également susceptibles d'une part, de subir le poinçonnement dû aux écrous, si les trous sont de dimensions standards et d'autre part, de fléchir. En effet, ils fonctionnent comme une poutre appuyée sur les raidisseurs et mise en flexion (la liaison avec le poteau étant négligée [18]). Leur section doit donc être suffisante pour résister à cette flexion.

Pour la solution 2-2, de nombreux tests expérimentaux ainsi que différentes simulations numériques ont été réalisés. Cependant, les Eurocodes ne spécifient pas clairement comment effectuer le dimensionnement des pieds de poteaux noyés dans le béton (solution de base 2-2 et variantes). Seul l'article [29] donne quelques indications, mais pas lorsque ce type de pieds de poteaux est soumis à un effort de traction.

Néanmoins, nous pouvons comparer les modes de ruine d'une colonne en acier noyée dans le béton à ceux susceptibles de se produire à l'interface entre une tige d'ancrage et le béton (voir schémas de la *Figure 63* à la *Figure 67*). Ainsi, les formules proposées par l'Eurocode 2 partie 4 [4] peuvent être adaptées à ces configurations.

Remarquons que comme pour les tiges avec plat ou à tête marteau, la fixation d'une platine d'extrémité ou de connecteurs le long des semelles du profilé permet d'augmenter l'effort maximal transmissible par ce type de pieds de poteaux, notamment grâce à l'amélioration de la résistance au cône de béton que ces dispositifs supplémentaires permettent.

Contrairement à la semelle des tronçons en T, pour cette solution, la platine, fixée à l'extrémité de la colonne, étant noyée dans le béton, ne subit que très peu de flexion. Les phases de montage sont, par contre, préjudiciables pour la platine. En effet, durant celles-ci, des efforts lui sont déjà transmis, parfois, très localement. Son épaisseur sera donc choisie pour résister à la flexion durant ces phases. Toutefois, les études concernant les phases de montage ne font pas partie de ce projet.

2.4.3. Ouvrages de référence

Dans cette section, l'ensemble des vérifications à mener pour déterminer l'effort de traction maximal transmissible par l'assemblage boulonné est synthétisé.

Dans la colonne de gauche du *Tableau 6*, se trouvent les composantes potentiellement actives pour l'ensemble des configurations du *Chapitre 2*.

Dans la colonne du milieu, sont repris les modes de ruine possibles ou les effets pouvant provoquer la ruine de chacune des composantes et donc, de l'assemblage boulonné. Pour une composante active donnée, les effets ou modes de ruine fournis dans le tableau ne sont pas forcément tous à considérer. Ceux-ci dépendent également de la configuration étudiée.

Il faudra donc déterminer l'effort de traction maximal acceptable permettant d'éviter chacun des modes de ruine potentiels pour la solution étudiée. Pour cela, les règles de calcul fournies dans les ouvrages référencés dans la dernière colonne du tableau sont utilisées.

Composantes	Modes de ruine possibles ou effets susceptibles de provoquer la ruine	Ouvrages de référence
Poteau	- Mode de ruine 4 des tronçons en T - Pression diamétrale des boulons	[6] [6]
Platine d'extrémité	- Mode de ruine 1 des tronçons en T - Mode de ruine 2 des tronçons en T - Mode de ruine 1-2 des tronçons en T - Poinçonnement	[6] [6] [6] [6]
Raidisseurs de platine	- Mode de ruine 4 des tronçons en T	[6]
Grain	- Mode de ruine 1 des tronçons en T - Mode de ruine 2 des tronçons en T - Mode de ruine 1-2 des tronçons en T	[6] [6] [6]
Boulons entre le poteau et les cornières	- Flexion - Cisaillement	[6] [6]
Cornières	- Résistance en section - Aile verticale : pression diamétrale - Aile horizontale : <ul style="list-style-type: none"> • Modes de ruine 1 des tronçons en T • Modes de ruine 2 des tronçons en T • Modes de ruine 1-2 des tronçons en T • Poinçonnement 	[5] [6] [6] [6] [6]
Plats supérieurs (solution 1-1)	- Pression diamétrale - Résistance en section	[6] [6]
Axe d'articulation	- Flexion - Cisaillement	[6] [6]
Plat inférieur (Solution 1-1)	- Mode de ruine 4 des tronçons en T - Pression diamétrale - Résistance en section	[6] [6] [6]
Plat d'un châssis	- Modes de ruine 1 des tronçons en T - Modes de ruine 2 des tronçons en T - Modes de ruine 1-2 des tronçons en T - Flexion - Poinçonnement	[6] [6] [6] [6] [6]
Plaque d'assise	- Modes de ruine 1 des tronçons en T - Modes de ruine 2 des tronçons en T - Modes de ruine 1-2 des tronçons en T - Poinçonnement	[6] [6] [6] [6]
Plats (trous surdimensionnés)	- Poinçonnement - Flexion	[6] [7]
Tiges	- Modes de ruine 2 des tronçons en T - Mode de ruine 3 des tronçons en T	[6] [6]
Béton – Tiges Ou Béton – Poteau noyé	- Rupture par extraction-glisement : cas général Des informations plus spécifiques peuvent être trouvées pour : <ul style="list-style-type: none"> • Les tiges avec plat • Les tiges recourbées • Les tiges à contre-courbure - Rupture par cône de béton Des informations plus spécifiques peuvent être trouvées pour les tiges avec plat <ul style="list-style-type: none"> - Rupture combinée du béton et par extraction-glisement - Rupture par fendage du béton - Rupture par éclatement du béton 	[4] [7] [7] [17] [4] [21] [4] [4] [4]

Tableau 6 - Identification dans les ouvrages de référence des règles nécessaires à l'évaluation de l'effort de traction maximal transmissible par l'assemblage boulonné

2.5. Étude de l'assemblage en pied de poteau

L'assemblage en pied de poteau correspond à l'assemblage des trois parties précédemment étudiées : la colonne, les soudures et l'assemblage boulonné. L'effort maximal de traction transmissible par l'assemblage en pied de poteau sera donc relatif à la résistance minimale entre les résistances associées à chacune de ces trois parties. L'application de cet effort entraînera la ruine de la partie la plus faible et donc, la ruine globale de l'assemblage en pied de poteau.

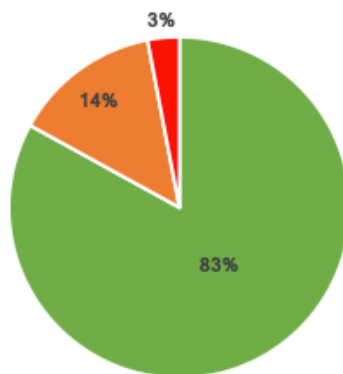
Néanmoins, les dispositions constructives (dimensions des éléments, longueurs minimales d'ancrage, nuances d'acier, etc.) seront toujours déterminées de façon à ce que si l'effort maximal acceptable par l'assemblage est atteint, la ruine de l'assemblage soit provoquée par une composante ayant un comportement ductile. Ainsi, il devra être différent de l'effort maximal transmissible par les soudures, les tiges et le béton.

En conclusion, les règles des Eurocodes, étant validées partout en Europe et utilisées même au-delà, il est intéressant que celles-ci permettent le dimensionnement d'un maximum des solutions présentées au *Chapitre 2*. Ainsi, nous concluons l'étude du dimensionnement, sous un effort de traction, en faisant l'état des ouvrages desquels proviennent les règles nécessaires à l'évaluation de l'effort de traction maximal transmissible, pour l'ensemble des configurations du *Chapitre 2*.

Nous constatons que 83% d'entre-elles peuvent être trouvées dans les Eurocodes (*Figure 68*), 14% dans des documents basés sur les Eurocodes mais dont certaines règles ne s'y trouvent pas encore. Enfin, 3% des règles proviennent de documents dont les principes sont souvent dépassés. Ces 3% de règles devront donc être revus avant d'être utilisés pour un dimensionnement.

Les Eurocodes couvrent donc la majorité des règles relatives au dimensionnement des pieds de poteaux en traction.

Remarquons également que 6% des règles présentes dans les Eurocodes sont complétés par des informations plus précises qui apparaissent dans d'autres ouvrages.



Légende – Eurocodes, documents récents, documents anciens

Figure 68 - État des règles fournies par les Eurocodes pour le dimensionnement en traction

3. Dimensionnement des assemblages soumis à de la compression

Dans cette section, les éléments nécessaires à la détermination de l'effort de compression maximal transmissible par les configurations d'assemblage étudiées au *Chapitre 2* sont fournis. Ces éléments serviront également à l'étude des assemblages soumis à de la flexion seule et à une combinaison d'efforts M-N.

3.1. Identification des composantes actives

Comme pour l'étude en traction, en effectuant la descente de charges au travers des assemblages des pieds de poteaux étudiés, les composantes actives sont identifiées. Le *Tableau 7* est construit suivant les mêmes principes que le *Tableau 3*, concernant la traction. Il reprend donc l'ensemble des composantes actives pour chacune des solutions étudiées au *Chapitre 2*.

Composantes actives	Solutions				
	1-1	1-2	1-3 et 2-3	1-4 et 2-1	2-2
Colonne	V	V	V	V	V
Raidisseurs d'âme et portion d'âme entre eux	V2	V2, V3			
Section de la colonne et raidisseurs de platine			V1	V1	
Soudures entre les raidisseurs d'âme et la portion d'âme entre eux et l'élément horizontal sur lequel ils se fixent (platine ou grain)		V2			
Soudures entre les semelles du profilé et les connecteurs					V7
Connecteurs					V7
Soudures entre la colonne (et les éventuels raidisseurs de platine) et la platine d'extrémité		V (V3, V2)		V	V7
Platine d'extrémité				V	V7
Soudures entre la platine d'extrémité et le grain		V (V3)			
Soudures entre le grain et les raidisseurs d'âme et la portion d'âme entre eux		V3			
Grain		V			
Plats supérieurs	V				
Axe d'articulation	V				
Plat inférieur	V				
Soudures entre le plat inférieur et la plaque	V				
Plaque d'assise	V	V	V		
Béton	V	V	V	V	V
Légende					
V1 : Raidisseurs de platine		V3 : Raidisseurs d'âme inclinés sans platine d'extrémité			
V2 : Raidisseurs d'âme		V7 : Solution 2-2 avec connecteurs et/ou platine d'extrémité			

Tableau 7 - Composantes actives lors de la transmission des efforts de compression pour les différentes solutions étudiées

A partir de ces descentes de charges, la résistance des trois parties principales de l'assemblage peut être déterminée. Pour rappel, ces trois parties sont :

- La colonne constituée, des composantes potentiellement actives suivantes : la colonne et les raidisseurs de platine ou d'âme ;
- Les soudures, soit toutes les soudures reprises dans le *Tableau 7* ;

- L'assemblage boulonné, composé de toutes les composantes non reprises dans les deux parties précédentes.

3.2. Étude de la colonne

L'effort maximal transmissible par la colonne dépend de la résistance minimale entre :

- La résistance de calcul des différentes parties du profilé combinées. Par exemple, pour une section en I, elle dépend de la résistance de la semelle et de l'âme combinées (1) ;
- La résistance en section du profilé en acier (2).

Afin de déterminer ces résistances, les formules, provenant, respectivement, de l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] et de l'Eurocode 3 partie 1-1 [5], sont employées. Elles fournissent l'effort maximal que la colonne peut supporter en fonction de sa section et de la nuance d'acier.

L'effort maximal est déterminé pour une section de la colonne située juste au-dessus des raidisseurs de platine, s'il y en a. La contribution de ces raidisseurs est donc négligée. Néanmoins, les raidisseurs participent à la transmission de l'effort de compression. Ainsi, leurs dimensions devront être telles qu'ils ne voilent pas (voir recommandations de l'ouvrage [17]) et que leur section soit suffisante pour résister aux efforts appliqués.

Comme pour la traction, pour les solutions 1-1 et 1-2, utilisées avec une section en I ou H, vu la rigidité du grain et des plats d'articulation, l'effort axial leur est directement transmis depuis la portion d'âme située juste au-dessus de ces éléments. Ainsi, cette portion d'âme subit une concentration de contraintes. Elle devra résister seule à l'effort axial appliqué. La résistance (2) sera donc, dans ce cas, fonction de la résistance de la portion d'âme (voir [5]).

Néanmoins, lorsque l'effort axial à transmettre est important et que l'âme ne peut pas résister seule, des raidisseurs d'âme sont ajoutés. Dans ce cas, la résistance (2) est prise égale au minimum entre la résistance en section du profilé de la colonne et la résistance en section, de la section constituée des raidisseurs d'âme et de la portion d'âme entre eux (voir [5]).

Les dimensions des raidisseurs d'âme doivent également permettre d'éviter leur voilement.

3.3. Étude des soudures

Les mêmes éléments que ceux nécessaires à la détermination de l'effort de traction maximal transmissible par les soudures sont utilisés pour l'évaluation de la sollicitation de compression maximale acceptable par les soudures.

3.4. Étude de l'assemblage boulonné

Afin de déterminer l'effort de compression maximal transmissible par l'assemblage boulonné, l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] propose, comme en traction, de diviser l'assemblage en une série de tronçons en T-équivalents.

Ainsi, l'étude de l'assemblage boulonné, sous un effort de compression, se fait suivant les mêmes étapes que pour l'étude sous un effort de traction.

L'effort maximal que l'assemblage boulonné peut transmettre est alors déterminé en fonction du mode de ruine, parmi tous ceux devant être pris en compte, apparaissant pour le plus petit effort de compression. De même qu'en traction, généralement, on fera en sorte qu'il soit relatif à un des modes de ruine pris en compte par les tronçons en T. En effet, les dispositions constructives sont généralement choisies telles que les efforts susceptibles de provoquer les modes de ruine non pris en compte par les tronçons en T soient supérieurs à ceux admissibles par les tronçons en T.

Enfin, le même tableau de synthèse que celui proposé pour l'étude de l'assemblage boulonné en traction est réalisé.

3.4.1. Étude des tronçons en T-équivalents

Comme en traction, la modélisation par des tronçons en T-équivalents, proposée par l'Eurocode, est utilisée pour toutes les solutions de base et leurs variantes, hormis pour la solution 2-2.

Pour chacune des solutions, la modélisation par tronçons en T-équivalents est décrite dans le *Tableau 8*. Ces modélisations restent valables quelle que soit la variante étudiée.

	Nombres de tronçons	Âme du T	Semelles du T
Solution 1-1	Un seul sous le plat inférieur du système d'articulation	Le plat inférieur	La plaque d'assise et la fondation
Solution 1-2	Un seul sous le grain	Le grain	
Solutions 1-3 et 2-3	Le nombre de tronçons est égal au nombre de parois du profilé plus le nombre de raidisseurs, pour autant que les aires associées aux tronçons ne se recouvrent pas (voir étape 2 ci-après)	Suivant le cas, l'âme du T	La platine d'extrémité et la fondation
Solutions 1-4 et 2-1		modélise soit une paroi du profilé, soit un raidisseur	

Tableau 8 - Modélisation par tronçons en T-équivalents pour un assemblage soumis à un effort de compression

La détermination de l'effort de compression maximal transmissible par chacun des tronçons est réalisée selon les étapes suivantes :

1. Évaluation de la résistance de calcul à l'écrasement du mortier de scellement ou du béton, également appelée résistance à la pression localisée ;
2. Détermination de la largeur d'appui additionnelle ;
3. Définition des dimensions de chacun des tronçons en T-équivalents ;
4. Évaluation de l'effort maximal transmissible par chaque tronçon.

Étape 1 :

La résistance à la pression localisée de la fondation, déterminée par l'Eurocode 3 partie 1-8 [6], dépend de plusieurs paramètres :

- De la résistance de calcul à la pression du béton ou du mortier de scellement de la fondation sous la platine ou la plaque ;
- Du degré de diffusion de la charge dans la fondation ;
- Des caractéristiques géométriques et de résistance de la fondation.

Le mortier de scellement est choisi tel que ses caractéristiques de résistance soient les plus proches possibles de celles du béton de fondation.

La charge de compression est transmise par l'âme du tronçon en T à la platine d'extrémité ou à la plaque d'assise, supposée infiniment rigide, et ensuite, elle est diffusée dans la fondation. Si les dimensions de la fondation sont suffisamment importantes, la charge peut pleinement se diffuser dans la fondation (*Figure 69*), assurant ainsi une résistance maximale à la pression localisée. Si par contre, les dimensions sont telles que la diffusion complète de la charge est empêchée (*Figure 70* et *Figure 71*), la résistance peut être considérablement diminuée.

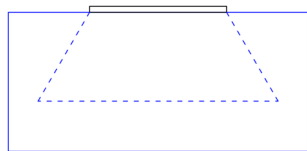


Figure 69 - Diffusion maximale



Figure 70 - Diffusion limitée par la hauteur de la fondation

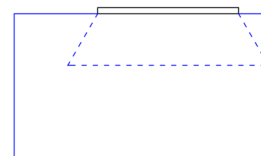


Figure 71 - Diffusion limitée par les dimensions en plan de la fondation

Étape 2 :

L'âme des tronçons en T transmet à la semelle un effort de compression. Cet effort est considéré comme uniformément réparti sur une surface de dimensions l_{eff} et b_{eff} de la platine d'extrémité ou de la plaque d'assise (voir exemples sur la Figure 72 et la Figure 73), pour autant que ces dimensions ne soient pas limitées par les dimensions de la platine ou de la plaque (voir étape 3). Ces dimensions dépendent d'une largeur d'appui additionnelle c . Cette largeur tient compte de la flexibilité de la semelle du T-équivalent et la transforme en une semelle rigide équivalente. Elle est déterminée grâce à l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] (quelle que soit la géométrie de la platine d'extrémité).

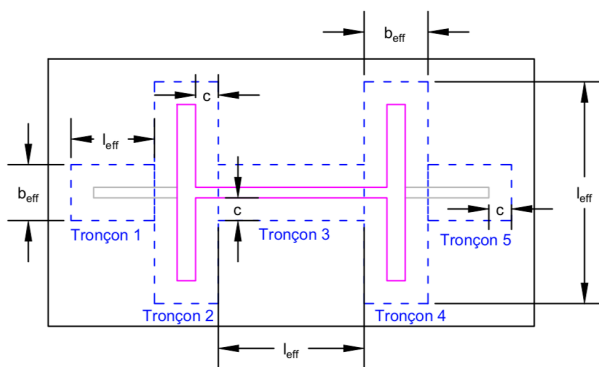


Figure 72 - Tronçons en T comprimés d'une section en I raidie

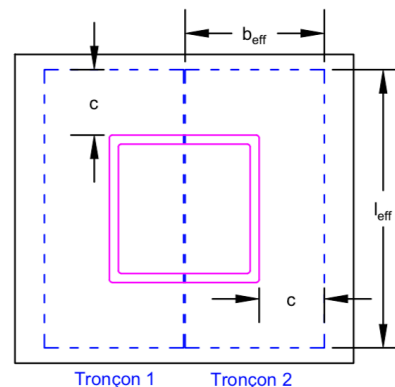


Figure 73 - Tronçons en T comprimés d'une section carrée

Étape 3 :

A cette étape, l'aire de répartition de l'effort de compression, pour chacun des T-équivalents, est définie, grâce aux dimensions l_{eff} et b_{eff} .

Cette aire peut être limitée par les dimensions de la platine. C'est le cas lorsque les débordements de la platine par rapport aux contours du profilé sont inférieurs à la largeur d'appui additionnelle. La platine est alors dite « à projection courte ». La résistance du tronçon est donc diminuée par rapport à un cas où une platine dite « à projection étendue » serait utilisée. Les longueurs de débords par rapport aux contours du profilé, pour ce second type de platine, excèdent la distance c .

Comme on peut le constater sur la Figure 73, il arrive que les aires de répartition sous certaines parties du profilé recouvrent complètement d'autres parties. Dans ce cas, la résistance des tronçons recouverts n'est pas à considérer ; celle-ci étant intrinsèquement prise en compte dans l'évaluation de la résistance des tronçons qui la recouvrent.

Remarquons que, pour les sections en I ou H, l'Eurocode partie 1-8 [6] ne considère que la contribution des semelles pour la reprise d'un effort axial de compression, ce qui peut, dans certains cas (comme celui de la Figure 72), vraiment influencer l'évaluation de l'effort de compression maximal repris par l'assemblage boulonné. Ainsi, sous compression seule, il est généralement plus avantageux de considérer la contribution des tronçons en T sous l'âme et les raidisseurs (se référer à l'ouvrage [21]).

Nous verrons à la *Section 5* de ce chapitre que cela n'est, par contre, pas toujours le cas lorsqu'une interaction avec l'effort fléchissant intervient.

Dans la publication [9], il est proposé de définir une seule surface uniforme de diffusion des contraintes de compression pour toute la section. Dans cette publication, l'effort maximal transmissible est donc déterminé en une seule fois plutôt qu'en additionnant la contribution des différents tronçons en T. Cependant, cette méthode s'éloigne de ce qui est proposé dans l'Eurocode. Or, l'objectif est de pouvoir dimensionner les pieds de poteaux sur base des Eurocodes.

Étape 4 :

L'effort maximal transmissible par un tronçon en T est donné par : $F_{C,i,Rd} = \min(F_{fc,i,Rd}; F_{fjd,i,Rd})$

$F_{fc,i,Rd}$ correspond à la résistance à la compression de l'âme du tronçon en T i [5].

$F_{fjd,i,Rd}$ est évalué en multipliant la résistance à la pression localisée de la fondation par l'aire de répartition de l'effort de compression pour le tronçon considéré.

Étant donné que les assemblages considérés dans ce projet sont symétriques, seule l'étude des tronçons situés d'un côté ou à cheval sur les deux côtés de l'assemblage est nécessaire. Par exemple, pour le cas de la *Figure 72*, l'évaluation de l'effort maximal transmissible par les tronçons 1, 2 et 3 est suffisante.

La somme des efforts maximaux transmissibles ($\sum_i F_{C,i,Rd}$ avec i le nombre de tronçons en T comprimés) par chacun des tronçons en T donne l'effort de compression maximal transmissible par l'assemblage boulonné.

3.4.2. Étude des modes de ruine supplémentaires

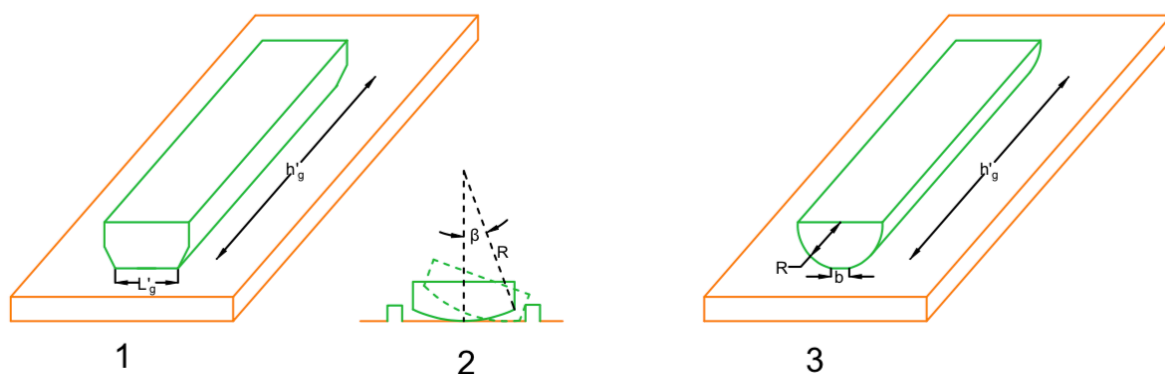
Comme pour le dimensionnement sous un effort de traction, dans certains cas, l'étude seule des tronçons en T ne suffit pas à la caractérisation du comportement global de l'assemblage boulonné soumis à un effort de compression.

Pour la solution 1-1, l'effort de compression est transmis directement du poteau aux plats supérieurs du système d'articulation. Par pression diamétrale, ces plats sollicitent l'axe d'articulation en cisaillement, qui transmet l'effort au plat inférieur par pression diamétrale également. Le reste de l'assemblage est ensuite modélisé par un tronçon en T.

Pour la solution 1-2, l'effort est directement transmis du poteau au grain. La section du grain doit donc être suffisante pour supporter l'effort de compression appliqué. Cette vérification est prise en compte dans l'étude des tronçons comprimés.

Au fil des rotations, un matage du grain se produit (*Figure 74*). Ce matage déforme la surface inférieure du grain. Cette surface devient cylindrique. Celle-ci est parfois déjà façonnée en atelier afin d'obtenir une meilleure articulation. Les nouvelles dimensions obtenues sont définies dans l'ouvrage [17]. L'effort de compression est alors diffusé de cette surface cylindrique dans la plaque d'assise et dans la fondation. Ces éléments peuvent être modélisés et vérifiés comme un tronçon en T-équivalent.

En outre, la transmission de l'effort de compression induit une pression de contact, entre le grain et la platine, qui doit être vérifiée en utilisant les formules de pression de Hertz (voir ouvrage [17]).



Légende – 1 : Dimensions de départ ; 2 : Matage ; 3 : Dimensions après matage
 Figure 74 - Matage du grain de la solution 1-2 sous un effort de compression

Pour les solutions 1-3, 1-4, 2-1 et 2-3, l'étude des tronçons en T suffit à la caractérisation de l'assemblage boulonné soumis à un effort de compression. En effet, même si un châssis est utilisé, si la section du profilé est modifiée ou si des raidisseurs de platine sont mis en œuvre, la méthode reste la même.

De plus, l'utilisation d'une platine de préscellement avec les solutions 1-4 et 2-1 n'a que peu d'influence sur la résistance. Son utilisation impose juste une valeur de 2/3 pour le coefficient de scellement, utile à la détermination de la résistance à la pression localisée du béton, puisque la clause 6.2.5 (7) de l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] n'a plus lieu d'être.

Contrairement au cas de la traction, l'article [20] fournit les éléments nécessaires à l'évaluation de l'effort maximal de compression transmissible par la solution 2-2 avec ou sans platine d'extrémité. Les modes de ruine possibles d'une telle figuration sont : la rupture par perte d'adhérence, la rupture par poinçonnement du béton, la rupture par fissuration excessive du béton. L'évaluation de l'effort maximal relatif à ce dernier mode de ruine est similaire à celle d'un tronçon en T équivalent. Les règles utilisées dans l'article [20] pourront être facilement adaptées afin de déterminer la part d'effort normal pouvant être reprise par les connecteurs, ceux-ci ayant un comportement analogue à la platine d'extrémité.

3.4.3. Ouvrages de référence

Dans cette section, l'ensemble des vérifications à mener pour déterminer l'effort de compression maximal transmissible par l'assemblage boulonné est synthétisé.

Les explications relatives au *Tableau 9* sont identiques à celles fournies pour le *Tableau 6*, qui concerne l'étude en traction.

Composantes	Modes de ruine possibles ou effets susceptibles de provoquer la ruine	Ouvrages de référence
Profilé	Résistance en section des parois	[5]
Raidisseurs de platine	Résistance en section	[5]
Connecteurs et/ou platine d'extrémité	- Flexion	[20]
Platine d'extrémité	- Flexion	[6]
Grain	- Pression de contact	[17]
	- Résistance en section	[5]
Plats supérieurs	- Résistance en section	[6]
	- Pression diamétrale	[6]
Axe d'articulation	- Cisaillement	[6]
Plat inférieur	- Résistance en section	[6]
	- Pression diamétrale	[6]
Plaque d'assise	- Flexion	[6]
Béton	- Pression localisée	[6]
Interface béton-colonne	- Perte d'adhérence	[20]
	- Poinçonnement	[20]
	- Fissuration	[20]

Tableau 9 - Identification dans les ouvrages de référence des règles nécessaires à l'évaluation de l'effort de compression maximal transmissible par l'assemblage boulonné

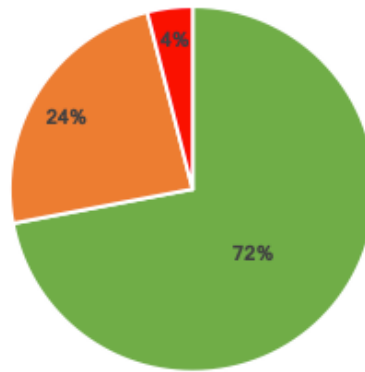
3.5. Étude de l'assemblage en pied de poteau

L'effort maximal transmissible en pied de poteau correspond au minimum entre celui transmissible par la colonne, par les soudures et par l'assemblage boulonné.

Les dispositions constructives (dimensions des éléments, longueurs minimales d'ancrage, nuances d'acier, etc.) seront toujours déterminées de façon à ce que la résistance de l'assemblage du pied de poteau ne soit pas égale à la résistance d'une composante provoquant une ruine fragile de l'assemblage.

Comme pour l'étude en traction, nous concluons l'étude du dimensionnement sous un effort de compression en faisant l'état des ouvrages desquels proviennent les règles nécessaires à l'évaluation de l'effort de compression maximal transmissible, pour l'ensemble des configurations du *Chapitre 2*. Parmi toutes les règles nécessaires au dimensionnement des assemblages du *Chapitre 2* soumis à de la compression seule, 72% d'entre-elles sont fournies par les Eurocodes (*Figure 75*), 24% par des documents récents. Enfin, 4% des règles proviennent de documents dont les principes sont souvent dépassés.

Les Eurocodes couvrent donc une moins grande proportion des règles relatives au dimensionnement des pieds de poteaux en compression qu'en traction.



Légende – Eurocodes, documents récents, documents anciens
 Figure 75 - État des règles fournies par les Eurocodes pour le dimensionnement en compression

4. Dimensionnement des assemblages soumis à de la flexion

Dans cette section, les éléments nécessaires au dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux encastres, étudiés au *Chapitre 2* (solutions de base 2-1, 2-2, 2-3 et leurs variantes), soumis à de la flexion seule sont fournis. Les études sont menées en considérant le moment appliqué autour d'un seul des deux axes principaux à la fois (pas de bi-flexion).

Dans le cas de la flexion, les trois parties principales de l'assemblage sont directement étudiées. En effet, il n'y a pas lieu de définir les composantes actives de l'assemblage. Lorsqu'un moment de flexion est appliqué seul, l'assemblage est partiellement comprimé et partiellement tendu. La séparation entre la zone comprimée et la zone tendue se fait au niveau de l'axe de rotation. Les composantes actives pour chacune des parties de l'assemblage sont donc identiques à celles identifiées dans les *Sections 2* et *3* de ce chapitre.

4.1. Étude de la colonne

La section de la colonne est vérifiée à l'aide des règles habituelles de vérification d'une section en acier soumise à de la flexion, fournies par l'Eurocode 3 partie 1-1 [5]. Ces règles permettent d'obtenir le moment résistant, plastique ou élastique, suivant la classe de la section. Ce moment résistant correspond à l'effort de flexion maximal applicable à la colonne.

La contribution des éventuels raidisseurs de platine, à la résistance en section de la colonne, est toujours négligée. Néanmoins, la section de ces derniers devra être suffisante pour reprendre l'effort qui leur est transmis. De plus, s'ils se trouvent dans la partie comprimée de l'assemblage, leurs dimensions seront telles que le voilement soit évité.

4.2. Étude des soudures

L'effort maximal transmissible par les soudures est relatif à la soudure pouvant transmettre le plus petit effort parmi les soudures potentiellement actives suivantes :

- Les soudures entre la colonne et la platine d'extrémité
- Les soudures entre les raidisseurs et la platine d'extrémité ;
- Les soudures entre les cornières et la colonne ;
- Les soudures entre les plats des trous surdimensionnés et l'élément en acier sur lequel ils sont fixés ;
- Les soudures entre les plats horizontaux d'un système fixé par châssis et les raidisseurs de platine.

Afin de déterminer l'effort de flexion maximal transmissible par chacune de ces soudures, les mêmes éléments que ceux nécessaires à la détermination de l'effort de traction maximal transmissible par les soudures sont utilisés.

4.3. Étude de l'assemblage boulonné

L'application d'un moment de flexion, autour de l'axe x ou y de la section (la bi-flexion n'étant pas étudiée dans le cadre de ce projet), implique la mise en compression d'une partie de l'assemblage et la mise en traction de l'autre, la division se faisant suivant l'axe de rotation. L'effort de flexion maximal transmissible sera donc relatif à la plus faible de ces deux parties de l'assemblage.

Afin de déterminer celui-ci, pour chacune des composantes actives de la partie comprimée de l'assemblage, on détermine d'abord l'effort maximal de compression que la composante peut reprendre. Ensuite, en multipliant l'effort obtenu par son bras de levier par rapport à l'axe de rotation, on obtient le moment de flexion que la composante est capable de supporter. En agissant de la sorte pour toutes les composantes de la partie comprimée, l'effort de flexion maximal transmissible par la partie comprimée de l'assemblage est obtenu. Il est pris égal au moment maximal transmissible par la plus faible des composantes de la partie comprimée.

L'étude de la partie tendue est effectuée de la même façon. Le moment maximal transmissible par l'assemblage boulonné correspondra alors au moment le plus faible entre celui obtenu pour la partie comprimée et celui obtenu pour la partie tendue.

Pour l'étude de chacune des deux parties de l'assemblage (partie comprimée et partie tendue), les éléments fournis aux sections précédentes peuvent être réutilisés. L'effort de flexion maximal transmissible est donc, déterminé sur base de la modélisation en tronçons en T-équivalents proposée par l'Eurocode. Comme pour la traction et pour la compression, cette modélisation permet de déterminer l'effort maximal transmissible en tenant compte de la majorité des modes de ruine susceptibles de se produire.

Cependant, les modes de ruine supplémentaires, indépendants des tronçons en T, étudiés en traction et compression, restent valables en flexion. Toutefois, dans ce cas également, on fera en sorte que l'effort de flexion maximal transmissible soit relatif à un des modes de ruine pris en compte par les tronçons en T. En effet, les dispositions constructives sont généralement choisies telles que les efforts susceptibles de provoquer les modes de ruine, non pris en compte par les tronçons en T, soient supérieurs à ceux admissibles par les tronçons en T.

Dans le cas de la flexion seule, il n'y a pas lieu d'établir le tableau de synthèse, comme en traction seule et en compression seule, puisque les éléments nécessaires à l'étude en flexion seule sont identiques au cas de la traction et de la compression.

Néanmoins, quelques spécificités propres à l'étude en flexion sont à noter. Celles-ci sont présentées dans les deux paragraphes suivants.

4.3.1. Étude des tronçons en T-équivalents

Afin de déterminer l'effort de flexion maximal transmissible par les tronçons en T, les concepts de l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] sont utilisés.

Cependant, les formules proposées par l'Eurocode sont développées pour des sections en I ou H. Or, les études menées dans le cadre de ce projet prennent en compte des géométries de section plus variées. Ainsi, ci-après, une adaptation des formules de l'Eurocode, réalisée à l'aide de l'ouvrage [21], est proposée afin que toutes les géométries d'assemblage boulonné, proposées au *Chapitre 2*, puissent être étudiées.

Quelle que soit la configuration considérée, le moment résistant de l'assemblage est égal au minimum entre :

- Le moment résistant calculé sur base de la résistance des tronçons en T tendus :

$$M_{T,Rd} = \sum_i F_{T,i,Rd} \cdot (z_{T,i} + z_C) \text{ avec}$$

i , le nombre de tronçons en T tendus dans la partie tendue de l'assemblage ;

$F_{T,i,Rd}$, la résistance du tronçon tendu en T i ;

z_C , la distance entre le centre de compression et l'axe de rotation du poteau, le centre de compression étant défini comme le centre de gravité de l'ensemble des aires de répartition des tronçons en T de la partie comprimée :

$$z_C = \frac{\sum_i F_{C,i,Rd} \cdot (z_{C,i} + z_T)}{\sum_i F_{C,i,Rd}} ;$$

$z_{T,i}$, la distance entre le centre de gravité du tronçon en T i tendu et l'axe de rotation du poteau.

- Le moment résistant calculé sur base de la résistance des tronçons en T comprimés :

$$M_{C,Rd} = \sum_i F_{C,i,Rd} \cdot (z_{C,i} + z_T) \text{ avec}$$

i , le nombre de tronçons en T comprimés dans la partie comprimée de l'assemblage ;

$F_{C,i,Rd}$, la résistance du tronçon comprimé en T i ;

z_T , la distance entre le centre de traction et l'axe de rotation du poteau, le centre de traction étant défini comme le centre de résistance, situé au droit de la résultante des résistances en traction de toutes les rangées de tiges du côté en traction de l'assemblage :

$$z_T = \frac{\sum_i F_{T,i,Rd} \cdot (z_{T,i} + z_C)}{\sum_i F_{T,i,Rd}} ;$$

$z_{C,i}$, la distance entre le centre de gravité du tronçon en T i comprimé et l'axe de rotation du poteau.

Les paramètres z_T , z_C , $z_{T,i}$ et $z_{C,i}$ sont définis à la Figure 76 et à la Figure 77 pour deux exemples de configurations d'assemblage. Pour le premier exemple, nous constatons que négliger la contribution de l'âme pour déterminer la résistance en flexion de l'assemblage a moins d'impact qu'en compression seule. Pour le second exemple, nous constatons que l'agencement des tiges n'est pas efficace. En effet, une seule tige contribue à la résistance de la partie en traction de l'assemblage. Une configuration avec une tige dans chaque coin de la platine serait plus efficace.

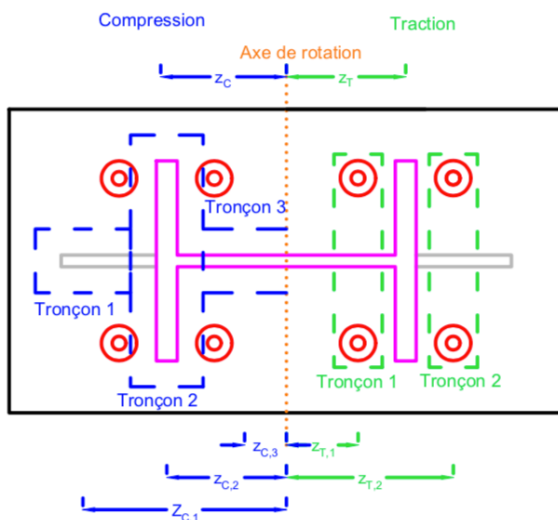


Figure 76 - Profilé en I raidi soumis à de la flexion seule

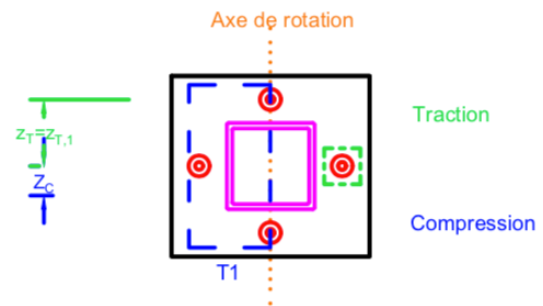


Figure 77 - Section carrée soumise à de la flexion seule

Ces formules sont applicables pour les solutions 2-1 et 2-3 et leurs variantes. Pour un moment de flexion autour de l'axe faible, les mêmes principes sont utilisés avec cette fois, la section divisée en une partie comprimée et l'autre tendue suivant un axe parallèle à l'axe faible.

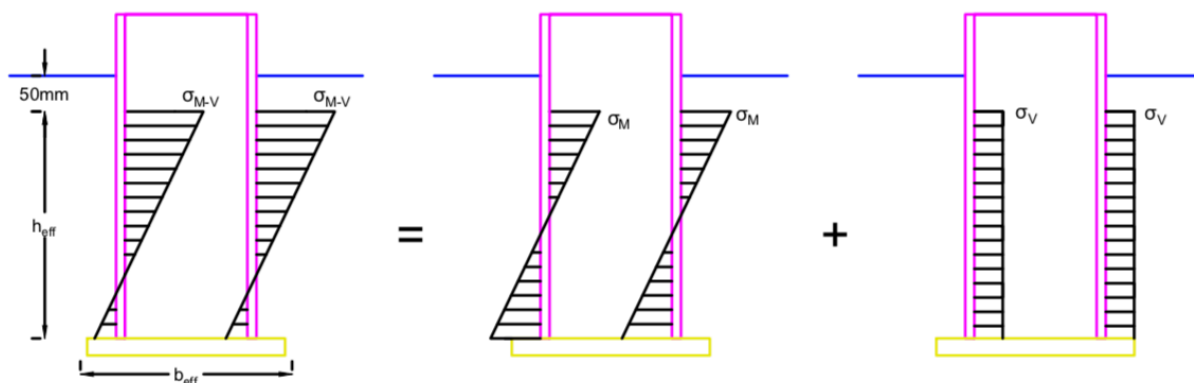
4.3.2. Étude des modes de ruine supplémentaires

Pour les solutions 2-1, 2-3 et leurs variantes, les modes de ruine supplémentaires à considérer pour la partie comprimée et la partie tendue de l'assemblage sont identiques à ceux étudiés, respectivement, en compression seule et en traction seule.

Pour la solution 2-2, comme en traction seule et en compression seule, la modélisation en tronçons en T-équivalents n'est pas utilisée.

Pour cette solution, aucune information n'a pu être trouvée concernant la résistance à la flexion seule. L'article [20] fournit les éléments nécessaires au dimensionnement de ce type d'encastrement uniquement sous une combinaison d'efforts M-V. Il donne les éléments utiles à la détermination de la hauteur d'encastrement efficace minimale nécessaire pour résister à cette combinaison. Néanmoins, cette règle de calcul peut être utilisée en considérant l'effort de cisaillement nul.

Cette règle est établie en transposant les efforts appliqués à la structure M_{Ed} et V_{Ed} au centre de gravité de la surface de contact efficace entre le profilé et le béton. Cette surface rectangulaire est définie par les dimensions l_{eff} et b_{eff} . On vérifie alors que les contraintes de compression, σ_M et σ_v (voir Figure 78) induites respectivement par les efforts transposés M_{eff} et V_{eff} , ne dépassent pas la résistance du béton ($\sigma_{M-V} = \sigma_M + \sigma_v \leq \sigma_b$).



Légende – Colonne, béton, platine d'extrémité
Figure 78 - Répartition des contraintes pour la partie de la colonne de la solution 2-2 noyée dans le béton sous une combinaison d'efforts M-V

4.4. Étude de l'assemblage en pied de poteau

Le moment maximal transmissible par l'assemblage en pied de poteau est égal au moment résistant minimal entre celui correspondant à l'assemblage boulonné, celui de la colonne et celui des soudures. L'application de ce moment entrainera la ruine de la partie la plus faible et donc, la ruine de l'assemblage en pied de poteau.

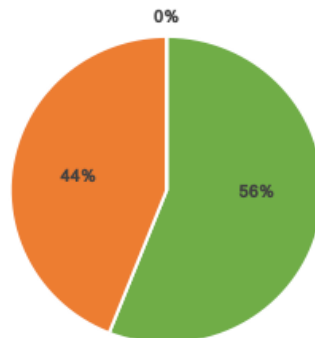
De même que précédemment, nous ferons en sorte que le moment maximal transmissible soit relatif à une composante présentant un moment de ruine ductile.

En conclusion, pour l'étude en flexion seule des pieds de poteaux, les règles des Eurocodes suffisent à la détermination du moment résistant de la colonne et des soudures.

La détermination du moment maximal transmissible par l'assemblage boulonné repose principalement sur les mêmes éléments que ceux utilisés en traction seule et en flexion seule. Ainsi,

pour faire un état de ce que couvrent les Eurocodes, concernant l'étude en flexion seule de toutes les configurations d'assemblage boulonné étudiées au *Chapitre 2*, nous ne considérons que les règles différentes de celles utilisées en traction seule et flexion seule.

En résumé, le diagramme de la *Figure 79* montre la proportion de règles couverte par les Eurocodes.



Légende – Eurocodes, documents récents, documents anciens

Figure 79 - État des règles fournies par les Eurocodes pour le dimensionnement en flexion

5. Dimensionnement des assemblages soumis à une combinaison M-N

Dans cette section, les éléments nécessaires au dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux encastrés étudiés au *Chapitre 2* (solutions de base 2-1, 2-2, 2-3 et leurs variantes), soumis à une combinaison d'efforts M-N sont fournis. Les études sont menées en considérant le moment appliqué autour d'un seul des deux axes principaux à la fois (pas de bi-flexion).

De même qu'en flexion seule, les trois parties principales de l'assemblage sont directement étudiées. En effet, il n'y a pas lieu de définir les composantes actives de l'assemblage. En fonction du cas de répartition des efforts (voir *Section 5.3.1*), l'assemblage est soit complètement comprimé, soit partiellement comprimé et partiellement tendu, soit complètement tendu. Les composantes actives de l'assemblage ou de chacune des parties de l'assemblage sont donc identiques à celles identifiées dans les *Sections 2* et *3* de ce chapitre.

Pour chacune des trois parties de l'assemblage, dans les sections suivantes, les efforts maximaux transmissibles (effort axial et effort de flexion) sont définis en tenant compte de l'interaction M-N. Néanmoins, ceux-ci devront être comparés aux efforts maximaux obtenus en flexion seule et en traction ou compression seule. Les valeurs minimales seront retenues pour chaque type d'efforts.

5.1. Étude de la colonne

Au niveau de la colonne, l'application d'un effort axial, en plus d'un moment, réduit le moment plastique ou élastique résistant. Ce moment résistant réduit est déterminé à l'aide des règles habituelles de vérification d'une section en acier soumise à une combinaison d'efforts M-N. Ces règles sont fournies par l'Eurocode 3 partie 1-1 [5]. Elles sont différentes en fonction de la classe de la section. Celles-ci tiennent compte de l'effort normal appliqué et de l'effort normal résistant.

Le moment résistant réduit correspond à l'effort de flexion maximal transmissible par la colonne sous une combinaison d'efforts M-N. L'effort axial maximal pouvant être appliqué reste quant à lui inchangé par rapport à l'étude sous un effort axial seul.

La contribution des raidisseurs de platine est toujours négligée. Néanmoins, la section de ces derniers devra être suffisante pour reprendre l'effort qui leur est transmis. De plus, s'ils se trouvent dans la partie comprimée de l'assemblage, leurs dimensions seront telles que le voilement soit évité.

5.2. Étude des soudures

Les mêmes soudures que celles identifiées en flexion seule sont susceptibles d'être soumises à une combinaison d'efforts M-N.

Afin de vérifier les soudures sous une combinaison M-N, l'inégalité proposée par l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] est utilisée. Celle-ci se base sur les contraintes induites par les efforts. Elle permet de vérifier que les soudures résistent à la combinaison d'efforts appliquée.

Pour chacune des soudures, en introduisant dans cette inégalité l'effort axial appliqué, le moment de flexion maximal admissible pour une combinaison d'efforts M-N est obtenu et inversement, si l'on veut connaître l'effort axial maximal transmissible connaissant le moment appliqué.

Parmi toutes les soudures, en fonction de la manière de procéder, l'effort axial ou le moment appliqué est retenu comme étant l'effort résistant. La valeur obtenue par résolution de l'inégalité, pour respectivement le moment résistant ou l'effort axial résistant, est retenue comme étant la valeur de l'effort à ne pas dépasser afin de ne pas provoquer la ruine des soudures et donc, de l'assemblage en pied de poteau.

Les recommandations en termes de dimensions des gorges de soudures de l'ouvrage [21], présentées dans la section dédiée au dimensionnement en traction, sont encore applicables.

5.3. Étude de l'assemblage boulonné

Afin de déterminer les efforts maximaux transmissibles par les tronçons en T de l'assemblage boulonné, deux méthodes peuvent être utilisées. Soit, le couple d'efforts résistants est déterminé sur base de l'adaptation des formules analytiques fournies par l'Eurocode 3 partie 1-8 [6]. Soit, il est déterminé à partir du diagramme d'interaction M-N.

En théorie, des études complémentaires à celles menées pour les tronçons en T devraient être réalisées pour certaines composantes susceptibles de reprendre une combinaison d'efforts M-N. Parmi ces composantes, nous retrouvons les cornières et les boulons de fixation des cornières sur la colonne. Sous la combinaison d'un effort de traction et d'un effort de flexion, la section de ces composantes doit être suffisante pour résister à cette combinaison.

Néanmoins, dans le cadre de ce projet, nous nous limitons à étudier l'interaction M-N pour les tronçons en T, celle-ci étant particulièrement spécifique aux assemblages de pieds de poteaux. Nous considérons que les dispositions constructives pour les autres composantes, soumises à une combinaison M-N, seront telles que les efforts maximaux transmissibles par celles-ci seront supérieurs à ceux acceptables par les tronçons en T.

5.3.1. Formules analytiques

Avant de déterminer le couple d'efforts résistants, le cas de répartition des efforts doit être défini.

Lorsque l'assemblage est soumis à une combinaison d'efforts M-N, il ne se divise plus toujours en deux parties suivant l'axe de rotation, comme dans le cas de la flexion seule. La répartition des efforts dans l'assemblage dépend de l'excentricité de l'effort axial $e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$ ($M_{Ed} > 0$ dans le sens des aiguilles d'une montre et $N_{Ed} > 0$ en traction) et de la nature de celui-ci (traction ou compression).

Quatre cas de répartition des efforts sont distingués et présentés dans le *Tableau 10*. Dans le tableau, les cas de répartition sont illustrés pour la solution 2-4 avec deux tiges d'ancrage de chaque côté de

l'assemblage, en négligeant la contribution de l'âme pour la résistance de la partie comprimée de l'assemblage. Toutefois, le principe est identique quelle que soit la configuration.

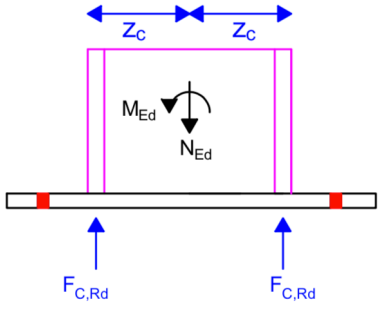
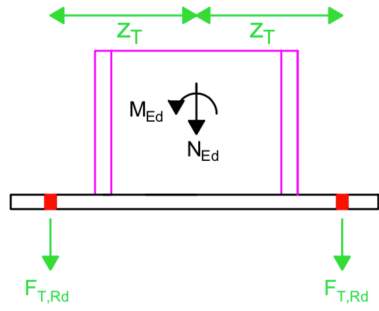
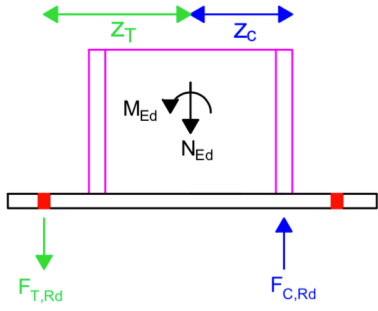
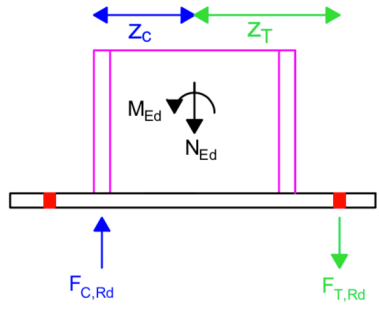
<p>Cas 1 : $N_{Ed} \leq 0$ et $0 < e < z_C$ ou $-z_C < e \leq 0$ L'effort normal de compression est dominant et les deux côtés de l'assemblage sont comprimés.</p>	<p>Cas 2 : $N_{Ed} > 0$ et $0 < e < z_T$ ou $-z_T < e \leq 0$ L'effort normal de traction est dominant et les deux côtés de l'assemblage sont tendus.</p>
	
<p>Cas 3 : $N_{Ed} > 0$ et $e > z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e \leq -z_C$ Le moment fléchissant est dominant et le côté gauche de l'assemblage est tendu et le droit comprimé.</p>	<p>Cas 4 : $N_{Ed} > 0$ et $e \leq -z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e > z_C$ Le moment fléchissant est dominant et le côté droit de l'assemblage est tendu et le gauche comprimé.</p>
	

Tableau 10 - Cas de répartition des efforts dans un assemblage soumis à une combinaison M-N (Eurocode 3 partie 1-8 [6])

Dans l'Eurocode 3 partie 1-8 [6], z_C est différencié en fonction du côté comprimé de l'assemblage. L'Eurocode propose donc une valeur $z_{C,r}$ lorsque le côté droit de l'assemblage est comprimé et $z_{C,l}$, lorsque le côté gauche est comprimé. Il en est de même pour z_T , en traction. Toutefois, ayant fait l'hypothèse que toutes les configurations étudiées sont symétriques, nous avons $z_C = z_{C,r} = z_{C,l}$. Pour la même raison, $z_T = z_{T,r} = z_{T,l}$. Nous constatons donc que pour les solutions étudiées dans le cadre de ce projet, les cas 3 et 4 de répartition des efforts sont identiques par symétrie.

Afin de déterminer le moment de flexion maximal transmissible par les tronçons en T sous une combinaison d'efforts M-N, les formules proposées par l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] sont utilisées. Néanmoins, le champ d'application de celles-ci est restreint. En effet, ces formules sont développées pour une colonne constituée d'un profilé en I ou H avec une seule rangée de tiges de chaque côté de l'assemblage et elles ignorent la contribution de l'âme pour déterminer la résistance de la partie comprimée.

Or, les configurations étudiées dans ce projet sont beaucoup plus variées : le nombre de rangées de tiges est variable, la géométrie du profilé n'est pas toujours un I ou H et l'âme des profilés en I ou H et les raidisseurs peuvent apporter une contribution non négligeable à la résistance de l'assemblage.

Ainsi, comme en flexion seule, à l'aide de l'ouvrage [21], les formules proposées par l'Eurocode pour déterminer le moment résistant, sous une combinaison M-N, sont généralisées afin d'être rendues applicables aux solutions 2-1 et 2-3 ainsi qu'à toutes les variantes.

Cette généralisation est réalisée en modifiant les paramètres suivants dans les formules proposées par l'Eurocode :

1. Les paramètres $z_{C,r}$ et $z_{C,l}$ sont remplacés par z_C . De même, z_T remplace $z_{T,r}$ et $z_{T,l}$. Par ailleurs, z_T et z_C sont calculés à partir des formules proposées à la *Section 4.3* de ce chapitre ;
2. En utilisant l'hypothèse de symétrie, on sait que l'effort maximal transmissible par un tronçon situé du côté droit de l'assemblage est égal à l'effort maximal transmissible par ce même tronçon situé du côté gauche de l'assemblage. Ainsi, dans les formules de l'Eurocode, les efforts $F_{C,l,Rd}$ et $F_{C,r,Rd}$ peuvent être remplacés par $F_{C,Rd}$; de même, $F_{T,l,Rd}$ et $F_{T,r,Rd}$ par $F_{T,Rd}$;
3. Les formules de l'Eurocode ne tiennent compte que de la contribution d'un seul tronçon tendu ou comprimé pour la détermination du moment résistant. Or, pour de nombreuses configurations, plusieurs tronçons interviennent. Ainsi, les moments résistants relatifs à la partie comprimée de l'assemblage sont déterminés en utilisant le terme suivant au numérateur des formules de l'Eurocode :

$$\sum_i F_{C,i,Rd} \cdot (z_{C,i} + z) \text{ avec}$$

i , le nombre de tronçons comprimés situés du même côté de l'assemblage par rapport à l'axe de symétrie ;
 $z = z_C$, pour le cas 1 de répartition et $z = z_T$, pour les cas 3 et 4.

De même, pour la partie en traction de l'assemblage, les numérateurs deviennent :

$$\sum_i F_{T,i,Rd} \cdot (z_{T,i} + z) \text{ avec}$$

i , le nombre de tronçons tendus situés du même côté de l'assemblage par rapport à l'axe de symétrie ;
 $z = z_T$, pour le cas 2 de répartition et $z = z_C$, pour les cas 3 et 4.

Reprenons l'exemple de la *Figure 76*, pour le cas 1 de répartition des efforts. Avec les modifications suggérées, les formules de l'Eurocode, permettant de déterminer le moment maximal transmissible pour un assemblage soumis à une combinaison M-N, deviennent :

$$M_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{C,1,Rd} \cdot (z_{C,1} + z_C) + F_{C,2,Rd} \cdot (z_{C,2} + z_C) + F_{C,3,Rd} \cdot (z_{C,3} + z_C)}{\frac{z_C}{e} + 1} \\ \frac{F_{C,1,Rd} \cdot (z_{C,1} + z_C) + F_{C,2,Rd} \cdot (z_{C,2} + z_C) + F_{C,3,Rd} \cdot (z_{C,3} + z_C)}{\frac{z_C}{e} - 1} \end{array} \right.$$

Cette généralisation est valable quel que soit l'axe autour duquel le moment est appliqué. En fonction de l'axe de rotation choisi, les tronçons en T définis seront différents.

L'effort axial maximal transmissible est alors déterminé grâce à l'excentricité puisque : $e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}}$.

5.3.2. Diagramme d'interaction M-N

La construction du diagramme d'interaction M-N permet d'obtenir le domaine de résistance de l'assemblage. Tout couple d'efforts M-N appliqué se situant dans le périmètre défini par le diagramme fait partie du domaine de capacité de l'assemblage. A l'inverse, si le couple se situe en dehors du

périmètre, il entrainera la ruine de l'assemblage. En effet, chaque point situé sur le périmètre donne en ordonnée la valeur de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné. En simultanée de cet effort axial, le moment maximal pouvant être appliqué est donné en abscisse par la valeur du moment résistant de l'assemblage.

L'Eurocode fournit une procédure permettant de construire le diagramme d'interaction M-N à partir de huit points (voir *Figure 80*). Ces points correspondent aux cas de chargement suivants :

1. Traction pure ;
2. Passage d'un effort de traction dominant à un moment positif dominant ;
3. Moment positif maximum ;
4. Passage d'un moment positif dominant à un effort de compression dominant ;
5. Compression dominante ;
6. Passage d'un effort de compression dominant à un moment négatif dominant ;
7. Moment négatif maximum ;
8. Passage d'un moment négatif dominant à un effort de traction dominant.

Grâce à la construction de ce diagramme, nous constatons que le moment résistant est augmenté lors de l'application simultanée d'un effort axial faible et d'un moment de flexion, par rapport à un cas de chargement en flexion seule. L'interaction M-N peut donc être bénéfique pour certaines configurations d'assemblage.

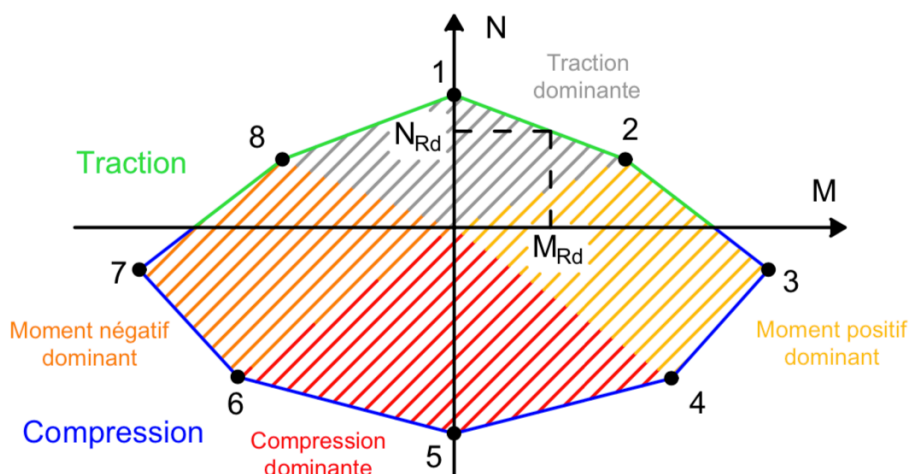


Figure 80 - Diagramme d'interaction M-N construit sur base de l'Eurocode

Les assemblages étudiés sont symétriques. Par conséquent, la détermination des coordonnées des points 1 à 5 suffit à la construction du diagramme. Les différentes coordonnées sont déterminées à partir de la résistance de l'assemblage à la traction et à la compression pure, résistances fournies respectivement aux *Sections 2* et *3* de ce chapitre. Les coordonnées sont obtenues par manipulation des règles de l'Eurocode, comme cela est proposé dans l'ouvrage [21], afin de généraliser la construction du diagramme d'interaction à toutes les solutions étudiées au *Chapitre 2*.

Le périmètre du diagramme d'interaction est alors défini en reliant les points. La méthode proposée par l'Eurocode est donc basée sur le principe d'interpolation linéaire et ne permet pas d'obtenir un diagramme d'interaction précis.

Afin d'obtenir un diagramme d'interaction plus précis, la méthode proposée dans l'article [9] est utilisée. Cette méthode, beaucoup plus fastidieuse, permet d'obtenir autant de points du périmètre du diagramme d'interaction que souhaités et donc, de construire celui-ci de manière plus précise. Les coordonnées de ces points sont obtenues à partir de formules donnant des couples $M_{Rd} - N_{Rd}$. Ces

formules sont fonction des paramètres de l'assemblage, des dimensions de la zone de compression, de la force dans les boulons d'ancrage et de la résistance du béton à la compression.

Ces formules ne sont valables que pour un assemblage encasté avec deux tiges d'ancrage à l'extérieur de chacune des deux semelles. L'usage de la méthodologie proposée par l'article [9] est par conséquent limité, à moins que les formules soient adaptées à tous les autres cas étudiés dans ce projet.

5.4. Étude de l'assemblage en pied de poteau

Afin de ne pas entraîner la ruine de l'assemblage en pied de poteau, les couples d'efforts appliqués devront toujours être inférieurs aux couples d'efforts résistants de chacune des trois parties principales de l'assemblage soit, la colonne, les soudures et l'assemblage boulonné.

En conclusion, les Eurocodes couvrent les règles relatives à l'étude des soudures et de la colonne sous une combinaison d'efforts M-N.

Par contre, pour l'assemblage boulonné, comme pour l'étude en flexion seule, ils ne fournissent pas de règles analytiques suffisamment générales pour la détermination du couple d'efforts résistants M-N. Ces règles analytiques sont donc modifiées à l'aide de l'ouvrage [21].

Au lieu d'utiliser les développements analytiques, le couple d'efforts résistants de l'assemblage boulonné peut être déterminé à partir du diagramme d'interaction M-N. L'Eurocode propose de construire ce diagramme par interpolation à partir des coordonnées de huit points. La méthodologie proposée par l'Eurocode est encore une fois trop ciblée. Ainsi, le champ d'application de la méthode de construction du diagramme d'interaction est étendu grâce à l'ouvrage [21]. Dans certains cas, si une plus grande précision est nécessaire, ce diagramme peut être construit à partir de l'article [9].

6. Dimensionnement des assemblages soumis à du cisaillement

6.1. Identification des composantes actives

Comme pour l'étude des assemblages de pieds de poteaux soumis à un effort axial, le *Tableau 11* de la page suivante reprend la descente de charges et donc, toutes les composantes actives lors de la soumission des configurations d'assemblage du *Chapitre 2* à un effort de cisaillement. Ce tableau est construit de la même façon que le *Tableau 3*, concernant la traction.

Ultérieurement, nous verrons qu'à l'interface entre l'assemblage en acier et la fondation en béton, il existe trois modes principaux de transmission de l'effort tranchant. Les composantes actives sont différentes suivant le mode utilisé. Ils sont donc distingués dans le tableau ci-après. Nous verrons par après que, dans certains cas, les modes peuvent être combinés. Les composantes actives sont alors l'ensemble des composantes actives des deux modes regroupés.

Composantes actives	Solutions												
	1-1			1-2			1-3 et 2-3			1-4 et 2-1			2-2
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	/
Colonne	V	V	V	V	V (V5)	V	V	V	V	V	V	V	V
Raidisseurs d'âme et portion d'âme située entre ceux-ci	V2	V2	V2	V2	V2	V2							
Boulons entre les cornières et la colonne							V (V6)	V (V6)	V (V6)				
Soudures entre la colonne et les cornières							V6	V6	V6				
Cornières							V	V	V				
Soudures entre la colonne et les plats supérieurs d'un châssis											V4		
Plats supérieurs d'un châssis											V4		
Soudures entre la colonne et la platine d'extrémité	V (V2)	V (V2)	V (V2)	V (V3, V2)	V (V2, V3, V5)	V (V2, V3)				V	V (V4)	V	
Platine d'extrémité										V	V (V4)	V	
Soudure													
Soudures entre le grain et la platine d'extrémité				V (V3)	V (V3, V5)	V (V3)							
Soudures entre le grain ou la platine d'extrémité et les raidisseurs d'âme et la portion d'âme située entre ceux-ci	V2, V3	V2, V3	V2, V3	V2, V3	V2, V3	V2, V3							
Grain				V	V (V5)	V							
Boîte à grain					V (V10, V5)	V							
Soudures entre la boîte à grain et la plaque d'assise					V (V10, V5)	V							
Soudures entre la platine d'extrémité et les plats supérieurs	V	V	V										
Plats supérieurs	V	V	V										
Axe d'articulation	V	V	V										
Plat inférieur	V	V	V										
Soudures entre le plat inférieur et la plaque d'assise	V	V	V										
Soudures entre les plats et l'élément sur lequel ils sont fixés		V5						V5	V5		V5	V9	
Plats		V5						V5	V5		V5	V9	
Tiges		V			V (V5)			V	V		V	V8, V9	
Plaque d'assise	V	V	V	V		V	V		V	V8		V8, V9	
Soudures entre la bêche et l'élément sur lequel elle est fixée			V			V			V			V	
Bêche			V			V			V			V	
Béton	V	V	V	V	V (V5)		V	V	V	V	V	V	V

Tableau 11 - Composantes actives lors de la transmission des efforts de cisaillement pour les différentes solutions étudiées

Légende du <i>Tableau 11</i>		
Variantes :		Modes de transmission des efforts :
V : Solution de base	V8 : Plaque d'assise	M1 : Frottement M2 : Tiges cisailées M3 : Bêche
V2 : Raidisseurs d'âme	V9 : Trous surdimensionnés et plaque d'assise	
V3 : Raidisseurs d'âme inclinés sans platine d'extrémité	V10 : Les tiges traversent le grain et l'effort tranchant leur est directement transmis	
V4 : Châssis	V11 : Trous surdimensionnés dans la plaque d'assise	
V5 : Trous surdimensionnés		
V6 : Cornières soudées au poteau		

Tableau 11 (suite) – Composantes actives lors de la transmission des efforts de cisaillement pour les différentes solutions étudiées

A partir de ces descentes de charges, l'effort tranchant maximal acceptable par les trois parties principales de l'assemblage peut être déterminé. Pour rappel, ces trois parties sont l'assemblage boulonné, la colonne et les soudures.

6.2. Étude de la colonne

L'effort maximal transmissible dans la direction x est déterminé par la résistance des parties du profilé parallèles à la direction x et celui dans la direction y , par celle des parties parallèles à cette direction. Par exemple, pour une section en I ou H, les semelles résistent lorsque l'effort tranchant est dirigé suivant y et l'âme, s'il est orienté selon x . Le calcul des résistances est réalisé à l'aide de l'Eurocode 3 partie 1-1 [5].

S'il existe des raidisseurs de platine, l'effort maximal transmissible est déterminé en considérant une section située juste au-dessus de ceux-ci. Ainsi, la contribution des raidisseurs à la résistance à l'effort tranchant est négligée. Par contre, si les solutions 1-1 et 1-2 sont utilisées avec des raidisseurs d'âme, il faudra, dans ce cas, vérifier la résistance au cisaillement de la section constituée des raidisseurs d'âme et de la portion d'âme située entre ceux-ci.

La présence d'une bêche peut provoquer des efforts secondaires dans le profilé de la colonne. Par conséquent, ceux-ci mobilisent une partie de la résistance et diminuent donc l'effort maximal qui peut être transmis. Les formules liées à ce cas de figure sont présentées dans la section dédiée à l'assemblage boulonné. Néanmoins, la plupart du temps, comme expliqué dans la section précédente, ces efforts secondaires sont négligés.

6.3. Étude des soudures

Les mêmes règles que celles utilisées pour la détermination de l'effort maximal de traction transmissible par les soudures sont utilisées pour évaluer le comportement en cisaillement des soudures.

L'effort maximal transmissible par les soudures en cisaillement est alors relatif à la plus faible des soudures sollicitées, c'est-à-dire celle qui transmettra l'effort tranchant le plus petit.

Les recommandations en termes de dimensions des gorges de soudures de l'ouvrage [21], présentées dans la section dédiée au dimensionnement en traction, sont encore applicables.

6.4. Étude de l'assemblage boulonné

6.4.1. Effort maximal transmissible

Afin de déterminer l'effort axial maximal transmissible, des tronçons en T-équivalents sont définis. Pour l'étude en cisaillement, il n'y a pas lieu de définir des tronçons en T-équivalents. En effet, d'une part, l'assemblage n'est pas divisé en différents tronçons cisailés. D'autre part, en flexion, l'assemblage peut être partiellement comprimé et partiellement tendu. Par contre, il est toujours complètement cisailé. Ainsi, l'effort maximal acceptable est toujours défini en tenant compte de la résistance de l'assemblage entier.

Une autre différence avec l'effort axial est que l'effort de cisaillement peut être appliqué soit, dans une seule direction à la fois (x ou y) soit, simultanément dans les deux directions principales de l'assemblage. Néanmoins, certaines solutions ne peuvent reprendre un effort tranchant que dans une seule direction. Par exemple, pour les solutions fixées par cornières, l'effort tranchant ne peut être appliqué que dans un plan parallèle à celui de l'aile verticale des cornières. De même, pour la solution 1-1, il ne peut être appliqué que dans la direction perpendiculaire à l'axe d'articulation.

Comme mentionné dans la section précédente, il existe différents modes de transmission de l'effort tranchant à l'interface entre l'assemblage en acier et la fondation en béton. Ces modes sont valables pour toutes les solutions de base à l'exception de la solution 2-2, étudiée ultérieurement.

Premièrement, si l'assemblage est soumis à une combinaison d'effort de cisaillement et d'effort normal de compression, l'effort tranchant est repris, en partie ou totalement, par frottement à l'interface entre la partie en acier de l'assemblage (la plaque d'assise ou la platine d'extrémité) et la fondation en béton. L'effort maximal transmissible par frottement est alors fonction du coefficient de friction entre ces deux éléments.

Dans certains cas de figure, cet effet de friction se développe également à l'interface entre deux éléments en acier :

- Dans le cas de la solution 1-2, à l'interface entre le grain et la plaque d'assise ;
- Dans le cas des solutions 1-4 et 2-1, utilisées avec une plaque d'assise, à l'interface entre la platine d'extrémité et la plaque d'assise ;
- Dans le cas des solutions 1-3 et 2-3, à l'interface entre les cornières et la plaque d'assise.

L'effort maximal transmissible par frottement est alors déterminé en fonction du plus petit coefficient de friction entre celui correspondant à la friction entre deux éléments en acier et celui concernant la friction entre un élément en acier et un élément en béton.

Deuxièmement, si la totalité de l'effort tranchant n'est pas reprise par les effets de frottement, le reliquat est transmis à la fondation en béton soit par cisaillement des tiges, soit par une bêche. Si l'effort axial est nul ou de traction, les tiges ou la bêche reprendront l'entièreté de l'effort de cisaillement. La raideur attirant l'effort, si une bêche est mise en œuvre, l'effort tranchant est d'office transmis par la bêche. L'utilisation simultanée d'une bêche et des tiges en cisaillement n'est pas possible. Une bêche est généralement utilisée lorsque les efforts à transmettre sont importants. Remarquons que si une plaque d'assise est mise en œuvre, l'effort tranchant est transmis à la bêche par flexion des tiges entre la platine d'extrémité et la plaque d'assise. Ainsi, dans ce cas, l'effort maximal transmissible peut être limité par les tiges. La résistance de la bêche ne sera donc pas supérieure à celle des tiges en flexion.

De plus amples informations concernant la transmission des efforts de cisaillement par une bêche et par le cisaillement des tiges sont fournies, respectivement, aux *Sections 6.4.2* et *6.4.3* de ce chapitre.

Le *Tableau 12* synthétise ce qui vient d'être expliqué. Il fournit, en fonction de l'effort axial, l'effort maximal transmissible à l'interface entre la partie en acier de l'assemblage boulonné et la fondation pour chacun des modes de transmission du cisaillement possibles.

Mode de transmission des efforts	Solutions	Effort normal de traction	Effort normal de compression
Frottement	1-1, 1-3, 1-4, 2-1, 2-3	$V_{a,Rd} = 0$	$V_{a,Rd} = V_{f,Rd}$
Frottement + Bêche	1-1, 1-3, 1-4, 2-1, 2-3	$V_{a,Rd} = V_{n,Rd}$	$V_{a,Rd} = V_{f,Rd} + V_{n,Rd}$
Frottement + Cisaillement des tiges	1-1, 1-3, 1-4, 2-1, 2-3	$V_{a,Rd} = n_b \cdot V_{b,Rd}$	$V_{a,Rd} = V_{f,Rd} + n_b \cdot V_{b,Rd}$
Notations			
V_{Rd} ,	effort tranchant résistant, correspondant à l'effort maximal transmissible par l'assemblage boulonné		
$V_{f,Rd}$,	résistance de calcul par frottement		
$V_{n,Rd}$,	résistance de calcul par cisaillement de la bêche		
$V_{b,Rd}$,	résistance de calcul par cisaillement d'une tige		
n_b ,	nombre de tiges		

Tableau 12 - Effort tranchant maximal transmissible par l'assemblage boulonné en fonction du mode de reprise des efforts et de la nature de l'effort axial

La solution 1-2 n'est pas reprise dans le tableau ci-dessus. En effet, dans le cas particulier de cette solution, la transmission de l'effort tranchant est plus complexe. Si une bêche est mise en œuvre, l'effort tranchant n'est pas systématiquement transmis à la fondation par la bêche. Cela dépend des dispositions constructives.

La rigidité du grain étant importante, l'effort tranchant est directement transmis de la colonne au grain. Ensuite, comme mentionné ci-dessus, en présence d'un effort axial de compression, l'effort est, partiellement ou totalement, transféré à la fondation par frottement entre le grain et la plaque d'assise et entre celle-ci et le béton. Si ce frottement n'est pas suffisant ou si l'effort axial est un effort de traction ou nul, deux cas de figure sont distingués.

Premièrement, les tiges ne traversent pas le grain. L'ensemble constitué de la colonne, de la platine et du grain subit une rotation jusqu'à ce que le grain soit en contact avec une des butées de la boîte à grain. A ce moment, l'effort tranchant est transmis à la butée. Cette butée doit résister d'une part à l'effort tranchant et d'autre part, à un moment de flexion créé par cet effort puisque le contact entre le grain et la butée se fait le long de l'arête et non au niveau du centre de gravité de la butée.

La butée de la boîte à grain transmet l'effort à la plaque d'assise. Ensuite, l'effort est transféré soit, par cisaillement des tiges soit, par la bêche. Néanmoins, l'utilisation d'une bêche est indispensable si les trous dans la plaque d'assise sont surdimensionnés.

Remarquons que lors de la rotation du pied de poteau, les tiges se déforment en flexion. Toutefois, leur longueur libre étant importante et la rotation du pied de poteau ne dépassant généralement pas 1/50 de radian, cela ne devrait pas poser de problème.

Deuxièmement, les tiges traversent le grain. Dans ce cas, l'effort tranchant est transmis à la boîte à grain, comme précédemment, si le jeu entre le grain et la boîte à grain est inférieur au jeu entre les tiges et le grain. Sinon, les tiges reprennent l'effort tranchant par cisaillement et le transmettent directement à la fondation, à moins que les trous dans la plaque d'assise ne soient pas surdimensionnés et qu'il existe une bêche ; l'effort est alors transmis à la bêche puis à la fondation. Généralement, vu le caractère aléatoire des conditions de mise en œuvre du pied de poteau, l'effort maximal transmissible est pris égal à l'effort minimal parmi les efforts relatifs à chacun des deux modes de transmission de l'effort tranchant (par les tiges ou par la boîte à grain).

Pour d'autres solutions, la ruine de l'assemblage boulonné ne dépend pas non plus uniquement de l'effort maximal transmissible à l'interface entre la partie en acier et la partie en béton de l'assemblage. En effet, la ruine peut être provoquée par d'autres composantes.

C'est notamment le cas pour la solution 1-1. Comme pour la transmission des efforts axiaux, les plats supérieurs étant très rigides, l'effort tranchant est considéré directement transmis de l'âme de la colonne aux plats d'articulation. Les plats supérieurs et le plat inférieur doivent donc d'une part, résister en section à l'effort tranchant et d'autre part, résister à la pression diamétrale due au transfert de l'effort tranchant vers ou depuis l'axe d'articulation. Cet axe doit également résister à l'effort de cisaillement.

De manière analogue, pour les configurations 1-3 et 2-3, l'effort est transmis de la colonne aux boulons et des boulons aux cornières par pression diamétrale. Ces boulons doivent résister à l'effort de cisaillement, réparti équitablement entre tous les boulons.

Le *Tableau 13* de la *Section 6.4.4* de ce chapitre reprend les vérifications à effectuer pour chacune des composantes actives ainsi que les ouvrages auxquels il faut se référer afin de déterminer l'effort tranchant maximal transmissible par l'assemblage boulonné.

Pour la solution 2-2, tout comme pour l'étude en flexion seule, aucune information n'a pu être trouvée concernant la résistance à l'effort tranchant seul. Cependant, la formule de l'article [20], qui permet de déterminer la hauteur d'encastrement efficace minimale nécessaire pour résister à une combinaison d'effort M-V, peut également être utilisée, en considérant dans ce cas la contribution du moment nulle.

6.4.2. Efforts transmis par une bêche

L'utilisation d'une bêche est préconisée lorsque l'effort tranchant à transmettre est important. En effet, les tiges ne reprendront, par cisaillement, qu'un effort horizontal faible.

Parmi les bèches, on distingue les bèches constituées d'un tronçon de cornière, reprenant un effort tranchant modéré et les bèches fabriquées à partir d'un morceau de profilé en I ou H, résistant à une charge plus importante. Les efforts auxquels la bêche est soumise sont égaux aux efforts appliqués à la section, à moins qu'une partie ait été reprise par frottement.

Un autre avantage de la bêche en I ou H est qu'elle pourra reprendre un effort de cisaillement dans chacune des deux directions principales de l'assemblage. La bêche est positionnée de manière à ce que son axe fort soit perpendiculaire à l'effort tranchant le plus important. Néanmoins, la plupart du temps, le profilé de la bêche sera parallèle à celui de la colonne.

Enfin, si cette bêche en I ou H est soumise à un effort tranchant dans les deux directions principales de l'assemblage, elle doit résister à la combinaison de ces efforts.

Lorsqu'un effort est transmis à une bêche en I ou H parallèlement à son axe faible, la répartition des efforts se fait de la manière suivante (voir *Figure 81*) :

- L'âme de la bêche, étant parallèle à l'axe faible, reprend l'effort de cisaillement $V_{Ed,n,x}$;
- $V_{Ed,n,x}$ est transmis de la bêche à la fondation par pression des semelles du profilé sur le béton. Le béton doit donc résister à cette pression (σ_b sur la *Figure 81*) ;
- La répartition des contraintes de pression le long des semelles de la bêche est triangulaire (voir *Figure 81*). Ainsi, l'effort résultant est excentré par rapport à la hauteur de la semelle. Cet excentrement crée un moment secondaire. Ce moment secondaire est équilibré par un effort de traction réparti entre les deux semelles de la bêche et un effort de compression au droit d'une semelle du profilé. Chacune des semelles de la bêche doit donc résister à la moitié de l'effort secondaire de traction ($N_{sec,T}$ sur la *Figure 81*) ;
- Une des semelles de la colonne est sollicitée par l'effort de compression secondaire ($N_{sec,C}$ sur la *Figure 81*) ;

- L'âme de la colonne doit résister à l'effort tranchant appliqué $V_{Ed,n,x}$ ainsi qu'à l'effort de traction secondaire transmis par la semelle la plus sollicitée de la bêche ($N_{sec,T}$ sur la *Figure 81*). Si l'âme ne peut pas résister, des raidisseurs sont ajoutés.

L'effort maximal transmissible par la bêche $V_{Rd,n,x}$ sera donc relatif à chacune de ces composantes. Néanmoins, la semelle de la bêche étant très rigide et le bras de levier faible, le moment secondaire est souvent négligé. Ainsi, généralement, l'effort maximal transmissible par la bêche est évalué en ne considérant que la résistance au cisaillement de l'âme de la bêche et la résistance à la pression du béton.

De manière analogue, lorsqu'un effort tranchant est transmis à la bêche parallèlement à son axe fort, la répartition des efforts se fait de la manière suivante (voir *Figure 82*) :

- Les semelles de la bêche, parallèles à l'effort appliqué, y résistent par cisaillement ;
- L'effort tranchant est transmis à la fondation en béton par pression de l'âme du profilé sur le béton. Le béton doit donc résister à cette pression (σ_b sur la *Figure 82*) ;
- L'effort résultant des contraintes de pression crée à nouveau un moment secondaire. Ce moment secondaire est équilibré par un effort de traction réparti entre les deux semelles de la bêche et un effort de compression appliqué à mi-distance entre l'axe de la colonne et le bord intérieur de la semelle de la colonne. Chaque semelle de la bêche doit donc résister à la moitié de l'effort secondaire de traction ($N_{sec,T}$ sur la *Figure 82*) et à la moitié de l'effort de cisaillement ($V_{Ed,n,y}$) ;
- L'âme de la colonne doit résister à l'effort de traction secondaire transmis par la semelle la plus sollicitée de la bêche ($N_{sec,T}$ sur la *Figure 81*). Si elle ne peut pas résister, des raidisseurs d'âme sont ajoutés ;
- L'effort de compression secondaire ($N_{sec,C}$) est repris par flexion de l'âme de la colonne et de la platine.

Néanmoins, comme pour $V_{Rd,n,x}$, habituellement, l'effort maximal transmissible $V_{Rd,n,y}$ par la bêche est évalué en ne considérant que la résistance au cisaillement des semelles de la bêche et la résistance à la pression du béton.

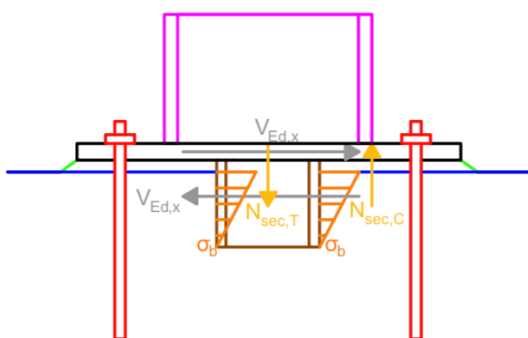


Figure 81 - Bêche en I ou H sous un effort tranchant $V_{Ed,x}$:
Distribution des efforts

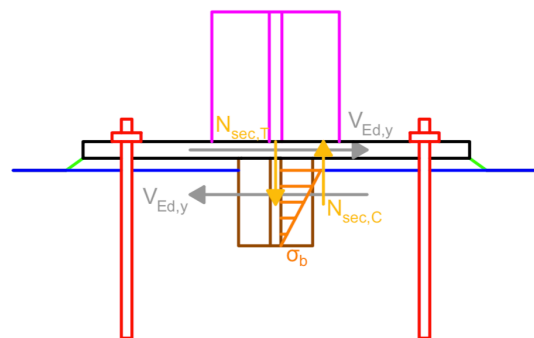


Figure 82 - Bêche en I ou H sous un effort tranchant $V_{Ed,y}$:
Distribution des efforts

Pour les bèches en cornière, la répartition des efforts est similaire au cas des bèches en I ou H :

- L'effort tranchant est transmis à la fondation en béton par pression de l'aile verticale de la cornière sur le béton. Le béton doit donc résister à cette pression (σ_b sur la *Figure 83*) ;
- L'aile verticale de la cornière doit simultanément résister à l'effort tranchant appliqué à la bêche et à un effort de traction secondaire ($V_{Ed,n,x}$ et $N_{sec,T}$ sur la *Figure 83*). Cet effort de traction secondaire provient également du moment secondaire généré par la répartition triangulaire des contraintes de pression du béton le long de l'aile verticale de la cornière ;

- La semelle du poteau doit résister à l'effort de compression secondaire ($N_{sec,C}$ sur la *Figure 83*) ;
- L'âme du poteau doit résister localement, au droit de la cornière, non seulement à l'effort tranchant appliqué ($V_{Ed,n,x}$) à la colonne mais également à l'effort de traction secondaire ($N_{sec,T}$). Si elle ne peut pas résister, des raidisseurs d'âme sont ajoutés.

Pour la détermination de l'effort tranchant maximal admissible par la cornière, le moment secondaire est également généralement négligé.

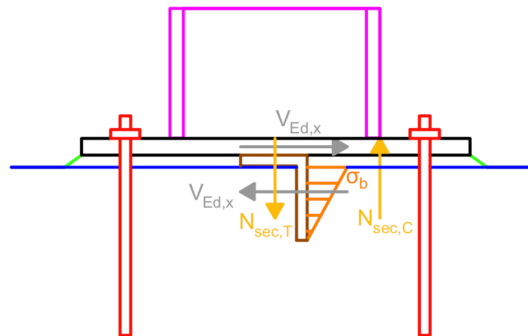


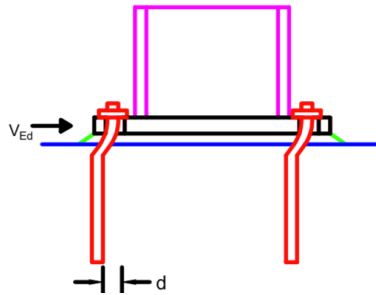
Figure 83 – Bêche en cornière: Distribution des efforts

L'ouvrage [21] fournit des informations précises, supplémentaires par rapport à celles proposées dans l'Eurocode, concernant la détermination de l'effort tranchant maximal transmissible par une bêche. Cet ouvrage procure également des recommandations en termes de dimensions de la bêche, notamment afin que la bêche travaille de façon efficace et parce que, pour des configurations articulées, une bêche trop profonde risquerait de réaliser un encastrement.

6.4.3. Efforts transmis par cisaillement des tiges

La résistance des tiges en cisaillement n'est mobilisée qu'à partir du moment où les déplacements induits par l'effort tranchant sont tels que la platine, la plaque, le grain ou les cornières arrivent au contact des tiges au niveau des trous. Les efforts sont alors transférés aux tiges par pression diamétrale. Dans le cas spécifique de trous surdimensionnés, ce sont les plats qui viennent au contact des tiges. Pour un système fixé par châssis, les plats supérieurs transmettent aux tiges l'effort tranchant par pression diamétrale.

Les tiges ne reprennent qu'un effort de cisaillement faible. En effet, le béton ou mortier de scellement de la fondation n'a pas une résistance suffisante pour faire face aux contraintes de pression diamétrale imposées par les tiges en cisaillement. Ainsi, celles-ci se déforment rapidement en flexion (voir *Figure 84*). Elles travaillent donc en cisaillement et en flexion sur une hauteur égale à la somme de l'épaisseur des éventuels plats, de la platine d'extrémité et/ou de la plaque d'assise, de la couche de mortier de scellement et sur une certaine épaisseur de la fondation. Pour la solution 1-2, les tiges possèdent une capacité de déformation plus importante puisqu'à cette hauteur s'ajoute l'épaisseur du grain.



Légende – d = déplacement horizontal de la structure; V_{Ed} = effort de cisaillement appliqué
Figure 84 - Cisaillement des tiges

Vu le déplacement horizontal (d sur la *Figure 84*), il se produira non seulement un cisaillement et une flexion des boulons, mais également une force de traction accrue dans les boulons en raison d'effets du second ordre. La composante horizontale de la force de traction croissante apporte une contribution supplémentaire à la résistance au cisaillement. Néanmoins, si l'assemblage est bien conçu et exécuté, une ruine due à des effets du second d'ordre ne se produira qu'avec de très grandes déformations (beaucoup plus grandes que ce qui est acceptable en termes d'état limite de service et d'état limite ultime).

Lors de la reprise de l'effort tranchant par cisaillement des tiges, les différents modes de ruine susceptibles d'apparaître sont relatifs aux tiges, au plat en acier sur lequel reposent les écrous (platine, plaque, cornière, grain ou plats) et au béton. Ceux-ci sont :

- La ruine par pression diamétrale ;
- La ruine par cisaillement des tiges ;
- La ruine par plastification des tiges déformées ;
- La ruine des tiges par effets du second ordre ;
- La ruine par éclatement du béton et le retrait de la tige ;
- La ruine par effritement du béton.

Généralement, afin d'évaluer la résistance en cisaillement des tiges, la règle de l'Eurocode 3 partie 1-8 [6] est utilisée. Cette règle a notamment pour but de limiter la déformation des tiges en flexion et donc leur déplacement horizontal. Ainsi, afin de déterminer l'effort tranchant maximal transmissible par le cisaillement des tiges, seuls les deux premiers modes de ruine sont pris en compte.

Par contre, si des déformations importantes sont tolérées (cela dépend des exigences d'utilisation de la structure), une étude plus approfondie peut être réalisée pour déterminer l'effort maximal transmissible à l'aide de l'article [8], à l'origine de l'écriture des Eurocodes.

6.4.4. Ouvrages de référence

Dans cette section, l'ensemble des vérifications à mener pour déterminer l'effort tranchant maximal transmissible par l'assemblage boulonné est synthétisé.

Dans la colonne de gauche du *Tableau 13*, se trouvent les composantes potentiellement actives pour l'ensemble des configurations du *Chapitre 2*. Dans la colonne du milieu, sont repris les effets pouvant provoquer la ruine de chacune des composantes et donc, de l'assemblage. Pour la solution choisie, il faudra donc déterminer l'effort tranchant maximal acceptable par chacune des composantes actives (voir *Tableau 11*) afin d'éviter la ruine de celles-ci. Pour cela, les règles de calcul fournies dans les ouvrages référencés dans la dernière colonne sont utilisées.

Dans le cas de l'effort de cisaillement, les effets (seconde colonne) à considérer pour une composante active dépendent non seulement de la configuration étudiée mais également, du mode de transmission des efforts.

Composantes	Effets provoquant la ruine	Ouvrages de référence
Colonne	Bêche en I ou H : - Effort selon y : compression secondaire dans l'âme - Effort selon x : • Âme : compression secondaire combinée au cisaillement • Semelle : traction secondaire	[21] [21] [21]
	Bêche en cornière : - Âme : compression secondaire combinée au cisaillement - Semelle : traction secondaire	[21] [21]
Boulons entre la colonne et les cornières	- Cisaillement	[6]
Cornières	- Pression diamétrale • Aile verticale : pression due aux boulons entre la colonne et les cornières • Aile horizontale : pression due aux tiges	[6] [6] [6]
	- Résistance en section - Frottement	[5] [6]
Plats supérieurs d'un châssis	- Pression diamétrale	[6]
Platine d'extrémité	- Pression diamétrale	[6]
	- Frottement	[6]
Grain	- Résistance en section	[19]
	- Pression diamétrale	[6]
	- Frottement	[6]
Boîte à grain	- Résistance en section sous l'effort de cisaillement et le moment qu'il crée	[17]
Plats supérieurs	- Résistance en section	[5]
	- Pression diamétrale	[6]
Axe d'articulation	- Résistance en section	[6]
Plat inférieur	- Résistance en section	[5]
	- Pression diamétrale	[6]
Plats	- Pression diamétrale	[6]
Tiges	- Cisaillement	[6]
	→ Complément d'informations	[8]
	- Flexion due au transfert de cisaillement pour la bêche	[7]
Plaque d'assise	- Pression diamétrale	[6]
	- Frottement	[6]
Bêche	Bêche en I ou H : - Effort selon y : • Âme : flexion due à la compression secondaire • Semelle la plus sollicitée : traction secondaire combinée au cisaillement • L'autre semelle : cisaillement	[21] [5] [5]
	- Effort selon x : • Âme : cisaillement • Semelles : traction secondaire Bêche en cornière : aile verticale soumise à du cisaillement et à la traction secondaire	[5] [21] [21]

Béton	- Pression due à la bête	[4]
	- Éclatement du béton et retrait de la tige	[8]
	- Effritement du béton dû au cisaillement des tiges	[8]
	- Frottement	[6]

Tableau 13 – Identification dans les ouvrages de référence des règles nécessaires à l'évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par l'assemblage boulonné

On s'arrangera généralement pour que la ruine de l'assemblage boulonné soit provoquée, suivant le mode de transfert des efforts, par rupture de la bête ou par cisaillement des tiges ou par sollicitations excessives de la butée du grain. Afin d'éviter tous les autres modes de ruine possibles, des dispositions constructives adéquates seront choisies pour les autres composantes. Le cas échant, la ruine de l'assemblage boulonné sera provoquée par la ruine de la composante la plus faible, c'est-à-dire la composante ayant la plus faible résistance à l'effort tranchant. La résistance de cette composante limite donc l'effort maximal transmissible.

6.5. Étude de l'assemblage en pied de poteau

L'effort tranchant maximal transmissible en pied de poteau correspond au minimum entre celui transmissible par l'assemblage boulonné, par la colonne et par les soudures. Pour chacune de ces trois parties principales, il est déterminé dans les sections précédentes.

Les dispositions constructives (dimensions des éléments, longueurs minimales d'ancrage, nuances d'acier, etc.) seront toujours déterminées de façon à ce que l'effort maximal acceptable ne soit pas relatif à une composante provoquant une ruine fragile de l'assemblage.

En conclusion, l'étude en cisaillement est similaire pour sept des huit solutions de base, les composantes actives ayant pour la plupart du temps un comportement identique d'une solution à l'autre. Pour l'assemblage boulonné, elle dépend essentiellement du mode de transmission des efforts à l'interface entre la partie en acier et celle en béton de l'assemblage boulonné (frottement, cisaillement des tiges ou bête). Ce mode est choisi en fonction de l'ampleur de l'effort tranchant à transmettre ainsi que de la nature de l'effort axial.

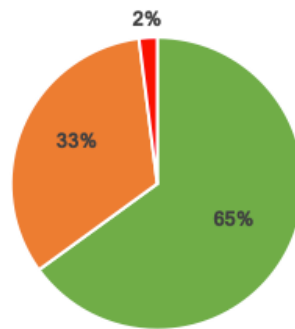
Quelques spécificités sont néanmoins à noter pour la solution 1-1 (sollicitations du système d'articulation) et pour la solution 1-2. Dans ce dernier cas, le mode de transmission des efforts dépend des dispositions constructives (positions des tiges, jeux entre les éléments, etc.).

La solution 2-2 est quant à elle étudiée indépendamment.

Afin de déterminer l'effort tranchant maximal transmissible par l'assemblage en pied de poteau de toutes les configurations du *Chapitre 2*, différentes règles fournies par divers ouvrages de référence sont utilisées. Parmi celles-ci, 65% sont fournies par les Eurocodes (*Figure 85*), 33% par des documents basés sur les Eurocodes mais dont certaines règles ne s'y trouvent pas encore. Enfin, 2% des règles proviennent de documents dont les principes sont souvent dépassés.

Les Eurocodes couvrent donc une moins grande proportion de règles relatives au dimensionnement des pieds de poteaux en cisaillement seul qu'en traction et en compression. Néanmoins, une plus petite quantité de règles devra faire l'objet d'une révision.

Toutefois, les Eurocodes couvrent toutes les règles nécessaires à l'évaluation de l'effort maximal transmissible par la colonne et les soudures.



Légende – Eurocodes, documents récents, documents anciens
 Figure 85 - État des règles fournies par l'Eurocode pour le dimensionnement en cisaillement

7. Dimensionnement des assemblages soumis à une combinaison N-V ou M-N-V

Les pieds de poteaux dits articulés sont amenés à reprendre des combinaisons d'efforts N-V, ceux dits encastrés également. Ces derniers sont aussi susceptibles d'être soumis à des combinaisons M-V ou M-N-V. Il faut donc déterminer les efforts maximaux transmissibles pour ces combinaisons.

7.1. Identification des composantes actives

Pour identifier les composantes susceptibles d'être activées sous une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V, le *Tableau 11* (effort tranchant) est comparé au *Tableau 3* (effort de traction) ou au *Tableau 7* (effort de compression), en fonction de la nature de l'effort normal ou du cas de répartition des efforts. On obtient alors les composantes actives sous la combinaison d'efforts considérée pour les trois parties principales de l'assemblage de pied de poteau étudié.

Ensuite, comme pour toutes les études menées précédemment, la détermination des efforts maximaux transmissibles par le pied de poteau pour une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-V-N est réalisée en étudiant successivement les différentes composantes actives des trois parties principales de l'assemblage : l'assemblage boulonné, la colonne et les soudures.

Quelle que soit la partie étudiée, la méthodologie de réflexion est identique.

Habituellement, l'assemblage est principalement conçu pour soit, transmettre un effort axial et/ou un moment de flexion soit, pour transférer un effort tranchant.

Généralement, proportionnellement, l'effort axial est plus important que l'effort tranchant. Ainsi, dans ce cas, pour déterminer les efforts maximaux transmissibles par chacune des parties principales de l'assemblage, la procédure suivante est suivie :

1. Déterminer l'effort N_{Rd} ou M_{Rd} maximal transmissible ou la combinaison d'efforts $M_{Rd}-N_{Rd}$ maximale transmissible ;
2. S'assurer que N_{Rd} et M_{Rd} sont bien supérieurs aux efforts appliqués, soit respectivement N_{Ed} et M_{Ed} ;
3. Poser l'hypothèse que sous une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V, $N_{Rd} = N_{Ed}$ et $M_{Rd} = M_{Ed}$;
4. Estimer, à partir des règles d'interaction, l'effort tranchant maximal qui peut être transmis par la partie de l'assemblage considérée en plus des efforts N_{Ed} et/ou M_{Ed} ;
5. Définir l'effort tranchant maximal transmissible par la partie de l'assemblage étudiée comme étant le plus petit effort entre celui obtenu en cisaillement seul et celui obtenu sous la combinaison d'efforts considérée.

Si par contre, proportionnellement, l'effort tranchant à transmettre est plus important, la procédure inverse est suivie. La résistance à l'effort tranchant appliqué est d'abord assurée et ensuite, on regarde l'effort axial, le moment de flexion ou la combinaison de ces efforts qui peut être repris en plus par l'assemblage.

Dans les sections suivantes, l'effort tranchant est supposé moins important. On cherche donc l'effort maximal, en cisaillement, qu'il est encore possible de transmettre, par chacune des parties de l'assemblage et puis, par le pied de poteau, connaissant les efforts M et N appliqués.

7.2. Étude de la colonne

D'après l'Eurocode 3 partie 1-1 [5], si l'effort tranchant maximal transmissible est inférieur à la moitié de la résistance de la section en cisaillement seul et que la section ne voile pas par cisaillement, l'interaction N-V, M-V ou M-N-V peut être négligée.

Si par contre, l'effort tranchant appliqué est supérieur à cette valeur, il faudra utiliser les formules de l'Eurocode [5] pour s'assurer que cet effort appliqué soit plus petit que l'effort tranchant maximal transmissible en cisaillement seul et sous l'interaction étudiée.

S'il existe des raidisseurs de platine, l'effort de cisaillement maximal transmissible sous une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V est déterminé en considérant une section située juste au-dessus de ceux-ci.

Par contre, si les solutions 1-1 et 1-2 sont utilisées avec des raidisseurs d'âme, il faudra, dans ce cas, également étudier la résistance de la section constituée des raidisseurs d'âme et de la portion d'âme située entre ceux-ci.

7.3. Étude des soudures

L'Eurocode 3 partie 1-8 [6] établit une règle permettant de vérifier que les soudures résistent à la combinaison d'efforts appliquée. Cette règle est une inégalité qui tient compte des contraintes induites par les efforts transmis à la structure.

Pour chacune des soudures, en introduisant dans cette inégalité l'effort axial et le moment appliqués, l'effort tranchant maximal admissible, pour une combinaison d'efforts, est obtenu. Parmi toutes les soudures, la plus petite valeur obtenue est retenue. Elle correspond à la soudure la plus faible soit, celle qui est susceptible de provoquer la ruine de l'assemblage soudé.

Enfin, cet effort tranchant maximal transmissible par les soudures sous une combinaison d'efforts est comparé à celui obtenu pour le cisaillement seul. La plus petite valeur est conservée et correspond à la résistance de l'assemblage soudé pour le cas étudié.

Les recommandations en termes de dimensions des gorges de soudures de l'ouvrage [21] présentées dans la section dédiée au dimensionnement en traction sont encore applicables.

7.4. Étude de l'assemblage boulonné

En fonction de la solution étudiée et des efforts à transmettre, les composantes suivantes appartenant à l'assemblage boulonné sont susceptibles d'être soumises à une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V :

- Les semelles des tronçons en T-équivalents tendus et comprimés :
 - En compression, la semelle peut être : la plaque d'extrémité ou la plaque d'assise ;

- En traction, elle peut être : la plaque d'assise, la platine d'extrémité, le grain, une cornière ou un plat supérieur du système fixé par un châssis.
- Les plats pour les trous surdimensionnés ;
- Les tiges ;
- Les boulons entre la colonne et les cornières ;
- Le béton ;
- Les plats supérieurs et le plat inférieur du système d'articulation de la solution 1-1 ;
- L'axe d'articulation.

Les semelles en acier des tronçons en T-équivalents, tant en traction qu'en compression, sont susceptibles d'être soumises à une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V.

En effet, si l'assemblage est cisailé et, complètement ou partiellement, comprimé, d'une part, les semelles fléchissent lorsqu'elles transfèrent l'effort de compression, par pression, à la fondation. D'autre part, si l'effort de cisaillement est transmis aux tiges, les semelles doivent résister à la pression diamétrale au niveau des trous.

Ensuite, si l'assemblage est cisailé et partiellement ou totalement tendu, les semelles doivent résister aux modes de ruine 1 et 2 ou au mode 1-2 ainsi qu'à la pression diamétrale lors de la transmission de l'effort tranchant aux tiges.

Par contre, dans les ouvrages de référence, tant en compression qu'en traction, il n'existe pas de règle relative à l'interaction des efforts N-V, M-N ou M-N-V au niveau des semelles des tronçons en T-équivalents. Ces interactions sont donc négligées pour ces composantes. Ainsi, les efforts maximaux transmissibles sont identiques à ceux obtenus pour chaque effort appliqué seul.

Néanmoins, certaines de ces semelles (le grain, les cornières et les plats d'articulation) doivent avoir une résistance en section suffisante pour résister à l'application simultanée d'un effort V et/ou N et/ou M. Afin d'assurer cela, les formules de l'Eurocode [5] sont utilisées pour déterminer l'effort tranchant maximal encore transmissible par ces composantes connaissant le moment et/ou l'effort axial déjà repris. Cependant, l'Eurocode précise que cette interaction peut être négligée si l'effort tranchant est inférieur à la moitié de l'effort maximal transmissible en cisaillement seul et que la section ne voile pas par cisaillement.

Pour les tiges, l'axe d'articulation et les boulons entre la colonne et les cornières, il est nécessaire de vérifier leur résistance sous une combinaison d'efforts de traction et de cisaillement. Ces boulons atteindront leur pleine résistance en traction à condition que l'effort tranchant ne dépasse pas une certaine valeur définie par l'Eurocode 3 partie 1-8 [6]. Cette valeur correspondra donc à l'effort tranchant maximal transmissible par les boulons pour la combinaison d'efforts considérée.

7.5. Étude de l'assemblage en pied de poteau

Pour chacune des trois parties principales de l'assemblage, l'effort tranchant maximal qu'il est encore possible de transmettre, connaissant les efforts maximaux N et M transmis, est défini comme étant la valeur minimale entre celle obtenue par les formules d'interaction et celle obtenue par cisaillement seul. La valeur minimale, parmi celles des trois parties principales, est alors retenue comme étant l'effort maximal transmissible par le pied de poteau sous une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V.

En conclusion, sous une combinaison d'efforts M-N-V, N-V ou M-V, dans le cadre de ce projet, on admet que les efforts maximaux transmissibles par le pied de poteau en traction, compression et flexion sont égaux aux efforts appliqués ; pour autant que ceux-ci soient inférieurs aux efforts résistants obtenus, respectivement, en traction, compression ou flexion seule ou pour une combinaison d'efforts M-N.

L'effort tranchant maximal acceptable par le pied de poteau est quant à lui relatif à la plus faible des trois parties principales de l'assemblage. Pour chacune des parties, il est déterminé, en connaissant l'effort axial et de flexion appliqué, en fonction du reliquat de résistance qu'il reste dans l'assemblage.

Les Eurocodes couvrent toutes les règles nécessaires à l'évaluation des efforts maximaux admissibles pour une combinaison d'efforts N-V, M-V ou M-N-V.

8. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était de fournir les éléments nécessaires à la détermination des efforts maximaux transmissibles par le pied de poteau afin de ne pas provoquer sa ruine. Pour cela, chaque type de sollicitations susceptible d'être soumis à l'assemblage a été étudié indépendamment.

Néanmoins, dans chaque cas, le raisonnement était identique. Premièrement, les composantes actives de l'assemblages pour chacune des solutions envisagées au *Chapitre 2* ont été identifiées. Deuxièmement, l'effort maximal transmissible par l'assemblage en pied de poteau est déterminé en le considérant égal au minimum entre les trois valeurs d'efforts obtenues pour les trois parties principales de l'assemblage boulonné. Ces trois parties sont donc étudiées successivement.

L'étude des soudures est similaire pour chaque cas. Elle repose sur les mêmes règles, applicables à toutes les soudures.

Pour la colonne, il s'agit de déterminer sa résistance en section, donnant dans chaque cas les efforts maximaux qu'elle peut transmettre.

Par contre, l'étude de l'assemblage boulonné est effectuée différemment pour chaque type de sollicitations, chacun des modes de sollicitations présentant ses propres spécificités. Cependant, peu importe la nature des sollicitations, les composantes actives principales sont identiques ou ont des comportements similaires pour la majorité des solutions étudiées. Ainsi, afin de déterminer l'effort maximal transmissible par l'assemblage boulonné, les règles générales de dimensionnement sont applicables à toutes les solutions. Lorsque certaines composantes ont un comportement plus spécifique, des règles appropriées sont alors utilisées. Dans tous les cas, la solution 2-2 et ses variantes sont étudiées indépendamment.

Pour évaluer l'effort maximal transmissible en traction seule, des tronçons en T-équivalents sont définis. Il existe un tronçon par rangée de tiges. Ceux-ci sont composés d'une partie du profilé de la colonne ou d'un raidisseur, de l'élément en acier sur lequel reposent les écrous et des tiges de la rangée considérée. En fonction, de la possibilité d'apparition d'un effet de levier ou non, ces tronçons en T peuvent présenter 3 ou 4 modes de ruine possibles. L'effort maximal transmissible est alors déterminé sur base du mode de ruine apparaissant pour l'effort de traction le plus faible.

En compression seule, des tronçons en T-équivalents sont également définis. Il existe un tronçon par partie de l'élément (grain, plat d'articulation ou profilé) transmettant l'effort de compression à la plaque d'assise ou à la platine d'extrémité. L'effort maximal transmissible par chacun des tronçons est alors défini par le minimum entre la résistance à la pression localisée du béton et la résistance en section de l'âme du tronçon.

Tant pour la compression que pour la traction, il arrive que d'autres composantes de l'assemblage boulonné que celles reprises dans les tronçons en T puissent provoquer la ruine de l'assemblage. Néanmoins, l'effort maximal transmissible par l'assemblage boulonné ne sera pas relatif à l'une de ces composantes. En effet, les dispositions constructives sont généralement choisies afin que l'effort maximal acceptable par ces composantes soit supérieur à celui admissible par les tronçons en T.

En flexion seule, l'assemblage est partiellement comprimé et partiellement tendu, l'effort maximal transmissible en flexion seule est donc déterminé en considérant d'une part, la résistance des tronçons en T de la partie tendue et d'autre part, celle des tronçons de la zone comprimée.

La détermination des efforts maximaux transmissibles pour une combinaison M-N peut se faire selon deux méthodes. Premièrement, le cas de répartition des efforts étant défini, à partir des résistances des tronçons en T obtenues en traction et en compression seule, le couple d'efforts résistants est évalué à l'aide de formules analytiques. Celui-ci est comparé à l'effort résistant obtenu en flexion seule et la plus petite valeur est retenue. Deuxièmement, par construction du diagramme d'interaction M-N, le domaine de résistance de l'assemblage du pied de poteau étudié est obtenu. Tout couple d'efforts M-N se situant dans le périmètre défini par le diagramme pourra être appliqué à l'assemblage sans entraîner sa ruine.

Tant pour la flexion seule que pour la flexion combinée à un effort axial, seule la résistance des tronçons en T est considérée pour déterminer les efforts maximaux transmissibles. Les autres composantes de l'assemblage sont généralement supposées avoir des dimensions suffisantes afin de ne pas provoquer la ruine de l'assemblage si les efforts maximaux, que ce dernier peut admettre, sont dépassés.

En cisaillement seul, pour évaluer l'effort maximal transmissible, il faut commencer par déterminer le mode de transmission des efforts à l'interface entre la partie en acier et celle en béton de l'assemblage boulonné. Il existe différentes possibilités. Si l'assemblage est uniquement soumis à un effort tranchant, il sera transféré à la fondation par cisaillement des tiges ou par une bêche. Si par contre, l'effort de cisaillement est combiné à un effort de compression, le frottement entre la partie en acier et la partie en béton mobilise complètement ou partiellement l'effort tranchant appliqué. Ainsi, l'effort tranchant maximal transmissible sera relatif à la ruine de la bêche ou des tiges.

De même que précédemment, les dispositions constructives concernant les autres composantes actives seront habituellement choisies telles que ces composantes ne provoquent jamais la ruine de l'assemblage.

Sous une combinaison d'efforts M-N-V, N-V ou M-V, dans le cadre de ce projet, on admet que les efforts maximaux transmissibles par le pied de poteau en traction, compression et flexion sont égaux aux efforts appliqués pour autant que ceux-ci soient inférieurs aux efforts résistants obtenus, respectivement, en traction, compression ou flexion seule ou pour une combinaison d'efforts M-N. L'effort tranchant maximal acceptable par le pied de poteau est quant à lui relatif à la plus faible des trois parties principales de l'assemblage. Pour chacune des parties, il est déterminé, en connaissant l'effort axial et de flexion appliqués, en fonction du reliquat de résistance qu'il reste dans l'assemblage.

Quels que soient les efforts appliqués à la section, les Eurocodes couvrent, dans tous les cas, toutes les règles nécessaires à la détermination des efforts maximaux transmissibles par la colonne et les soudures. Pour les soudures, des informations complémentaires peuvent être trouvées dans des documents récents.

Pour l'assemblage boulonné, ils couvrent les règles générales applicables à la plupart des solutions étudiées. Cependant, ils ne fournissent pas toujours toutes les règles nécessaires à la détermination des efforts maximaux acceptables dans certains cas spécifiques. Il faut alors se référer à d'autres ouvrages que les Eurocodes. C'est, par exemple, le cas pour déterminer les longueurs efficaces des tronçons tendus pour des sections circulaires ou carrées ou encore lorsqu'il faut déterminer la pression exercée par le grain en compression sur la plaque d'assise, etc.

Le *Tableau 14* reprend, pour chaque type de sollicitations, la proportion des règles, qui permettent de déterminer les efforts maximaux transmissibles par les pieds de poteaux, couvertes par les Eurocodes. Il n'y a que pour l'interaction M-N que les Eurocodes ne couvrent pas plus de la moitié des règles. Néanmoins, pour ce type de sollicitations, les principes de l'Eurocodes ont été utilisés afin d'établir des règles plus générales.

Au global, les Eurocodes contiennent 74% des règles. 23% font partie de documents sur lesquels sont basés les Eurocodes ou de documents écrits à partir de ceux-ci. Dès lors, au final, seuls 3% des règles doivent peut-être faire l'objet d'une révision.

Par conséquent, réaliser les études des pieds de poteaux à l'aide des Eurocodes semble approprié. De plus, ceux-ci sont basés, pour le dimensionnement des assemblages, sur la méthode des composantes. Nous venons également de montrer que cette méthode est très intéressante. En effet, à partir de l'identification des composantes, elle permet d'utiliser les mêmes principes de dimensionnement pour une même composante utilisée dans différents assemblages. De plus, grâce à l'identification des modes de ruine de chacune des composantes, même si deux composantes ne sont pas identiques mais qu'elles présentent un mode de ruine similaire, les méthodes de calcul connues pour l'une peuvent être adaptées facilement à l'autre.

	Eurocodes	Documents récents	Documents anciens
Traction seule	83%	14%	3%
Compression seule	72%	24%	4%
Flexion seule	56%	44%	0%
Interaction M-N	40%	60%	0%
Cisaillement seul	65%	33%	2%
Interaction N-V, M-V ou M-N-V	100%	0%	0%
Analyse générale	74%	23%	3%

Tableau 14 - État des règles fournies par les Eurocodes pour le dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux

CHAPITRE 5 : Exemples d'application

1. Introduction

Comme expliqué dans l'introduction de ce travail, l'interface entre les colonnes métalliques et leur fondation pose régulièrement problème lors de projets de génie civil pour l'entreprise Solvay. Afin de pallier aux divers problèmes rencontrés, il y a quelques années, les ingénieurs du Central Design Office de l'entreprise ont développé des standards. Néanmoins, ces standards sont parfois surdimensionnés. Ils ne tiennent pas toujours compte des tolérances d'exécution, ni de toutes les exigences de l'entreprise, etc. De plus, les ingénieurs pensent qu'ils pourraient être améliorés grâce aux règles de calcul et aux développements théoriques actuels. C'est pourquoi ils font appel aux chercheurs de l'Université de Liège, à la pointe au niveau des nouvelles connaissances.

Ainsi, pour répondre à la demande de Solvay, dans un premier temps, la littérature dédiée aux pieds de poteaux a été balayée afin de proposer une étude comparative de toutes les solutions les plus couramment rencontrées. Ces diverses solutions ont alors été présentées à l'entreprise. Parmi celles-ci, quatre, dont deux solutions dites articulées et deux dites encastrées, sont couramment utilisées pour la conception des structures métalliques de l'entreprise Solvay. Celles-ci présentent quelques spécificités et sont exposées dans la première section de ce chapitre. En fonction des efforts à reprendre, des variantes peuvent être employées avec les quatre solutions de base. Ces variantes sont également décrites ci-après.

Dans un second temps, la méthode des composantes, choisie comme méthode de calcul pour le dimensionnement des assemblages de ce projet, a été présentée à l'entreprise Solvay. Elle s'est montrée intéressée par la méthode. Son souhait a donc été de comprendre comment l'appliquer aux différentes configurations d'assemblage habituellement rencontrées. Ainsi, des feuilles de calcul, décrivant l'ensemble des étapes à suivre pour dimensionner les quatre solutions courantes et leurs variantes, ont été élaborées. Celles-ci sont présentées dans la seconde section de ce chapitre.

2. Solutions exploitées par Solvay

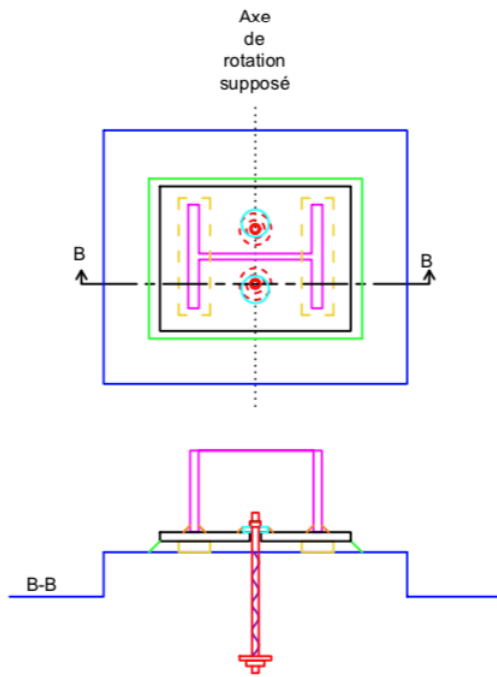
Lors de la conception des liaisons entre les colonnes métalliques et leur fondation, les ingénieurs de chez Solvay utilisent quatre solutions principales, présentées de la *Figure 86* à la *Figure 90* (*Figure 87* exclue). Parmi celles-ci, se retrouvent deux solutions dites articulées et deux dites encastrées.

2.1. Solutions articulées

Les solutions articulées sont employées si la colonne métallique étudiée ne doit pas reprendre d'effort de flexion. Elle ne pourra, dans ce cas, reprendre que des efforts axiaux et tranchants. La seconde solution articulée, pour laquelle la colonne repose sur un grain, est utilisée lorsque ces efforts sont importants et que donc, les calculs mènent à une section conséquente pour le profilé de la colonne. En effet, cette solution présente une réduction de la section du profilé en pied de poteau. Pour que cette réduction puisse être réalisée et ait un intérêt, il faut que la hauteur de cette section soit suffisamment grande. Généralement, la solution est employée pour une hauteur de profilé supérieure à 600mm.

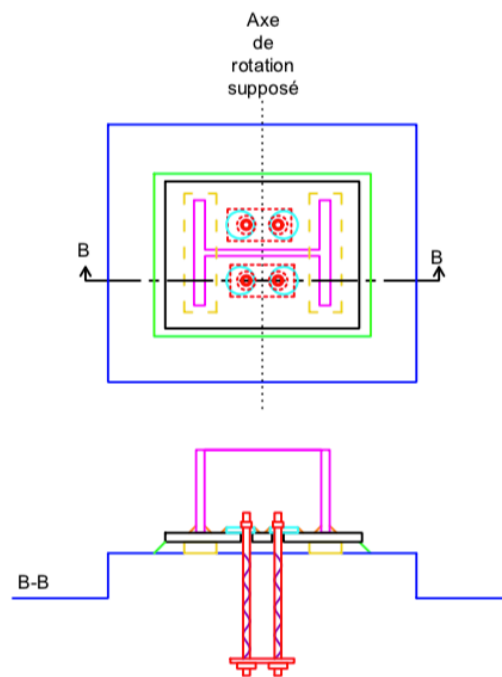
Remarquons que si un élément du système structurel (par exemple : un contreventement) vient se fixer au niveau du pied de poteau, deux tiges d'ancrage sont mises en place de chaque côté de l'assemblage (*Figure 18*). Celles-ci sont placées à proximité immédiate du système de

contreventement. Elles doivent être suffisamment proches l'une de l'autre pour ne pas réaliser un encastrement. De ce fait, le plat d'ancrage est identique pour les deux tiges. La *Figure 87* présente la configuration étudiée dans ce cas, pour la solution articulée 1. Le système est identique pour la solution 2. Néanmoins, pour cette dernière, les dimensions du grain devront être suffisantes.



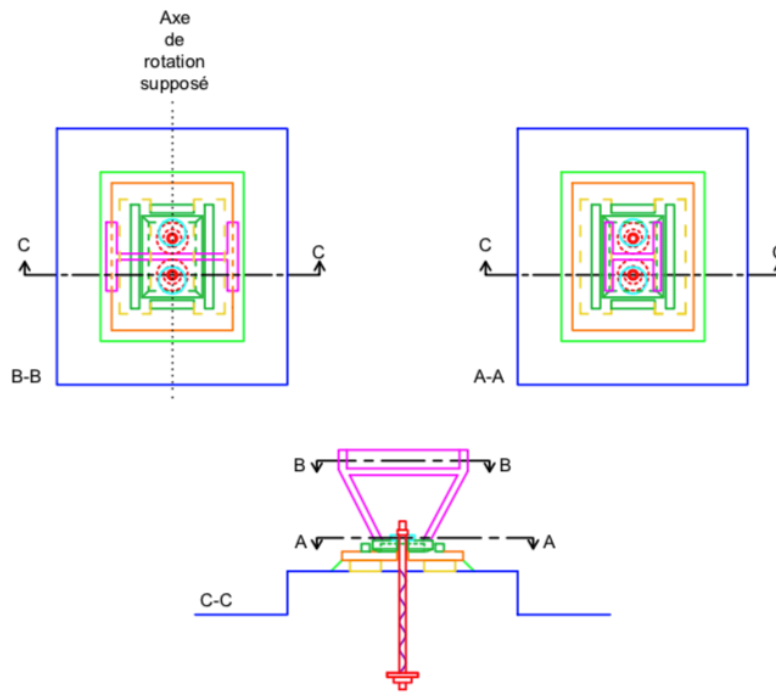
Légende – Colonne, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation

Figure 86 - Solvay: Solution articulée 1



Légende – Colonne, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation

Figure 87 - Solvay : Solution articulée 1 avec 4 tiges



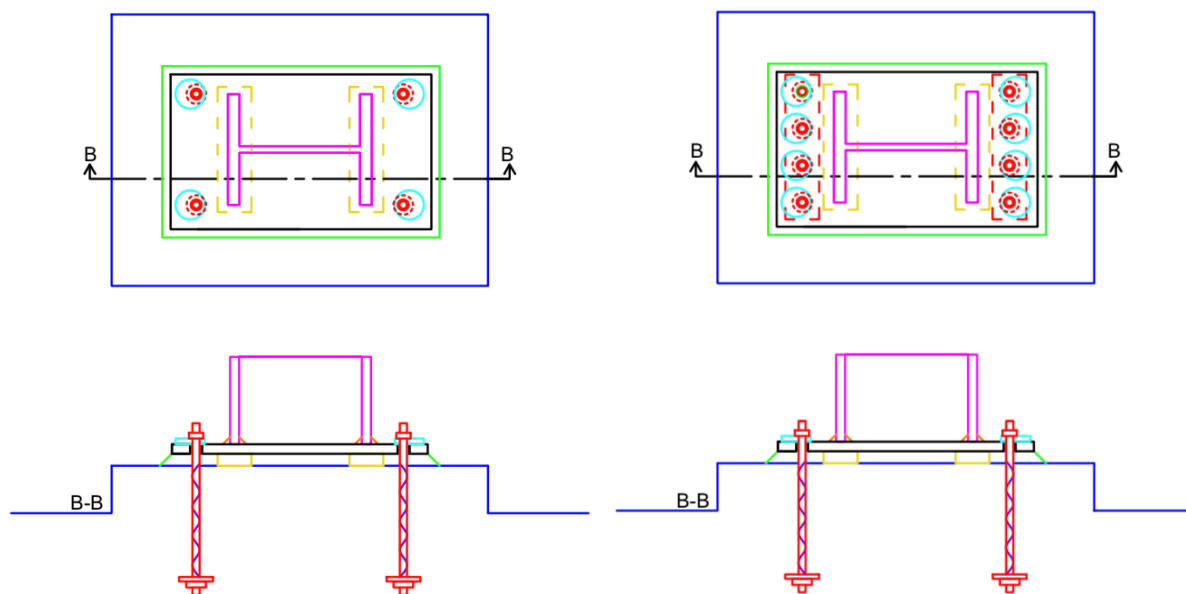
Légende - Colonne, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation, grain et boîte à grain

Figure 88 – Solvay: Solution articulée 2

2.2. Solutions encastrées

Lorsque le système est configuré pour reprendre, en plus des efforts axiaux et tranchants, un moment de flexion, une des solutions encastrées présentées ci-dessous est mise en œuvre. Il est facile de comprendre que la seconde solution est employée lorsque le moment et/ou l'effort de traction est/sont important(s).

Ces deux configurations peuvent être utilisées pour un moment appliqué autour de chacun des deux axes principaux de la section. Néanmoins, elles sont plus efficaces lorsque ce moment est appliqué autour de l'axe fort de la section. Dans les feuilles de calcul présentées dans la section suivante, on fait l'hypothèse que le moment est appliqué autour de l'axe fort de la section. La bi-flexion n'est pas prise en compte.



Légende – Colonne, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation

Figure 89 - Solvay: Solution encastrée 1

Légende – Colonne, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation

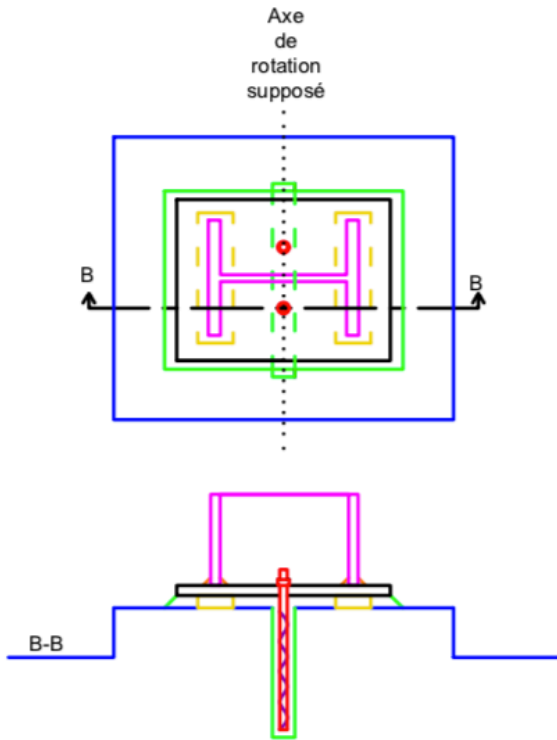
Figure 90 - Solvay: Solution encastrée 2

2.3. Variantes

Trois types de variantes peuvent être utilisés avec les solutions présentées :

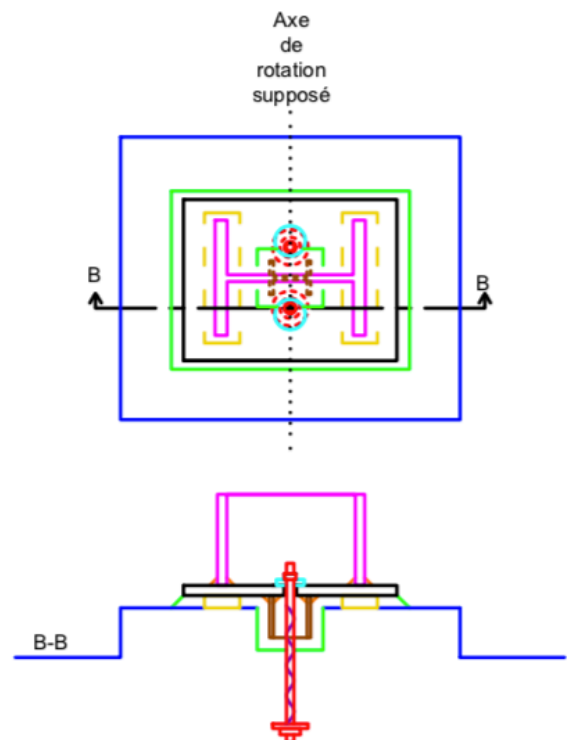
1. Des tiges droites (Figure 91) ;
2. Une bêche (Figure 92) ;
3. Des raidisseurs soit, placés dans le prolongement des semelles (Figure 93) soit, dans le prolongement de l'âme (Figure 94).

Elles sont illustrées ci-après pour la solution articulée 1. Toutefois, les configurations sont identiques pour les autres solutions et seront présentées dans les feuilles de calcul.



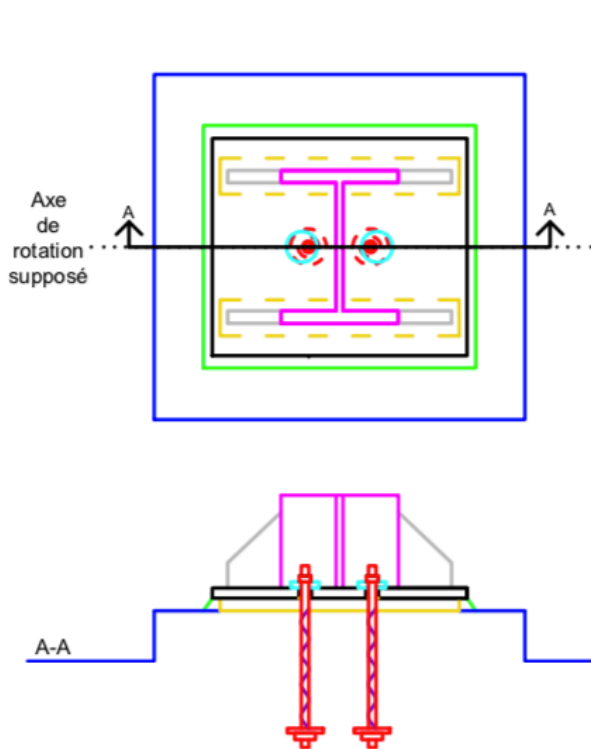
Légende – Colonne, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation

Figure 91 - Solvay : Solution articulée 1 avec tiges droites



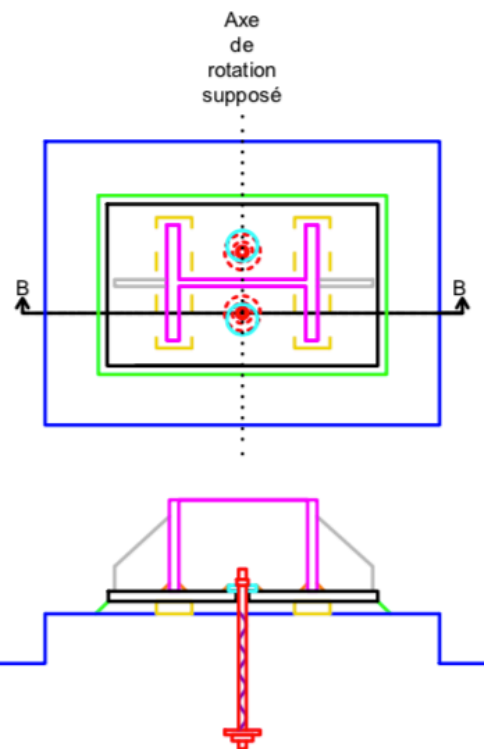
Légende – Colonne, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, bêche, fondation

Figure 92 – Solvay : Solution articulée 1 avec bêche



Légende – Colonne, raidisseurs, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation

Figure 93 - Solvay : Solution articulée 1 avec des raidisseurs dans le prolongement des semelles



Légende – Colonne, raidisseurs, platine, tiges, bande denzo, soudures, rondelles, mortier de scellement, cales de réglage, fondation

Figure 94 - Solvay : Solution articulée 1 avec des raidisseurs dans le prolongement de l'âme

Variante 1 :

Lors de la mise en œuvre des fondations des structures des usines de chez Solvay, les réservations pour les tiges sont fréquemment oubliées. Ainsi, l'entreprise, par précaution, impose le préscelllement des tiges. De plus, cela permet de gagner du temps lors du montage et de limiter l'utilisation de mortier sans retrait. Les tiges utilisées sont « à tête marteau » afin de permettre la reprise d'efforts de traction importants. Si certaines tiges sont proches, leur dispositif d'ancrage est identique et consiste, dans ce cas, en un plat rectangulaire plutôt qu'en une rondelle.

Remarquons que, chez Solvay, les tiges ne sont pas préscellées avec une plaque d'assise. La mise en œuvre de cette plaque est considérée trop aléatoire. Il est difficile d'assurer sa parfaite horizontalité, ce qui pose problème pour le montage du reste de la structure. Cependant, présceller une plaque d'assise avec les tiges permet d'assurer un positionnement correct de ces tiges. Ainsi, pour pallier aux tolérances autorisées pour la localisation des tiges, les ingénieurs imposent que les trous dans la plaque d'extrémité soient largement surdimensionnés. Le diamètre de ces trous est généralement supérieur de plus de 40mm à celui des tiges. De ce fait, afin d'assurer la transmission des efforts depuis la structure vers les tiges d'ancrage, des plats (appelés rondelles par Solvay) sont soudés au niveau des tiges sur la platine d'extrémité. Le diamètre du trou dans chacun des plats est supérieur de 2mm à celui des boulons. Ce trou n'est généralement pas centré par rapport au plat, afin que les plats puissent être produits en avance, mais tout de même positionnés là où on le souhaite, peu importe la position des tiges.

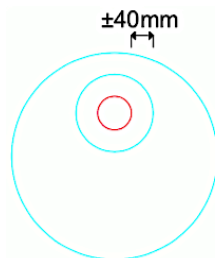


Figure 95 - Rondelles

Dans certains cas spécifiques, il arrive que les tiges ne soient pas préscellées. Solvay utilise alors des tiges droites, sans rondelle. Les efforts de traction transmis seront nettement plus faibles. Néanmoins, l'entreprise refuse d'utiliser des tiges courbes ou recourbées, la clef d'ancrage utilisée avec ces types de tiges étant régulièrement oubliée lors de la fabrication de la fondation ou alors, sa mise en œuvre (positionnement) est très aléatoire.

Variante 2 :

Si les efforts de cisaillement sont vraiment importants et que le cisaillement des tiges ne suffit plus à la reprise de ces efforts, il est suggéré de mettre en place une bêche. Néanmoins, les ingénieurs de chez Solvay n'aiment pas ce type de dispositif. En effet, pour les raisons exposées au *Chapitre 2*, les bêches sont mises en œuvre par la méthode belge. Dès lors, sur les chantiers, il est régulier que la réservation pour la bêche soit oubliée et donc, que des décisions absurdes telles que « on coupe la bêche » soient prises. Par conséquent, dans la mesure du possible les efforts seront transmis par frottement et par cisaillement des tiges.

Dans les feuilles de calcul, le profilé de la bêche est supposé placé parallèlement à celui de la colonne.

Variante 3 :

Lorsque les calculs mènent à une platine trop épaisse, des raidisseurs sont mis en place. Ceux-ci sont placés soit dans le prolongement de l'âme, soit dans le prolongement des semelles. Cette seconde

disposition n'est toutefois pas utilisée avec la solution encastrée 2. En effet, cela induirait des efforts différents dans les tiges d'une même rangée, ce qui n'est pas efficace.

Pour les solutions encastrées, des raidisseurs dans le prolongement des semelles sont également placés lorsque les calculs mènent à un espacement entre les boulons tel que certains d'eux doivent être positionnés au-delà des lignes joignant les extrémités des semelles. Dans ce cas, les boulons ne pourront pas être placés au-delà des lignes joignant l'extrémité des raidisseurs.

Avec la solution articulée 2, les raidisseurs ne sont pas utilisés.

2.4. Dispositions particulières

L'entreprise emploie quelques dispositions constructives particulières.

Premièrement, l'entreprise limite l'utilisation du mortier sans retrait au remplissage des réservations pour les bêtes et au réglage en hauteur de la platine d'extrémité. L'utilisation de ce matériau est coûteuse, d'autant plus dans les pays exotiques. En outre, dans ce type de pays, il est difficile de trouver du mortier sans retrait de bonne qualité et avec les caractéristiques nécessaires. Celui utilisé est donc rarement conforme aux exigences de calcul.

Sous la platine d'extrémité, des cales de réglage sont utilisées pour régler en hauteur la position de la colonne. Les cavités sont ensuite remplies avec du mortier sans retrait. L'épaisseur des cales est de minimum 10mm et maximum 30mm. Néanmoins, une tolérance d'exécution de 20mm est considérée. Par conséquent, cette épaisseur varie plutôt entre 30 et 50mm. Dans les calculs, elle est toujours prise égale à 30mm afin d'être sécuritaire.

Deuxièmement, beaucoup d'usines de chez Solvay se trouvent dans des zones à risques sismiques élevés. De plus, les activités de l'entreprise nécessitent l'emploi de nombreuses machines rotatives, vibrantes, etc. Ainsi, les structures sont soumises à des efforts alternés générant des problèmes de fatigue.

L'entreprise utilise des tiges précontraintes afin d'améliorer le comportement à la fatigue des assemblages en pieds de poteaux. Elle impose donc que toutes les tiges soient recouvertes d'une bande Denzo. Cette bande permet d'éviter le contact entre la tige et le béton et donc, d'augmenter la longueur de précontrainte.

C'est également pour augmenter la longueur de précontrainte que le réglage en hauteur de la colonne se fait habituellement à l'aide de cales métalliques positionnées sous la platine et pas avec des écrous.

Ensuite, la majorité des colonnes métalliques est posée sur des rehausses de fondation en béton d'une hauteur de minimum 20cm. Une des raisons est que les usines contiennent de nombreuses cuves de produits chimiques. Or, si, pour une quelconque raison, ces cuves se déversent, les éléments métalliques au niveau des fondations risquent de se corroder. C'est pourquoi, ils sont surélevés.

Enfin, Solvay impose des dimensions pour certains éléments des assemblages. Ces exigences sont reprises dans les feuilles de calcul présentées dans la section suivante.

3. Feuilles de calcul

Quatre feuilles de calcul ont été élaborées. Elles correspondent chacune à une des quatre solutions présentées à la section précédente. Elles permettent de dimensionner ces solutions et également, les solutions avec une ou plusieurs des variantes proposées.

Elles se présentent sous forme de tableaux et sont reprises aux *Annexes 1, 2, 3 et 4*.

Dans tous les cas, les feuilles de calcul vont permettre d'obtenir les efforts maximaux transmissibles par l'assemblage. Néanmoins, il existe deux manières différentes de les utiliser :

- Soit l'utilisateur connaît les caractéristiques (dimensions, caractéristiques mécaniques, etc.) de tous les éléments de l'assemblage et cherche les efforts maximaux auxquels il peut résister ;
- Soit l'utilisateur connaît les efforts appliqués à l'assemblage et souhaite donc définir ses caractéristiques.

Dans ce second cas, l'utilisateur fonctionne par essais et erreurs. Il définit des caractéristiques pour chacun des éléments à assembler. Ensuite, il s'assure que les caractéristiques sont adéquates pour résister aux efforts appliqués en comparant ceux-ci aux efforts résistants obtenus. Le cas échéant, il modifie la valeur des différents paramètres choisis.

Peu importe la méthode utilisée, l'objectif des feuilles de calcul est de fournir la procédure nécessaire au dimensionnement de la configuration d'assemblage choisie. L'utilisateur doit, à la fin de la lecture et de l'application de ce document, avoir tous les éléments nécessaires (dimensions, caractéristiques mécaniques, dispositions constructives, etc.) à la mise en œuvre de la liaison entre la colonne métallique et la fondation qu'il étudie.

Cette procédure est divisée en trois grandes étapes :

1. Choix de la configuration à étudier ;
2. Détermination des paramètres de calcul ;
3. Évaluation des efforts maximaux transmissibles.

Dans la première partie, la même figure (représentant schématiquement la solution étudiée) que celle présentée à la section précédente est reprise. Elle permet à l'utilisateur de visualiser la solution et d'en comprendre les différentes dispositions constructives. Les différentes variantes possibles appliquées à la solution choisie sont également illustrées.

Dans la seconde partie, les divers paramètres nécessaires à l'étape 3 sont définis. Ces paramètres sont les coefficients de sécurité, les efforts appliqués, les données géométriques des éléments à assembler et leurs caractéristiques mécaniques. L'utilisateur doit fournir une valeur pour chacun d'entre eux. Pour l'aider, les paramètres géométriques à définir sont représentés sur les figures de l'étape précédente.

Dans le cas où la valeur d'un paramètre est identique quelle que soit l'étude menée, celle-ci est directement proposée. Il arrive également que certains paramètres ne puissent prendre que quelques valeurs imposées par les exigences de chez Solvay. Les valeurs admissibles sont alors indiquées.

Enfin, dans la dernière partie, toutes les règles de calculs nécessaires à la détermination des efforts maximaux transmissibles sont fournies.

C'est dans cette partie de la feuille de calcul, que la méthode des composantes est appliquée. A l'image de ce qui a été fait dans le *Chapitre 4*, cette partie se décompose en autant de sections qu'il y a de types d'efforts à transmettre, donc trois pour les solutions articulées (traction, compression et cisaillement) et quatre pour les solutions encastrées (traction, compression, flexion et cisaillement).

Dans chacune des sections, premièrement, la formule permettant de connaître l'effort maximal transmissible par l'assemblage en pied de poteau est fournie. Celle-ci dépend de l'effort maximal acceptable par chacune des trois parties principales de l'assemblage (la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures).

Ainsi, dans un second temps, ces trois parties sont étudiées de manière indépendante. On commence également par définir l'effort maximal qu'elles peuvent transmettre. Dans chaque cas, celui-ci dépend de la résistance des composantes actives. Ces composantes sont donc étudiées les unes après les

autres. Pour ces études, les feuilles de calcul sont divisées en trois colonnes. La colonne de gauche reprend les composantes actives. Un ou plusieurs modes de ruine sont associés à chaque composante active. Ainsi, dans la colonne du milieu, on retrouve les règles de calcul associées au(x) mode(s) de ruine et définies au *Chapitre 4*. Ces règles permettent de déterminer l'effort maximal admissible par la composante afin d'éviter sa ruine. Elles proviennent des ouvrages de référence indiqués dans la dernière colonne. Dans certains cas, elles sont adaptées, par rapport à ce qui est trouvé dans l'ouvrage, à la situation particulière étudiée.

Les règles de calcul proposées tiennent compte d'une éventuelle combinaison d'efforts pour déterminer les efforts maximaux. Pour les solutions encastrees, l'évaluation des efforts de flexion et axiaux maximaux transmissibles tient compte d'une éventuelle interaction M-N. Comme au *Chapitre 4*, l'effort axial et l'effort de flexion sont considérés proportionnellement plus importants que l'effort tranchant. Ainsi, pour évaluer l'effort de cisaillement maximal acceptable, les règles de calcul tiennent compte d'une éventuelle interaction N-V ou M-N-V.

4. Conclusion

A l'aide des quatre feuilles de calcul proposées, les ingénieurs du Central Design Office de chez Solvay pourront dimensionner la plupart des configurations d'assemblage rencontrées lors de la conception de nouvelles structures. Les résultats obtenus avec ces feuilles de calcul et donc, par un dimensionnement des assemblages à l'aide de la méthode des composantes, pourront être comparés aux résultats obtenus avec les méthodes de calcul actuellement employées, en vue d'améliorer les standards de liaison actuellement utilisés au sein de l'entreprise.

CHAPITRE 6 : Conclusions et perspectives d'évolution

1. Conclusions

Ce mémoire est le fruit d'un travail de quatre mois en collaboration avec l'entreprise Solvay. Celle-ci avait exprimé, aux chercheurs de l'Université de Liège, le souhait d'améliorer ses standards et ses exigences liés au design et aux calculs des assemblages de pieds de poteaux, utilisés lors de travaux de génie civil au sein de ses usines.

Ayant été informée de la demande de Solvay, je me suis intéressée au sujet. En effet, mon parcours à l'École des Mines d'Alès en France, m'a apporté une formation davantage axée sur la pratique et sur la mise en relation avec l'entreprise. Ainsi, l'idée de réaliser mon travail de fin d'études en relation directe avec une entreprise m'a convaincue. Néanmoins, j'avais très peu de connaissances concernant les assemblages. D'ailleurs, la méthode des composantes m'était inconnue, avant de me lancer dans ce projet. Ce sujet était un réel défi. Ainsi, à travers la réalisation de ce travail, j'espère l'avoir relevé.

Avec pour objectif de répondre à la demande de Solvay, tout d'abord, l'ensemble des solutions d'assemblage de pieds de poteaux, les plus couramment rencontrées dans les structures métalliques, ont été inventoriées. Ces solutions ont été classées en huit familles. Les conditions d'utilisation, les méthodes de mise en œuvre et les éléments constitutifs de chacune de ces familles ont ensuite été décrits.

Lorsque les efforts, appliqués aux structures, sont importants ou que les conditions de mise en œuvre sont particulières, les solutions de base sont utilisées avec des « variantes ». Ces variantes sont exposées au *Chapitre 2*. Elles consistent en des modifications géométriques des éléments de base de l'assemblage et en l'ajout d'éléments renforçant l'assemblage. Elles permettent d'améliorer le comportement de ce dernier.

Il en résulte que l'ensemble des configurations proposé au *Chapitre 2* semble constituer une bibliothèque assez complète de solutions de liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation. Du moins, les solutions les plus souvent utilisées chez Solvay s'y retrouvent. Ainsi, l'entreprise pourra s'inspirer de cet inventaire afin d'y trouver des pistes d'améliorations pour ses standards de liaison.

Ensuite, dans le but d'obtenir tous les éléments utiles au dimensionnement des configurations d'assemblage du *Chapitre 2*, une méthode de calcul a dû être choisie. Les usines de Solvay étant implantées partout dans le monde, il est important de choisir une méthode de calcul validée dans la majorité des pays.

Les Eurocodes, bien que développés et officiellement validés en Europe, sont utilisés mondialement, surtout lorsqu'il s'agit du dimensionnement des assemblages. Or, les règles de calcul présentes dans l'Eurocode 3 partie 1-8, concernant les pieds de poteaux, reposent sur la méthode des composantes. C'est donc cette méthode qui est retenue.

Sur base de la méthode des composantes, au *Chapitre 4*, les éléments nécessaires au dimensionnement de toutes les solutions du *Chapitre 2* sont fournis.

Pour chaque type de sollicitations, premièrement, les composantes actives des différentes configurations étudiées sont identifiées. Or, certaines d'entre-elles se retrouvent dans plusieurs configurations. Ainsi, une liste de toutes les composantes potentiellement actives a ensuite été dressée.

Deuxièmement, chacune des composantes est caractérisée en termes de résistance. Cette caractérisation permet d'évaluer les efforts maximaux qu'elle peut transmettre, quelle que soit la solution dans laquelle elle est utilisée. En effet, la méthode des composantes rend valable la

caractérisation d'une composante pour toutes les configurations d'assemblage dans lesquelles elle se trouve. De plus, certaines composantes, bien qu'étant différentes, ont un comportement analogue dans des configurations d'assemblage distinctes. Leur résistance sera, dans ce cas, également caractérisée grâce aux mêmes règles de calcul. Dès lors, l'étude démontre que la majorité des éléments nécessaires à la caractérisation des composantes des solutions proposées au *Chapitre 2* sont identiques.

Enfin, les composantes sont assemblées afin d'étudier le comportement global de l'assemblage. Il s'agit de déterminer la résistance du pied de poteau et donc, les sollicitations maximales qu'il peut transmettre. Ces sollicitations sont relatives à la composante la plus faible de l'assemblage. Les dispositions constructives seront toujours choisies telles que cette composante présente un mode de ruine ductile.

Pour les mêmes raisons que celles qui ont poussé le choix de la méthode des composantes, les règles nécessaires à la caractérisation de la résistance des pieds de poteaux sont principalement extraites des Eurocodes. Au total, 74% d'entre-elles proviennent des Eurocodes. Si aucune information n'a pu être trouvée dans les Eurocodes, des documents, sur lesquels sont basés les Eurocodes ou réalisés à partir de ceux-ci, sont utilisés. Ce type de documents reprend 23% des règles répertoriées au *Chapitre 4*. Au final, seuls 3% des règles sont fournis par des ouvrages anciens, dont les principes sont parfois dépassés. Ceux-ci devront être considérés avec prudence, voire remis à jour.

Les principes proposés dans ce projet permettront probablement d'améliorer les standards de liaison de chez Solvay. Si tel est le cas, les nouveaux standards établis pourront être acceptés par la majorité des pays dans lesquels l'usine est implantée, moyennant, si nécessaire, l'utilisation de coefficients de sécurité particuliers.

Enfin, la méthode des composantes a été appliquée à chacune des quatre configurations d'assemblage couramment rencontrées chez Solvay, dans les feuilles de calcul présentées en annexe de ce mémoire. Ces feuilles de calcul sont élaborées à partir des éléments fournis au *Chapitre 4*. Elles fournissent toutes les règles de calcul permettant d'évaluer les efforts maximaux transmissibles pour chacune des solutions étudiées et leurs variantes, en fonction des caractéristiques géométriques, de résistance, etc. imposées.

2. Perspectives d'évolution

Une étude comparative des solutions les plus couramment rencontrées concernant les assemblages de pieds de poteaux ainsi que les éléments nécessaires au dimensionnement de ces assemblages (dimensionnement basé sur la méthode des composantes) ont été présentés à l'entreprise Solvay. L'entreprise s'est montrée particulièrement intéressée par quatre configurations d'assemblage, habituellement utilisées dans ses usines, et par la méthode de calcul suggérée. De ce fait, des feuilles de calcul, décrivant l'ensemble des étapes à suivre pour dimensionner les quatre solutions courantes et leurs variantes, ont été élaborées.

Grâce à ce projet, les premiers éléments nécessaires à l'amélioration des standards de chez Solvay, concernant la liaison entre les colonnes métalliques et leur fondation, ont été délivrés. Des études complémentaires devront néanmoins être envisagées.

Premièrement, les feuilles de calcul proposées doivent être appliquées à des cas concrets rencontrés chez Solvay. En effet, il serait intéressant de connaître à quelles dispositions constructives (dimensions des éléments de l'assemblage, variantes à mettre en place, etc.) aboutit la méthode de calcul proposée dans cette étude, pour des cas de chargement couramment rencontrés au sein des usines de l'entreprise.

Deuxièmement, les résultats obtenus, par l'application de ces feuilles de calcul et donc, par la méthode des composantes, doivent être comparés à ce qui est actuellement réalisé chez Solvay.

La méthode de calcul proposée dans ce projet mène-t-elle à des dispositions constructives différentes (dimensions des éléments, détermination du besoin d'une bêche et de raidisseurs, etc.) de ce qui est actuellement réalisé par l'entreprise ? Les recommandations obtenues à partir de la méthode des composantes permettent-elles d'améliorer les standards de liaison actuels ? Quelles sont les exigences propres à chaque pays ? Comment en tenir compte dans les nouveaux standards ? Selon les résultats obtenus avec la méthode des composantes, les quatre solutions couramment utilisées par l'entreprise sont-elles adéquates ? Certaines solutions proposées au *Chapitre 2* seraient-elles plus adaptées ?

Il s'agit de nouvelles questions auxquelles il serait intéressant de répondre afin de proposer de nouveaux standards de liaison.

Enfin, en raison des faibles moyens dont disposent certains pays dans lesquels l'entreprise Solvay est implantée, il pourrait être intéressant de mener une étude pour simplifier la mise en œuvre des structures. En outre, les structures de chez Solvay sont parfois sujettes à des cas de chargement particuliers, notamment dus à des actions sismiques, à des machines rotatives, à des ponts roulants, etc. Ces types de chargement peuvent contraindre Solvay à imposer des dispositions particulières au niveau des assemblages. Ainsi, des études spécifiques concernant certaines configurations d'assemblage pourraient être menées.

J'ai notamment pu découvrir grâce à cette étude que l'apport du génie civil en matière de gestion de chantier peut contribuer à améliorer continuellement les techniques de construction garant de la pérennité et de la sécurité des ouvrages. La connaissance scientifique s'appuie sur des règles et des principes acquis au fil du temps tout en constatant qu'elle est évolutive. Il s'agit d'un apprentissage important pour moi qui m'incite à poursuivre continuellement le développement de mes compétences professionnelles.

Outre la démarche scientifique qu'implique mon travail de fin d'études, j'ai découvert à titre personnel que je serai confrontée non seulement à des défis complexes au niveau scientifique et technique mais également à des enjeux contextuels différents selon le pays concerné par le ou les chantiers.

Bibliographie

- [1] **Bjorhovde, Reida, Dowling, Patrick et Harding, John.** *Constructional Steel Design*. Essex : Elsevier Science Publishers LTD, 1992.
- [2] **Boereave, P., et al.** *Analyse et dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux*. Liège : GRAMME.
- [3] **Bouguin, Valéry, et al.** *Effective length of T-stub of RHS column base plates*. Prague et Clermont Ferrand : s.n., 2000.
- [4] **Bureau de normalisation.** *Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 4 : Conception et calcul des éléments de fixation pour béton*. Bruxelles : s.n., 2018. NBN EN 1992-4:2018.
- [5] **Bureau de normalisation.** *Eurocode 3: Calcul des structures en acier - Partie 1-1: Règles générales et règles pour les bâtiments*. Bruxelles : s.n., 2005. NBN EN 1993-1-1.
- [6] **Bureau de normalisation.** *Eurocode 3: Calcul des structures en acier - Partie 1-8: Calcul des assemblages*. Bruxelles : s.n., 2005. NBN EN 1993-1-8.
- [7] **Couchaux, M.** *Pieds de poteaux articulés par platine d'assise avec platine de présellement et bêche*. s.l. : CTICM, 2014. 4-2014.
- [8] **Gresnigt, Nol, et al.** *Column bases in shear and normal force*. s.l. : HERON, 2008. Vol. 53 (2008) No. 2/3.
- [9] **Guisse, S., Jaspert, J.-P. et Vandegans, D.** *Application of the component method to column bases experimentation and development of a mechanical model for characterization*. Liège : Research Center of the Belgian Metalworking industry, 1996. 195.
- [10] **Horman, Philippe.** *Proposition de deux sujets de fin d'études dans le domaine des structures métalliques*. Bruxelles : Solvay, 2017.
- [11] **Horman, Philippe.** *Interface entre les structures métalliques et leurs fondations*. Bruxelles : Solvay, 2018.
- [12] **Horová, Kamila, Sokol, Zdene et Wald, František.** *Design of circular hollow base plates*. Budapest : EUROSTEEL, 2011.
- [13] **Jaspert, Jean-Pierre.** *Cours : Assemblages structuraux*. Liège : Université de Liège, Faculté des sciences appliquées, 2019.
- [14] **Jaspert, 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, 1996-1997.
- [15] **Jaspert, J.P., et al.** *European Recommendations for the Design of Simple Joints in Steel Structures*. s.l. : ECCS, 2009. 126.
- [16] **Jaspert, J.P. et Vandegans, D.** *Application de la méthode des composantes aux pieds de poteaux - 1^{ière} partie: expérimentation et développement d'un modèle de calcul de résistance*. s.l. : CTICM, 1997. 2-1997.
- [17] **Lescouarc'h, Yvon.** *Les pieds de poteaux articulés en acier*. Puteaux Cedex : CTICM, 1982.
- [18] **Lescouarc'h, Yvon.** *Les pieds de poteaux encastrés en acier*. St Rémy-les-Chevreuse : CTICM, 1988.
- [19] **Magri.** *Conception et dimensionnement des pieds de poteaux et fondations*. Marrakech : CFP, 2017.

- [20] **Pertold, J., Wald, F. et Xiao, R.Y.** . *Embedded steel column bases II. Design model proposal*. Southampton : Elsevier Science Ltd, 2000. 56 (2000) 271–286.
- [21] **Ryan, Ivor**. *Assemblages des pieds de poteaux en acier*. Paris : CTICM, 2015.
- [22] **Selzner, Y.** Notes sur les pratiques techniques. *Les pieds de poteaux*. [En ligne] [Citation : 15 Février 2019.] <https://notech.franceserv.com/pieds-de-poteaux.html>.
- [23] **Solvay**. Solvay en Belgique | Solvay. *Solvay*. [En ligne] 2018. [Citation : 30 Avril 2019.] <https://www.solvay.be/fr/index.html>.

Annexes

Annexe 1 : Feuille de calcul – Solution articulée 1

Feuille de calcul : *Assemblage articulé avec platine d'extrémité seule*

Note d'utilisation :

Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage présentées ci-après. Elle fournit les efforts maximaux auxquels l'assemblage peut être soumis en fonction des caractéristiques de l'assemblage imposées.

Pour cela, dans un premier temps, l'utilisateur doit choisir la configuration qu'il étudie.

Dans un second temps, toutes les données nécessaires au dimensionnement sont définies.

Enfin, les efforts maximaux transmissibles (efforts de compression, de traction et de cisaillement) sont déterminés à l'aide de règles provenant de documents de référence sur les pieds de poteaux.

Ce dimensionnement repose sur la méthode des composantes.

Configurations prises en compte

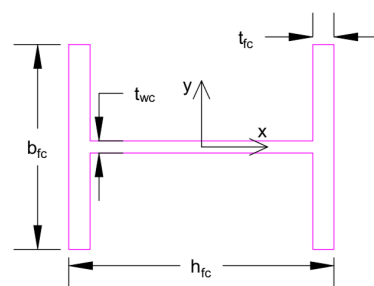
Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage de pieds de poteaux (en I ou H) articulés avec platine d'extrémité seule.

Quatre variantes possibles sont prises en compte :

- Tiges droites avec ou sans plat d'ancrage ;
- Deux ou quatre tiges ;
- Une bêche en I parallèle au profilé de la colonne ;
- Des raidisseurs dans le prolongement de l'âme ou des semelles.

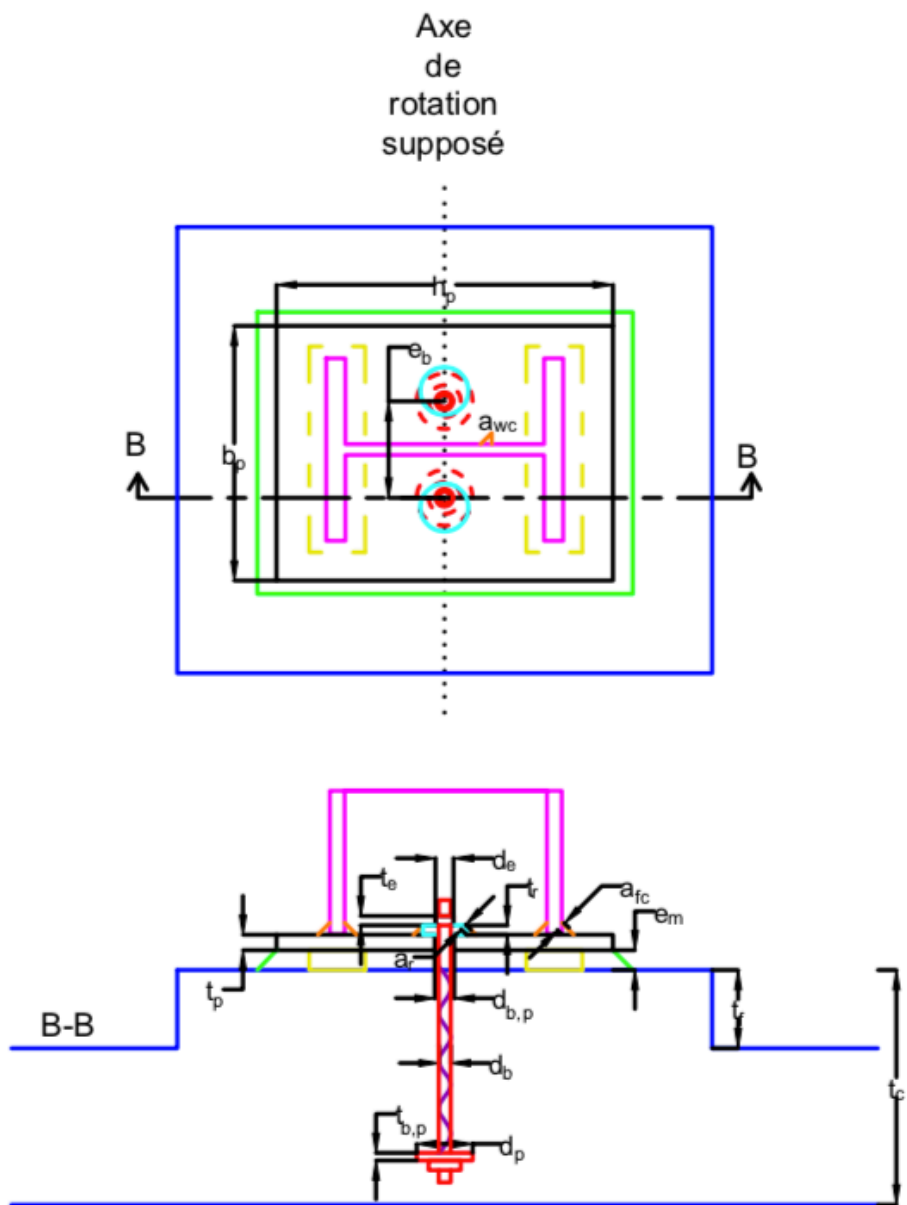
Celles-ci sont présentées sur les figures des pages suivantes.

Remarque : la feuille de calcul est réalisée en considérant les variantes individuellement. Néanmoins, en utilisant les règles définies de façon adéquate, celles-ci peuvent être combinées.



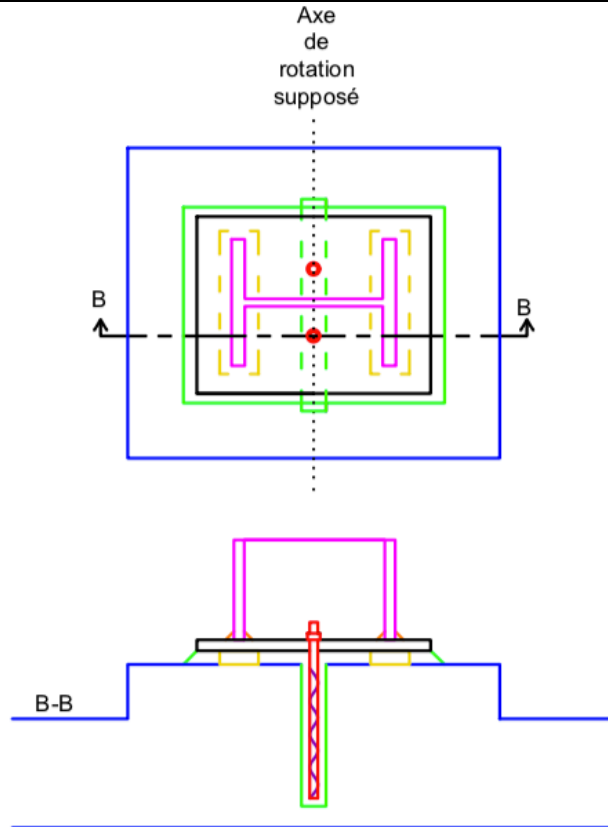
Profilé de la colonne

Solution de base



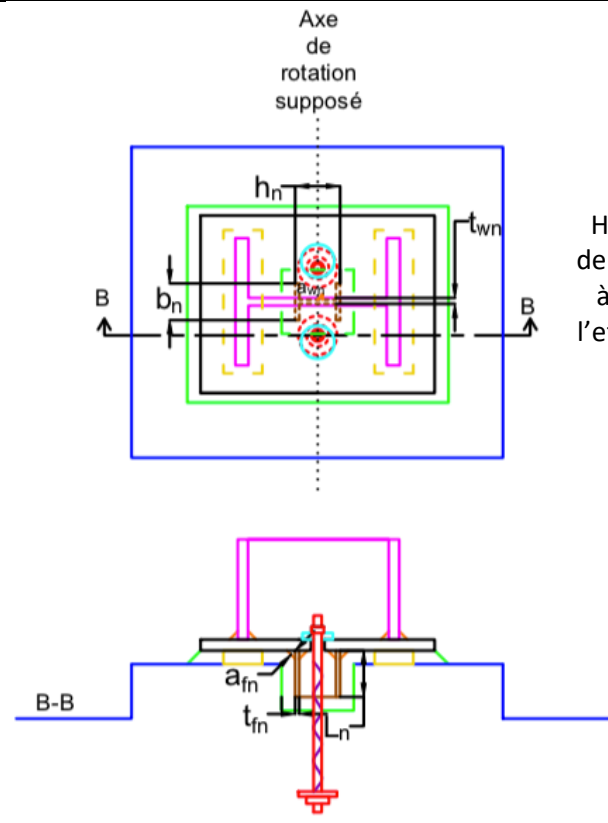
Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo

Variante 1 : Tiges droites non-préscellées



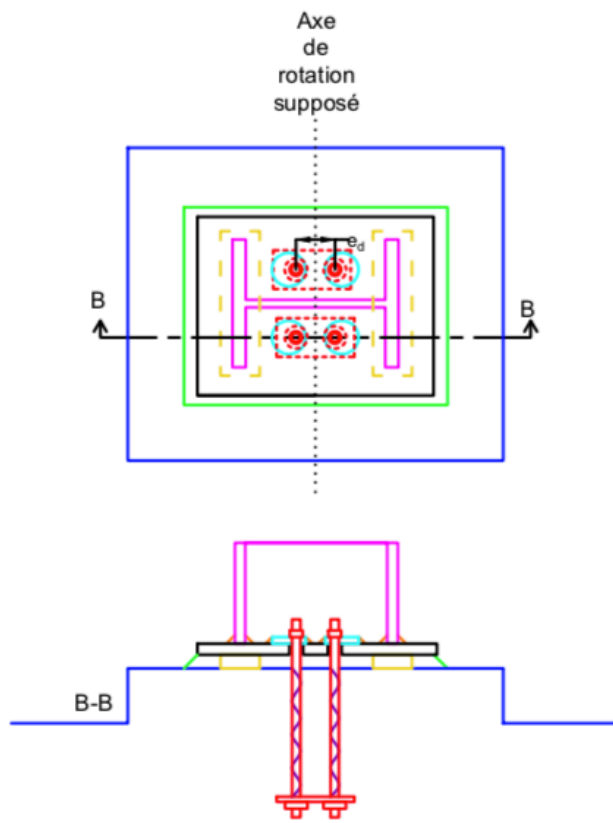
Légende - Poteau, platine, tiges, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo

Variante 2 : Bêche



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, bêche

Variante 3 : 4 tiges

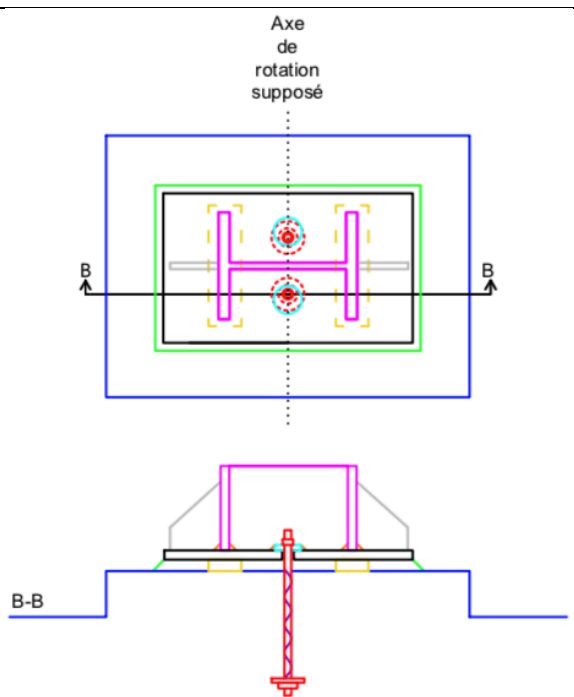


Hypothèse : les tiges sont suffisamment proches que pour pouvoir considérer l'assemblage articulé.

Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo

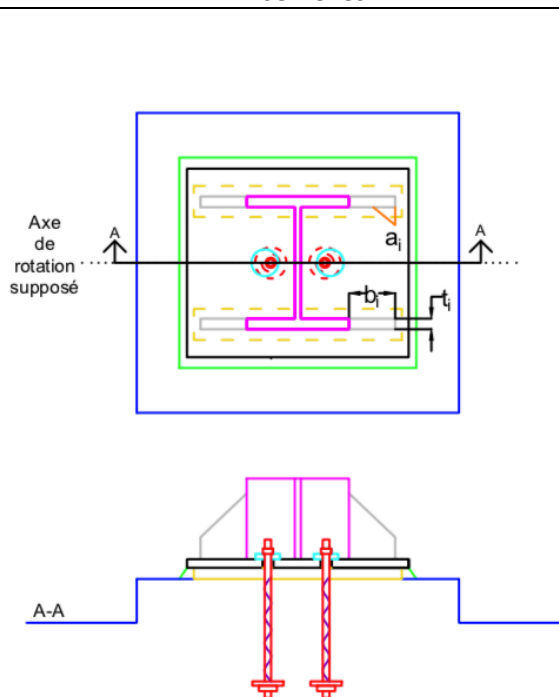
Variante 4 : Raidisseurs

a. Raidisseurs dans le prolongement de l'âme



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, raidisseurs

b. Raidisseurs dans le prolongement des semelles

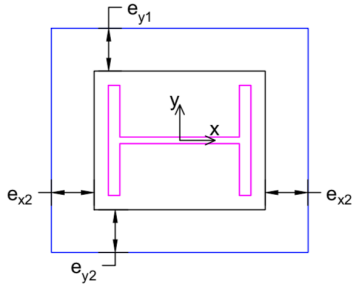


Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, raidisseurs

Définition des données	
Efforts appliqués	
N_{Ed}	Effort normal de traction ou de compression
$V_{x,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe x
$V_{y,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe y

Coefficients partiels de sécurité		
γ_{M0}	Coefficient partiel pour la résistance des sections en acier, pris égal à 1	EN 1993-1-1
γ_C	Coefficient partiel pour le béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{M2}	Coefficient partiel pour les assemblages par soudure, pris égal à 1,25 Coefficient partiel pour les boulons, pris égal à 1,25	EN 1993-1-8
γ_{MC}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par cône de béton, du bord du béton, par éclatement du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{Msp}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par fendage du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4

Caractéristiques des composantes		
Colonne		
f_{yc}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay: S235, S275 ou S355
E	Module de Young	
/	Profilé	Choix imposés par Solvay : IPE, HEA, HEB ou reconstitué
b_{fc}	Largeur du profilé	Solvay impose une valeur maximale de 400mm
h_{fc}	Hauteur du profilé	Solvay impose une valeur comprise entre 140 et 1000mm
t_{fc}	Épaisseur des semelles	Solvay impose une valeur maximale de 40mm
t_{wc}	Épaisseur de l'âme	Solvay impose une valeur maximale de 25mm
r	Congé de raccordement	
A_{fc}	Aire de la section	
I_y	Inertie selon l'axe y-y	
I_x	Inertie selon l'axe x-x	
$A_{vc,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vc,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
a_{wc}	Gorge des soudures entre l'âme et la platine	De façon sécuritaire, vu les nuances d'acier imposées, Solvay considère que si la gorge des soudures a est supérieure à la moitié de l'épaisseur d'un des deux éléments à assembler, la soudure est une soudure à pleine pénétration. Cette remarque est valable pour toutes les soudures réalisées.
a_{fc}	Gorge des soudures entre les semelles et la platine	
l_{wc}	Longueur des soudures entre l'âme et la platine	
l_{fc}	Longueur des soudures entre une semelle et la platine	

Platine		
f_{yp}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
b_p	Largeur	
h_p	Hauteur	
t_p	Épaisseur	Solvay impose une valeur maximale de 40mm
$d_{b,p}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose des valeurs en fonction du diamètre du boulon : M12: 54mm, M16: 58mm, M20: 62mm, M22: 64mm, M24: 66mm, M27: 69mm, M30: 73mm
Béton		
Hypothèse : Les caractéristiques mécaniques du mortier de scellement sont identiques à celles du béton de la fondation.		
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton	Choix imposés par Solvay : C25/30 ou C30/37
e_m	Épaisseur du mortier de scellement	Solvay impose une valeur comprise entre 30 et 50mm. Ces valeurs tiennent compte d'une tolérance d'exécution de 20mm. Dans les calculs, on tiendra souvent compte de l'épaisseur minimale, soit 30mm.
t_f	Épaisseur de la rehausse	Solvay impose une valeur minimale de 200mm
t_c	Épaisseur de la fondation (rehausse comprise)	
e_{x1}	Dimensions en plan de la rehausse 	
e_{x2}		
e_{y1}		
e_{y2}		
		Légende – Colonne, platine, rehausse
β_j	Coefficient du matériau de scellement, pris égal à 2/3	EN 1993-1-8
Tiges : boulons et écrous		
f_{yb}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : 5.6 avec $f_{yb} = 300MPa$ ou 8.8 avec $f_{yb} = 640MPa$
/	Type de tiges	Droites ou avec plat
n_b	Nombre de tiges par rangée	
n_r	Nombre de rangées	1 ou 2
e_b	Distance entre 2 tiges d'une même rangée	
e_d	Distance entre 2 rangées de tiges	Variante 3
d_b	Diamètre d'un boulon	Choix imposés par Solvay : M12, M16, M20, M22, M24, M27, M30
d_p	Diamètre du plat d'ancrage	
$t_{b,p}$	Épaisseur du plat d'ancrage	
A_s	Aire résistante du boulon	
t_e	Épaisseur de l'écrou	
d_e	Diamètre extérieur de l'écrou	

Rondelles		
f_{yr}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235 ou S355
t_r	Épaisseur d'une rondelle	Solvay impose des épaisseurs standards pour les rondelles en fonction du diamètre du boulon et de la nuance d'acier de la rondelle.
a_r	Gorge des soudures entre une rondelle et la platine	
l_r	Longueur des soudures entre une rondelle et la platine	
$d_{b,r}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose un diamètre égal à celui du boulon augmenté de 2mm pour les boulons M12 à M27 et de 3mm pour les boulons M30.
Raidisseurs		
b_i	Longueur d'un raidisseur	
t_i	Épaisseur d'un raidisseur	Lorsque les raidisseurs sont soumis à un effort de compression, ils ne voilent pas si : $t_i \geq \frac{L_i}{25}$ (Livre d'Yvon Lescouarc'h sur les pieds de poteaux articulés)
f_{yi}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
a_i	Gorge des soudures entre un raidisseur et la platine	
l_i	Longueur des soudures entre un raidisseur et la platine	
Bêche (Profilé en I ou H)		
f_{yn}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
h_n	Hauteur du profilé	
b_n	Largeur du profilé	
L_n	Profondeur totale de la bêche	
t_{fn}	Épaisseur des semelles	
t_{wn}	Épaisseur de l'âme	
$A_{vn,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vn,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
$I_{y,n}$	Inertie selon l'axe y-y	
$I_{x,n}$	Inertie selon l'axe x-x	
a_{fn}	Gorge des soudures entre les semelles et la platine	
a_{wn}	Gorge des soudures entre l'âme et la platine	
l_{fn}	Longueur des soudures entre une semelle et la platine	
l_{wn}	Longueur des soudures entre l'âme et la platine	

Effort maximal transmissible en compression			
Les composantes actives sont :			
<ul style="list-style-type: none"> - Solution de base et variantes 1, 2 et 3 : colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, béton de fondation ; - Variante 4 : colonne, raidisseurs, soudures entre la platine d'extrémité et la colonne et entre la platine et les raidisseurs, platine d'extrémité, béton de fondation. 			
<p>L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties :</p> $N_{C,Rd} = \min (N_{C,fc,Rd}; N_{C,a,Rd}; N_{C,w,Rd})$ <p>Il ne devrait jamais être relatif à $N_{C,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.</p>			
1. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{C,fc,Rd}$			
$N_{C,fc,Rd} = \min (N_{C,fcw,Rd}; N_{C,Rd})$ <p>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</p> <p>Résistance de calcul à la compression de la semelle et de l'âme de la colonne combinées :</p> $N_{c,fcw,Rd} = \frac{M_{C,Rd}}{h_{fc} - t_{fc}}$ <p>$M_{C,Rd}$ = moment résistant de calcul de la section transversale</p> <p>Résistance en section du poteau :</p> $N_{C,Rd} = \begin{cases} \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 1, 2 ou 3} \\ \frac{A_{eff} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 4} \end{cases}$ <p>A_{eff} = Aire de la section efficace</p>	Eurocode 3 partie 1-8	Eurocode 3 partie 1-1	
2. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{C,a,Rd}$			
<p>Lors de la transmission d'un effort de compression, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pour la solution de base et les variantes 1, 2 et 3 : la colonne, la platine et le béton ; - Pour la variante 4 : la colonne, les raidisseurs, la platine et le béton. <p>Ces composantes forment ensemble des tronçons en T-équivalents.</p>			
Tronçons en T : Colonne + Platine + Béton (+ Raidisseurs)	<p>Solution de base et variantes 1, 2, 3 : $N_{C,a,Rd} = F_{c,1,Rd} + F_{c,2,Rd}$</p> <p>Résistance à la pression localisée du béton :</p> $f_{jd} = \beta_j \cdot \alpha_{bf} \cdot f_{cd}$ $\alpha_{bf} = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$ <p>Aire maximale de diffusion :</p> $A_{c1} = \min \left\{ 9 \cdot A_{c0} \right. \\ \left. h_f \cdot b_f \right.$ <p>Hauteur de la rehausse (dimension en plan) : $h_f = h_p + e_{x1} + e_{x2}$</p> <p>Largeur de la rehausse : $b_f = b_p + e_{y1} + e_{y2}$</p> <p>Aire chargée : $A_{c0} = b_p \cdot h_p$</p> <p>Résistance de calcul du béton à la compression :</p> $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$	Eurocode 3 partie 1-8	Eurocode 2 partie 1-1

	<p>Variante 4b : $N_{C,a,Rd} = F_{c,1,Rd} + F_{c,2,Rd} + F_{c,4,Rd}$</p> <p>Résistance des tronçons en T sous les raidisseurs : $F_{c,4,Rd} = 2 \cdot \min (F_{c,fjd,Rd}; F_{c,Rd})$</p> <p>Résistance à la pression localisée sous un raidisseur : $F_{c,fjd,Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$</p> $l_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq b_i \text{ (recouvrement)} \\ b_i & \text{si } c \leq \frac{h_p - (h_{fc} + b_i)}{2} \\ \frac{h_p - h_{fc}}{2} - c & \text{si } c > \frac{h_p - (h_{fc} + b_i)}{2} \end{cases}$ $b_{eff} = \min \begin{cases} t_i + 2 \cdot c \\ b_p \end{cases}$ <p>Résistance en compression des raidisseurs : $F_{c,Rd} = \max \begin{cases} 0 \text{ (recouvrement)} \\ \frac{(b_i - c) \cdot t_i \cdot f_{yi}}{\gamma_{M0}} \end{cases}$</p>	
3. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{c,w,Rd}$		
Soudures entre la colonne et la platine	$N_{c,w,Rd} = N_{c,wc,Rd} + N_{c,wfc,Rd}$ <p><i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i></p> <p>$N_{c,wc,Rd}$ = Résistance des soudures entre l'âme du poteau et la platine</p> <p>$N_{c,wfc,Rd}$ = Résistance des soudures entre les semelles du poteau et la platine</p> <p>La formule générale d'évaluation de la résistance des soudures est :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	Eurocode 3 partie 1-8

Effort maximal transmissible en traction

Les composantes actives sont :

- Solution de base et variante 2 : Colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton ;
- Variante 1 : Colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, tiges, béton ;
- Variante 3 : Colonne, raidisseurs, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité et entre les raidisseurs et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faibles de ces 3 parties :

$$N_{C,Rd} = \min (N_{T,fc,Rd}; N_{T,a,Rd}; N_{T,w,Rd})$$

Il ne devrait jamais être relatif à $N_{T,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

1. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{T,fc,Rd}$

$$N_{T,fc,Rd} = N_{t,Rd}$$

Résistance en section de la colonne :

Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

Eurocode 3
partie 1-1

2. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{T,a,Rd}$

Pour la transmission de l'effort de traction, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Pour la solution de base et variantes 2, 3 et 4 : la platine, les rondelles, les tiges, le béton ;
- Pour la variante 1 : la platine, les tiges, le béton.

L'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné correspond à : $N_{T,a,Rd} = n_r \cdot F_{T,Rd}$

$F_{T,Rd}$ = Résistance d'un tronçon en T tendu :

- Effet de levier : $F_{T,Rd} = \min (F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$;
- Sans effet de levier : $F_{T,Rd} = \min (F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$.

Remarque 1 :

Les modes de ruine 2 et 3 sont relatifs à la rupture en section des tiges. L'effort maximal transmissible de l'assemblage boulonné ne devrait donc pas être relatif à ceux-ci.

Remarque 2 :

L'effort maximal ne dépend ni des modes de ruines possibles des rondelles, ni de ceux du béton.

Les dimensions des rondelles seront toujours choisies telles que cette composante ne provoque jamais la ruine de l'assemblage.

Les modes de ruine du béton sont des modes de ruine fragile à éviter à tout prix. Ainsi, les dispositions constructives sont toujours choisies telles que ces modes de ruine ne se produisent jamais.

Remarque 3 :

Les modes de rupture liés aux armatures (rupture de l'acier de l'armature et résistance à la rupture d'ancrage de l'armature) ne sont pas pris en compte dans cette feuille de calcul. Les règles de calcul qui y sont relatives se trouvent dans l'Eurocode 2 partie 4.

L'effet levier est à prendre en compte si $L_b \leq L_b^*$ (Eurocode 3 partie 1-8)

$$\text{Avec } L_b = 8 \cdot d_b + e_m + t_p + t_r + \frac{t_e}{2} \text{ et } L_b^* = \frac{8,8 \cdot m_y^3 \cdot A_s}{l_{eff,1} \cdot t_p^3}$$

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc})$$

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m_y$$

$$m_y = \frac{e_b - t_{wc}}{2} - 0,8\sqrt{2} \cdot a_{wc}$$

Solution de base et variantes 1, 2, 4 :

$$l_{eff,nc} = 4 \cdot m_y + 1,25 \cdot e$$

Variante 3 :

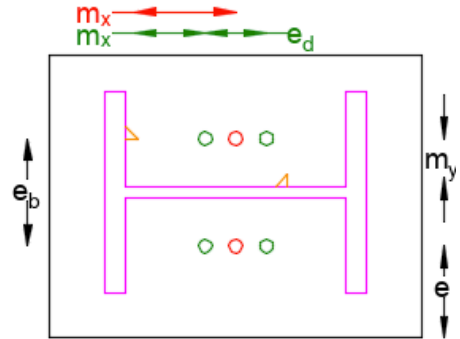
$$l_{eff,nc} = \min(\alpha \cdot m_y; \alpha \cdot m_y - (2 \cdot m_y + 0,625 \cdot e) + 0,5 \cdot e_d)$$

$$e = \frac{b_p - e_b}{2}$$

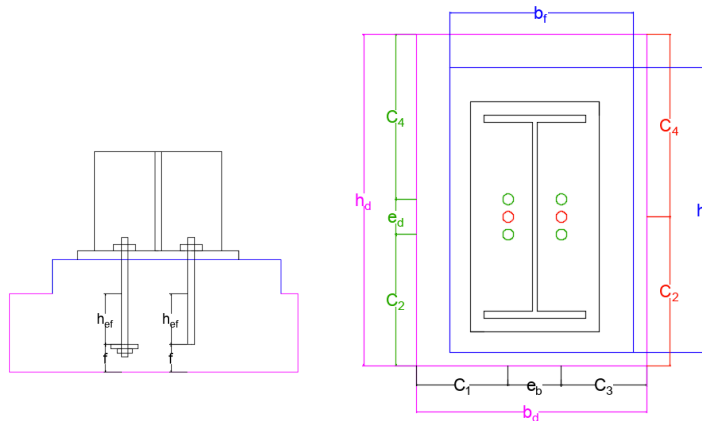
α est déterminé à l'aide de la figure 6.11 de l'EN 1993-1-8

avec :

$$\lambda_1 = \frac{m_y}{m_y + e} \text{ et } \lambda_2 = \frac{m_x}{m_y + e}$$



Platine	Résistance associée au mode de ruine 1 : $F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_y}$ $M_{pl,1,Rd} = l_{eff,1} \cdot m_{pl,Rd}$ $m_{pl,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot f_{yp}}{4 \cdot \gamma_{M0}}$	Eurocode 3 partie 1-8
	Résistance associée au mode de ruine 1-2 : $F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_y}$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges - Platine	Résistance associée au mode de ruine 2 : $F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + 2 \cdot n \cdot F_{t,Rd}}{m_y + n}$ $M_{pl,2,Rd} = l_{eff,2} \cdot m_{pl,Rd}$ $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$ $n = \min(e; 1,25 \cdot m_y)$ $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $k_2 = 0,9$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges	Résistance associée au mode de ruine 3 : $F_{T,3,Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd}$	Eurocode 3 partie 1-8
Colonne	Résistance associée au mode de ruine 4 : $F_{T,4,Rd} = \frac{b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$ $b_{eff,t,wc} = \min(l_{eff,1}; l_{eff,2})$	
Tiges – Béton	Résistance à la rupture par cône de béton : $N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \leq N_{T,a,Rd}$ $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N}$ $N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1,5}$	Eurocode 2 partie 4



Légende - Platine et profilé, rehausse, fondation, variante 3

$$k_1 = \begin{cases} 7,7 \text{ béton fissuré} \\ 11 \text{ béton non fissuré} \end{cases}$$

$A_{c,N}$ = surface projetée réelle

Hypothèse : La fondation en béton est rectangulaire ou carrée.

Pour la solution de base et les variantes 1, 2, 4 :

$$A_{c,N} = \left(2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_b}{2} \right) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_3) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_1) \right) \cdot \left(\min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_2) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_4) \right)$$

Variante 3 :

$$A_{c,N} = \left(2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_b}{2} \right) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_3) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_1) \right) \cdot \left(\min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_2) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_4) + 2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_d}{2} \right) \right)$$

$$s_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef}$$

$$A_{c,N}^0 = \text{surface projetée de référence} = n_b \cdot s_{cr,N}^2$$

$$\psi_{s,N} = \psi_s \cdot \psi_c$$

$$\psi_s = \psi_{s,y} \cdot \psi_{s,x}$$

$$\psi_{s,y} = \frac{1 + \frac{e_b}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

Pour la solution de base et les variantes 1, 2, 4 :

$$\psi_{s,x} = 1$$

Variante 3 :

$$\psi_{s,x} = \frac{1 + \frac{e_d}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

$$\psi_c = \psi_{c,y} \cdot \psi_{c,x}$$

$$\psi_{c,y} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_1; c_3)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$c_{cr,N} = 1,5 \cdot h_{ef}$$

$$\psi_{c,x} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_2; c_4)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$\psi_{re,N} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1$$

$$\psi_{ec,N} = \psi_{M,N} = 1$$

Résistance à la rupture par fendage du béton :

$$\text{Sinon } N_{Rd,sp} = \frac{N_{Rk,sp}}{\gamma_{Msp}} \leq N_{T,a,Rd}$$

Livre du
CTICM

L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si ces deux conditions sont satisfaites :

$$\begin{cases} c \geq c_{cr,sp} \\ t_c - t_f \geq h_{min} \end{cases}$$

$$c = \min(c_1; c_2; c_3; c_4)$$

$c_{cr,sp}$ = distance au bord caractéristique en cas de fendage sous charge, obtenue dans la spécification technique du produit

h_{min} = épaisseur minimale autorisée pour l'élément en béton, obtenue dans la spécification technique du produit

$$N_{Rk,sp} = N_{Rk,sp}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{h,sp}$$

$$N_{Rk,sp}^0 = \min(N_{Rk,p}; N_{Rk,c}^0)$$

$N_{Rk,p} = 0N$ car pas de résistance à l'adhérence vu l'utilisation de bande DENZO

$A_{c,N}, A_{c,N}^0, \psi_{s,N}, \psi_{re,N}, \psi_{ec,N} \rightarrow$ Idem que pour le calcul de la résistance à la rupture par cône de béton mais en utilisant $s_{cr,sp}$

et $c_{cr,sp}$

$$s_{cr,sp} = 2 \cdot c_{cr,sp}$$

$$\psi_{h,sp} = \left(\frac{t_c - t_f}{h_{min}} \right)^2 \leq \max \left(1; \left(\frac{h_{ef} + 1,5 \cdot c}{h_{min}} \right)^2 \right) \leq 2$$

$$c = \min(c_1; c_3)$$

Résistance à la rupture par éclatement du béton :

$$N_{Rd,cb} = N_{Rd,i,cb} \leq \frac{N_{T,a,Rd}}{2 \cdot n_r} \text{ avec } i = \text{nombre de bords}$$

(généralement 4)

Cette résistance est évaluée pour chaque bord en considérant la tige la plus proche du bord étudié.

L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si $c_i >$

$$0,5 \cdot h_{eff}$$

$$N_{Rk,i,cb} = N_{Rk,i,cb}^0 \cdot \frac{A_{c,i,Nb}}{A_{c,i,Nb}^0} \cdot \psi_{s,i,Nb} \cdot \psi_{g,i,Nb} \cdot \psi_{ec,Nb}$$

$$N_{Rk,i,cb}^0 = k_5 \cdot c_i \cdot \sqrt{A_h} \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ avec } c_i \leq 0,5 \cdot h_{eff}$$

$$k_5 = \begin{cases} 8,5 & \text{si béton fissuré} \\ 12,2 & \text{si béton non fissuré} \end{cases}$$

$$A_h = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_b^2)$$

$A_{c,i,Nb}$ = surface projetée réelle

Solution de base et variantes 1, 2, 4 :

$$\text{Si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3, A_{c,i,Nb} = (\min(c_2; 2 \cdot c_i) + \min(c_4; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{ef}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

$$\text{Si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4, A_{c,i,Nb} = (\min(c_1; 2 \cdot c_i) + \min(e_b; 4 \cdot c_i) + \min(c_3; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{ef}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

Variante 3 :

$$\text{Si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3, A_{c,i,Nb} = (\min(c_2; 2 \cdot c_i) + \min(c_4; 2 \cdot c_i) + \min(e_d; 4 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{ef}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

$$\text{Si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4, A_{c,i,Nb} = (\min(c_1; 2 \cdot c_i) + \min(e_b; 4 \cdot c_i) + \min(c_3; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{ef}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

$$A_{c,i,Nb}^0 = (4 \cdot c_i)^2$$

$$\psi_{s,i,Nb} = 0,7 + 0,3 \cdot \frac{c_j}{2 \cdot c_i} \leq 1$$

	$c_j = \begin{cases} \min(c_2; c_4) & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ \min(c_1; c_3) & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$ $\psi_{g,i,Nb} = \sqrt{n} + (1 - \sqrt{n}) \cdot \frac{e_i}{4 \cdot c_i}$ <p>Solution de base et variantes 1, 2, 4 :</p> $e_i = \begin{cases} 0 & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ e_b & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$ <p>Variante 3 :</p> $e_i = \begin{cases} e_d & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ e_b & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$ $\psi_{ec,Nb} = 1$	
Rondelles	<p>Solution de base et variantes 2, 3 et 4 :</p> $F_{T,r,Rd} = \min(B_{r,Rd}; F_{t,pl,Rd}) \leq N_{T,a,Rd}$ <p>Résistance au poinçonnement :</p> $B_{r,Rd} = 2 \cdot n_r \cdot \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_r \cdot f_{ur}}{\gamma_{M2}}$ <p>d_m = moyenne entre surangle et surplat de la tête de boulon ou de l'écrou, en prenant la plus petite</p> <p>Résistance à la flexion due aux écrous :</p> $F_{t,pl,Rd} = 2 \cdot n_r \cdot \frac{\pi \cdot t_r \cdot f_{yR}}{2 \cdot \gamma_{M0}}$ <p>Ce mode de ruine n'est pas à considérer si :</p> $d_{b,p} \leq d_e \text{ ou } d_{b,p} > d_e \text{ et } t_r > \frac{d_{b,p} + d_e}{2}$ <p>Au vu des dimensions standards imposées par Solvay, cette résistance n'est généralement pas à prendre en compte.</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Article du CTICM</p>
3. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{T,w,Rd}$		
$N_{T,w,Rd} = N_{T,wf,Rd}$		
Soudures entre la platine d'extrémité et la colonne (et les raidisseurs)	<p>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</p> $N_{T,wf,Rd} = N_{T,wc,Rd} + N_{T,wfc,Rd}$ <p>$N_{T,wc,Rd}$ = Résistance des soudures entre l'âme du poteau et la platine</p> <p>$N_{T,wfc,Rd}$ = Résistance des soudures entre les semelles du poteau et la platine</p> <p>La formule générale d'évaluation de la résistance des soudures est :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
Soudures entre les rondelles et la platine d'extrémité	<p>Solution de base et variantes 2, 3 et 4 :</p> $N_{T,wr,Rd} \leq \frac{N_{T,w,Rd}}{2 \cdot n_r}$ <p>$N_{T,wr,Rd}$ = Résistance des soudures entre une rondelle et la platine</p>	

Effort maximal transmissible en cisaillement

L'assemblage est composé de trois parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort de cisaillement maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces trois parties :

- Effort dans la direction de l'axe x : $V_{Ed,x}$ avec $V_{Rd,x} = \min(V_{fc,x,Rd}; V_{a,x,Rd}; V_{w,x,Rd})$;
- Effort dans la direction y : $V_{Ed,y}$ avec $V_{Rd,y} = \min(V_{fc,y,Rd}; V_{a,y,Rd}; V_{w,y,Rd})$.

Il ne devrait jamais être relatif à la résistance des soudures, celles-ci présentant un mode de ruine fragile.

L'évaluation de l'effort maximal transmissible est définie en tenant compte d'une éventuelle interaction N-V.

1. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par la colonne

$V_{fc,x,Rd}$, $V_{fc,y,Rd}$ ou $V_{fc,Rd}$

Âme de la colonne	<p style="text-align: center;">Résistance en section :</p> <p style="text-align: center;"><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</i></p> <p style="text-align: center;">Sans interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,x,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_{vc,y} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,x,Rd} = V_{el,Rd} = \frac{I_y \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$</p> $S_y = b_{fc} \cdot t_{fc} \cdot \left(\frac{h_{fc} - t_{fc}}{2} \right) + t_{wc} \cdot \frac{\left(\frac{h_{fc}}{2} - t_{fc} \right)^2}{2}$ <p style="text-align: center;">Avec interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,x,Rd} = \frac{V_{pl,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,x,Rd} = \frac{V_{el,Rd}}{2}$</p>	Eurocode 3 partie 1-1
Semelles de la colonne	<p style="text-align: center;">Résistance en section :</p> <p style="text-align: center;"><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</i></p> <p style="text-align: center;">Sans interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,y,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_{vc,x} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,y,Rd} = V_{el,Rd} = \frac{2 \cdot I_x \cdot t_{fc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$</p> $S_x = t_{fc} \cdot \frac{(b_{fc} - t_{wc})^2}{4} + h_{fc} \cdot \frac{t_{wc}^2}{8}$ <p style="text-align: center;">Avec interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,y,Rd} = \frac{V_{pl,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,y,Rd} = \frac{V_{el,Rd}}{2}$</p>	Eurocode 3 partie 1-1

2. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par l'assemblage boulonné

$$V_{a,x,Rd}, V_{a,y,Rd} \text{ ou } V_{a,Rd}$$

Les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Si l'effort axial est nul ou de traction :
 - Pour la solution de base et les variantes 3 et 4 : colonne, platine d'extrémité, rondelles, tiges, béton ;
 - Variante 1 : colonne, platine d'extrémité, tiges, béton ;
 - Variante 2 : colonne, platine d'extrémité, bêche, béton ;
- Effort axial de compression : Si les effets de frottement ne permettent pas de reprendre l'entièreté de l'effort de cisaillement, avec la solution de base et les variantes 3 et 4, il faudra utiliser une bêche pour reprendre le reliquat d'effort et pour la variante 1, les tiges le reprendront.
 - Effets de frottement suffisants : la colonne, la platine, le béton ;
 - Effets de frottement insuffisants :
Pour la solution de base et les variantes 2, 3 et 4 : colonne, platine d'extrémité, bêche, béton ;
Variante 1 : colonne, platine d'extrémité, tiges, béton.

Si l'effort axial est un effort de compression, l'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné vaut :

- Effort selon x :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd}$;
 - Frottement + bêche (variante 2 ou solution de base et variantes 3 et 4, utilisées avec une bêche) : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} + V_{Rd,x,n}$;
 - Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} + n_b \cdot V_{b,Rd}$ avec n_b = nombre de tiges ;
- Effort selon y :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd}$;
 - Frottement + bêche ((variante 2 ou solution de base et variantes 3 et 4, utilisées avec une bêche)) : $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} + V_{Rd,y,n}$;
 - Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) : $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} + 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}$;
- Effort selon x et y :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$ et $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$;
 - Frottement + bêche (variante 2 ou solution de base et variantes 3 et 4, utilisées avec une bêche) :
$$V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) + V_{Rd,x,n}$$
 et $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) + V_{Rd,y,n}$;
 - Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) :
$$V_{a,Rd,x} = (V_{f,Rd} + 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}) \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$$
 et $V_{a,Rd,y} = (V_{f,Rd} + 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}) \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$;

Si l'effort axial est nul ou un effort de traction, l'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné vaut :

- Effort selon x :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,x} = V_{Rd,x,n}$;
 - Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1, 3 et 4) : $V_{a,Rd,x} = 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}$;
- Effort selon y :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,y} = V_{Rd,y,n}$;
 - Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1, 3 et 4) : $V_{a,Rd,y} = 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}$;

<p>- Effort selon x et y :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,x} = V_{Rd,x,n}$ et $V_{a,Rd,y} = V_{Rd,y,n}$; • Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1, 3 et 4) : $V_{a,Rd,x} = 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \text{ et } V_{a,Rd,y} = V_{b,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right).$ <p>Remarque : la détermination de l'effort maximal transmissible ne tient pas compte de la résistance à la pression diamétrale des rondelles ou de la platine d'extrémité. Les dimensions données aux éléments sont suffisantes afin que ce mode de ruine ne soit jamais critique.</p>		
a. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par frottement $V_{f,Rd}$		
Béton - Platine	Résistance par frottement : $V_{f,Rd} = C_{fd} \cdot N_{Ed} $ avec $C_{fd} = 0,2$	Eurocode 3 partie 1-8
b. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par la bêche $V_{n,Rd}$		
<p>Le critère suivant d'interaction doit être satisfait :</p> $\frac{V_{Ed,x,n}}{V_{Rd,x,n}} + \frac{V_{Ed,y,n}}{V_{Rd,y,n}} \leq 1 \text{ avec}$ <p>Si l'effort axial est nul ou de traction</p> $V_{Ed,x,n} = V_{Ed,x}$ $V_{Ed,y,n} = V_{Ed,y}$ <p>Si l'effort axial est de compression :</p> $V_{Ed,x,n} = \sin\left(\arctan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$ $V_{Ed,y,n} = \cos\left(\arctan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$ $V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,x}^2 + V_{Ed,y}^2}$ <p>L'effort maximal transmissible par la bêche est donné par :</p> $V_{Rd,x,n} = \min(V_{cn,x,Rd}; V_{wn,x,Rd})$ $V_{Rd,y,n} = \min(V_{cn,y,Rd}; V_{fn,y,Rd})$ <p>Remarque : le moment créé par la pression du béton est négligé.</p> <p>Le livre du CTICM recommande des dimensions minimales pour la bêche :</p> $60mm \leq L_{eff,n} \leq 1,5 \cdot h_n$ $L_{eff,n} = L_n - e_m$ $h_{n,max} = 0,4 \cdot h_{fc}$ $b_{n,max} = 20 \cdot t_{fn}$		
Âme de la bêche	<p>Résistance au cisaillement :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{A_{vn,y} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{I_{yn} \cdot t_{wn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$</p> $S_y = b_n \cdot t_{fn} \cdot \left(\frac{h_n - t_{fn}}{2}\right) + t_{wn} \cdot \frac{\left(\frac{h_n}{2} - t_{fn}\right)^2}{2}$	Livre du CTICM
Semelles de la bêche	<p>Résistance au cisaillement :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{A_{vn,x} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{2 \cdot I_{xn} \cdot t_{fn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$</p> $S_x = t_{fn} \cdot \frac{(b_n - t_{wn})^2}{4} + h_n \cdot \frac{t_{wn}^2}{8}$	Livre du CTICM
Béton	<p>Résistance à la pression localisée due aux semelles de la bêche :</p> $V_{cn,x,Rd} = f_{cd} \cdot b_n \cdot L_{eff,n}$	

	$V_{cn,y,Rd} = \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot (h_n - 2 \cdot t_{fc}) \cdot L_{eff,n}$	Livre du CTICM
c. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par les tiges $V_{b,Rd}$		
$V_{b,Rd} = \min (V_{b,v,Rd}; V_{b,l,Rd})$		
Tiges	<p>Résistance au cisaillement :</p> $V_{b,v,Rd} = \min (V_{b1,v,Rd}; V_{b,v2,Rd})$ $V_{b1,v,Rd} = 2 \cdot n_r \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_v = 0,6$ $V_{b,v2,Rd} = 2 \cdot n_r \cdot \frac{\alpha_b \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_b = 0,44 - 0,0003 \cdot f_{yb}$ <p>Interaction N-V avec N en traction :</p> $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot 2 \cdot n_r \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$ <p>Si l'effort axial est un effort de compression, il n'y a pas d'interaction.</p>	Eurocode 3 partie 1-8 Eurocode 3 partie 1-8
Rondelles	<p>Solution de base et variantes 2, 3 et 4 :</p> <p>Résistance à la pression diamétrale :</p> $V_{r,Rd} = 4 \cdot \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{ur} \cdot d_b \cdot t_r}{\gamma_{M2}} \leq V$ $V = \begin{cases} V_{a,Rd,x} \\ V_{a,Rd,y} \\ \sqrt{V_{a,Rd,x}^2 + V_{a,Rd,y}^2} \end{cases}$ $k_1 = \min \left(2,5; 1,4 \cdot \frac{e_d}{d_{b,r}} - 1,7 \right)$ $\alpha_b = \min \left(\frac{f_{ub}}{f_{ur}}; 1 \right)$	Eurocode 3 partie 1-8
Platine	<p>Variante 1 :</p> <p>Les mêmes formules que pour les rondelles sont utilisées, en prenant les caractéristiques de la platine pour s'assurer que $V_{p,Rd} \leq V$.</p>	

3. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par les soudures $V_{w,x,Rd}$ et/ou $V_{w,y,Rd}$		
Frottement seul ou frottement + cisaillement des tiges : $V_{w,x,Rd} = V_{w,wc,Rd}$ $V_{w,y,Rd} = V_{w,fc,Rd}$ Frottement + bêche : $V_{w,x,Rd} = \min (V_{w,wc,Rd}; V_{w,wn,Rd})$ $V_{w,y,Rd} = \min (V_{w,fc,Rd}; V_{w,fn,Rd})$		
Soudures entre la platine d'extrémité et la colonne	<i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i> Cisaillement seul : $V_{w,wc,Rd}$ = la résistance des soudures entre l'âme de la colonne et la platine d'extrémité $V_{w,fc,Rd}$ = la résistance des soudures entre les semelles de la colonne et la platine d'extrémité La résistance des soudures est donnée par : $V_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)	Eurocode 3 partie 1-8 Eurocode 3 partie 1-8
	Interaction N-V : <i>Hypothèse : la contribution des soudures entre les raidisseurs et la platine est négligée.</i> Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures : Soudures entre la platine et l'âme du poteau : $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{wc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{A_{fc} - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{wc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,x}}{l_{wc}}$ Soudures entre la platine et les semelles du poteau : $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{fc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{fc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,y}}{l_{fc}}$	
Soudures entre la platine d'extrémité et la bêche	$V_{w,wn,Rd}$ = la résistance des soudures entre l'âme de la bêche et la platine d'extrémité $V_{w,fn,Rd}$ = la résistance des soudures entre les semelles de la bêche et la platine d'extrémité	

<p>Soudures entre la platine d'extrémité et les rondelles</p>	<p>Cisaillement seul :</p> $V_{w,r,Rd} \leq \frac{V}{2 \cdot n_r}$ $V = \begin{cases} V_{w,x,Rd} \\ V_{w,y,Rd} \\ \sqrt{V_{w,x,Rd}^2 + V_{w,y,Rd}^2} \end{cases}$ <p>$V_{w,r,Rd}$, la résistance des soudures entre les rondelles et la platine d'extrémité</p> <p>Interaction N-V avec N en traction : Solution de base et variantes 2, 3 et 4 : Soudures entre les rondelles et la platine (N_{Ed} est un effort de traction) :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_r \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{N_{Ed}}{2 \cdot n_r} \cdot \frac{1}{l_r}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot n_r \cdot l_r}$	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
---	---	-----------------------------------

Annexe 2 : Feuille de calcul – Solution articulée 2

Feuille de calcul : *Assemblage articulé avec grain*

Note d'utilisation :

Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage présentées ci-après. Elle fournit les efforts maximaux auxquels l'assemblage peut être soumis en fonction des caractéristiques de l'assemblage imposées.

Pour cela, dans un premier temps, l'utilisateur doit choisir la configuration qu'il étudie.

Dans un second temps, toutes les données nécessaires au dimensionnement sont définies.

Enfin, les efforts maximaux transmissibles (efforts de compression, de traction et de cisaillement) sont déterminés à l'aide de règles provenant de documents de référence sur les pieds de poteaux.

Ce dimensionnement repose sur la méthode des composantes.

Configurations prises en compte

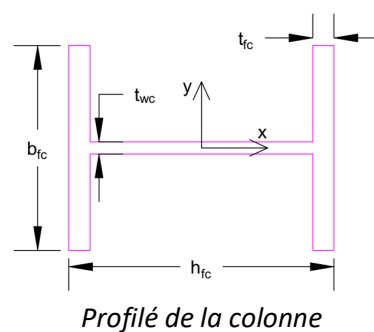
Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage de pieds de poteaux (en I ou H) articulés avec platine d'extrémité seule.

Quatre variantes possibles sont prises en compte :

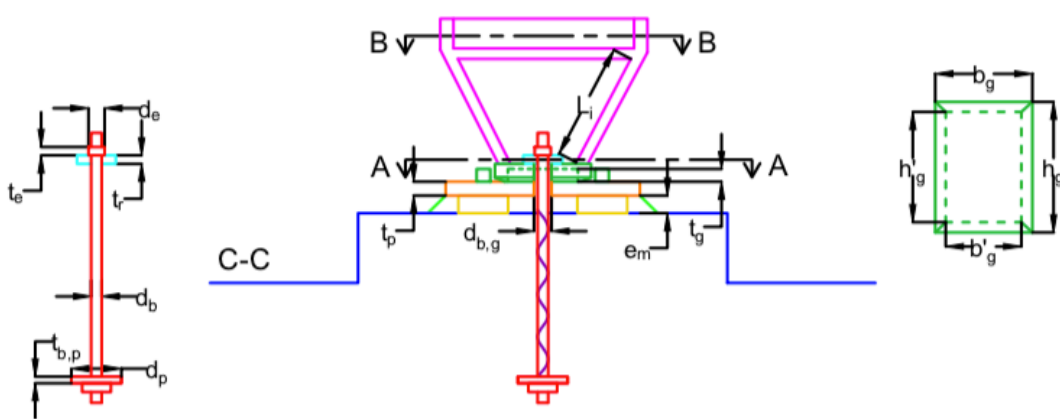
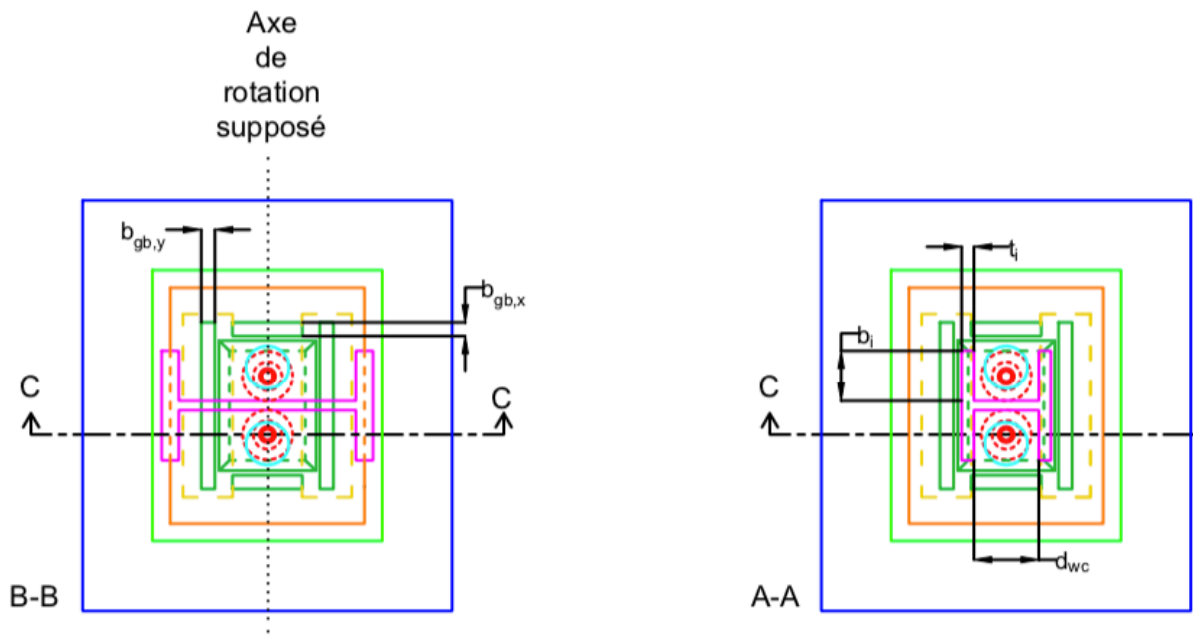
- Tiges droites avec ou sans plat d'ancrage ;
- Deux ou quatre tiges ;
- Une bêche en I parallèle au profilé de la colonne.

Celles-ci sont présentées sur les figures des pages suivantes.

Remarque : la feuille de calcul est réalisée en considérant les variantes individuellement. Néanmoins, en utilisant les règles définies de façon adéquate, celles-ci peuvent être combinées.

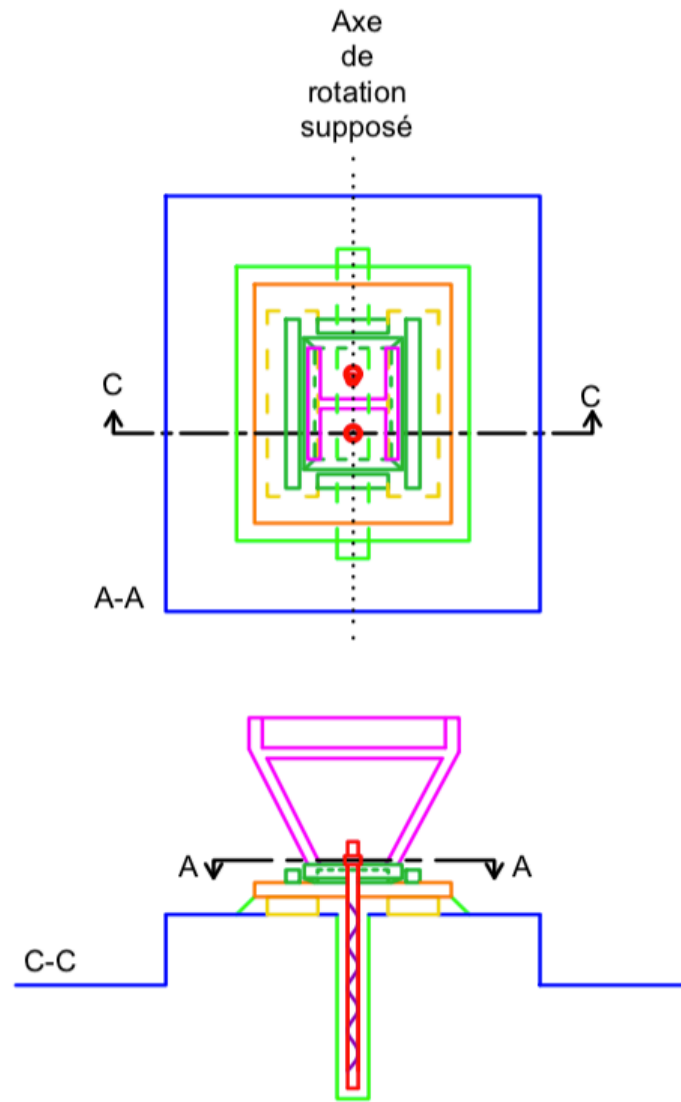


Solution de base



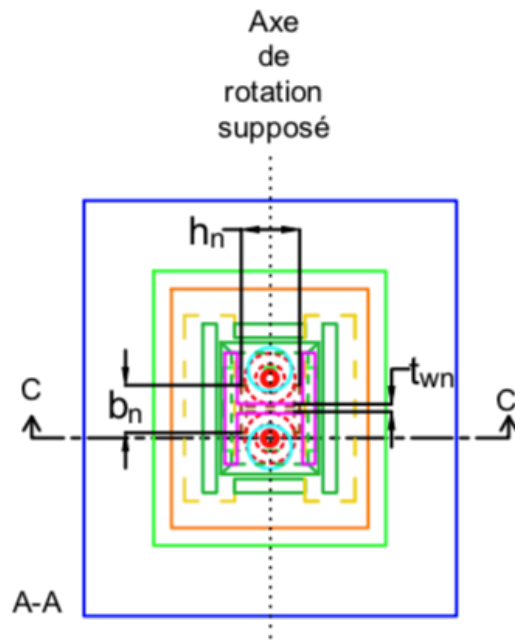
Légende - Poteau, tiges, rondelles, plaque d'assise, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, grain et boîte à grain

Variante 1 : Tiges droites non-précellées

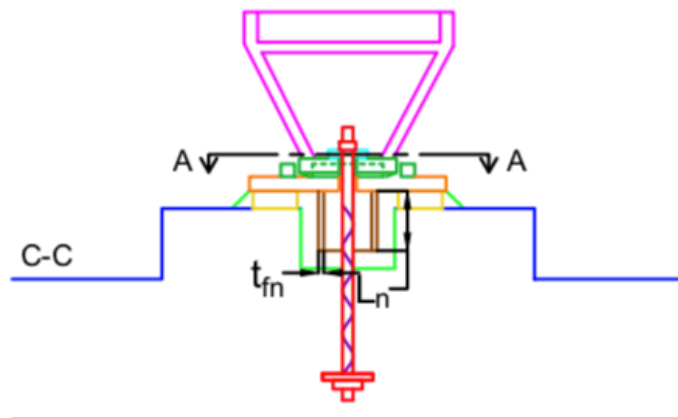


Légende - Poteau, tiges, rondelles, plaque d'assise, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, grain et boîte à grain

Variante 2 : Bêche



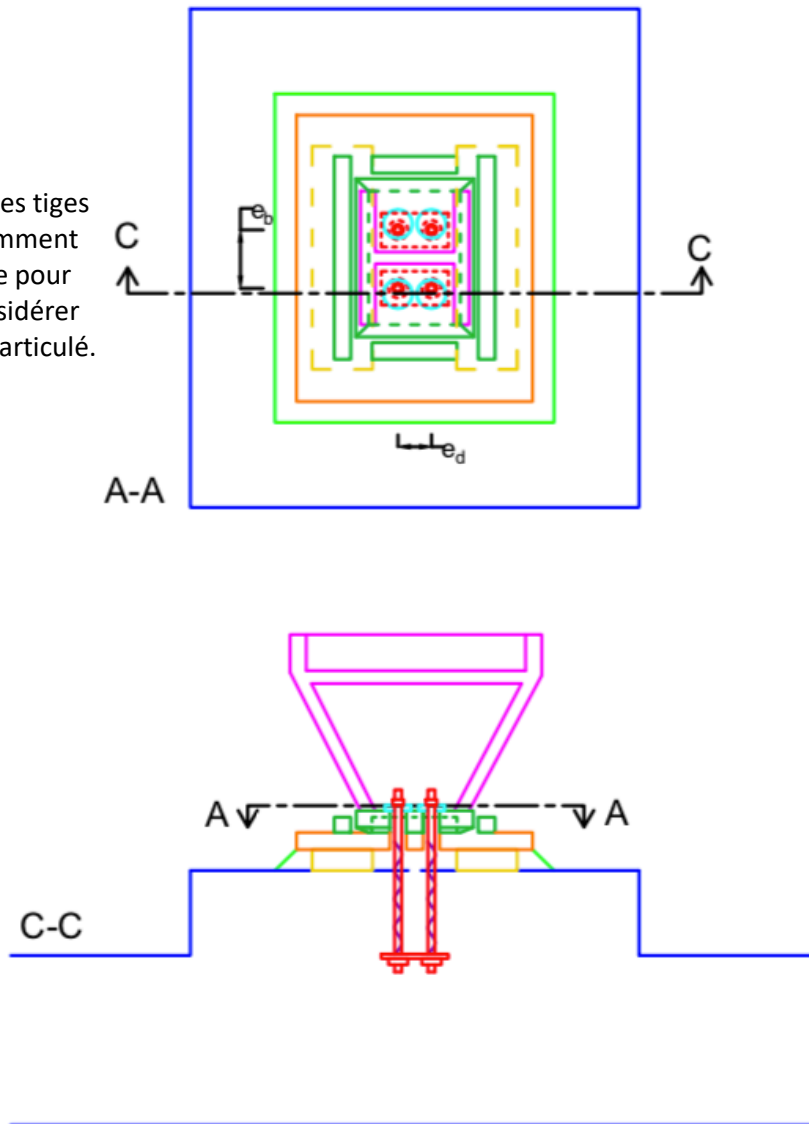
Hypothèse : L'axe fort de la bêche est parallèle à celui de la colonne, l'effort tranchant le plus important étant V_x



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, bêche

Variante 3 : 4 tiges

Hypothèse : les tiges sont suffisamment proches que pour pouvoir considérer l'assemblage articulé.

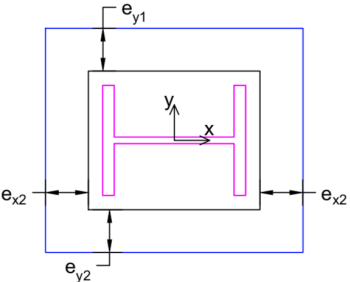


Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, coles de réglage, bande Denzo

Définition des données	
Efforts appliqués	
N_{Ed}	Effort normal de traction ou de compression
$V_{x,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe x
$V_{y,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe y

Coefficients partiels de sécurité		
γ_{M0}	Coefficient partiel pour la résistance des sections en acier, pris égal à 1	EN 1993-1-1
γ_C	Coefficient partiel pour le béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{M2}	Coefficient partiel pour les assemblages par soudure, pris égal à 1,25 Coefficient partiel pour les boulons, pris égal à 1,25	EN 1993-1-8
γ_{MC}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par cône de béton, du bord du béton, par éclatement du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{Msp}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par fendage du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4

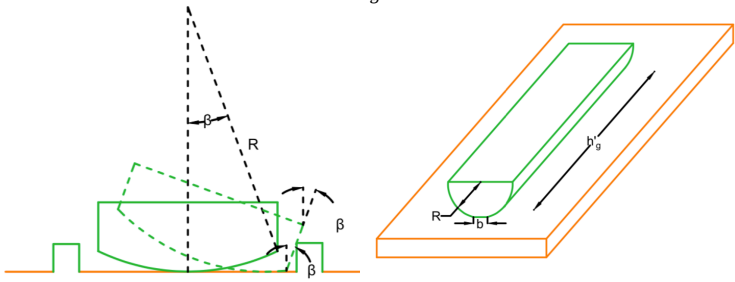
Caractéristiques des composantes		
Colonne		
f_{yc}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay: S235, S275 ou S355
E	Module de Young	
/	Profilé	Choix imposés par Solvay : IPE, HEA, HEB ou reconstitué
b_{fc}	Largeur du profilé	Solvay impose une valeur maximale de 400mm
h_{fc}	Hauteur du profilé	Solvay impose une valeur comprise entre 600 et 1000mm
t_{fc}	Épaisseur des semelles	Solvay impose une valeur maximale de 40mm
t_{wc}	Épaisseur de l'âme	Solvay impose une valeur maximale de 25mm
r	Congé de raccordement	
A_{fc}	Aire de la section	
I_y	Inertie selon l'axe y-y	
I_x	Inertie selon l'axe x-x	
$A_{vc,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vc,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
a_{wc}	Gorge des soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain	De façon sécuritaire, vu les nuances d'acier imposées, Solvay considère que si la gorge des soudures a est supérieure à la moitié de l'épaisseur d'un des deux éléments à assembler, la soudure est une soudure à pleine pénétration. Cette remarque est valable pour toutes les soudures réalisées.
l_{wc}	Longueur des soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et la platine	
d_{wc}	Longueur de l'âme réduite (portion d'âme) entre les raidisseurs	

Plaque			
f_{yp}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355	
b_p	Largeur		
h_p	Hauteur		
t_p	Épaisseur	Solvay impose une valeur maximale de 40mm	
$d_{b,p}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose des valeurs en fonction du diamètre du boulon : M12: 54mm, M16: 58mm, M20: 62mm, M22: 64mm, M24: 66mm, M27: 69mm, M30: 73mm	
Béton			
Hypothèse : Les caractéristiques mécaniques du mortier de scellement sont identiques à celles du béton de la fondation.			
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton	Choix imposés par Solvay : C25/30 ou C30/37	
e_m	Épaisseur du mortier de scellement	Solvay impose une valeur comprise entre 30 et 50mm. Ces valeurs tiennent compte d'une tolérance d'exécution de 20mm. Dans les calculs, on tiendra souvent compte de l'épaisseur minimale, soit 30mm.	
t_f	Épaisseur de la rehausse	Solvay impose une valeur minimale de 200mm	
t_c	Épaisseur de la fondation (rehausse comprise)		
e_{x1}	Dimensions en plan de la rehausse 		
e_{x2}			
e_{y1}			
e_{y2}			
Légende – Colonne, platine, rehausse			
β_j			Coefficient du matériau de scellement, pris égal à 2/3
Tiges : boulons et écrous			
f_{yb}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : 5.6 avec $f_{yb} = 300MPa$ ou 8.8 avec $f_{yb} = 640MPa$	
/	Type de tiges	Droites ou avec plat	
n_b	Nombre de tiges par rangée		
n_r	Nombre de rangées	1 ou 2	
e_b	Distance entre 2 tiges d'une même rangée		
e_d	Distance entre 2 rangées de tiges	Variante 3	
d_b	Diamètre d'un boulon	Choix imposés par Solvay : M12, M16, M20, M22, M24, M27, M30	
d_p	Diamètre du plat d'ancrage		
$t_{b,p}$	Épaisseur du plat d'ancrage		
A_s	Aire résistante du boulon		
t_e	Épaisseur de l'écrou		
d_e	Diamètre extérieur de l'écrou		

Rondelles		
f_{yr}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235 ou S355
t_r	Épaisseur d'une rondelle	Solvay impose des épaisseurs standards pour les rondelles en fonction du diamètre du boulon et de la nuance d'acier de la rondelle.
a_r	Gorge des soudures entre une rondelle et la platine	
l_r	Longueur des soudures entre une rondelle et la platine	
$d_{b,r}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose un diamètre égal à celui du boulon augmenté de 2mm pour les boulons M12 à M27 et de 3mm pour les boulons M30.
Raidisseurs		
L_i	Longueur d'un raidisseur	
b_i	Longueur en plan d'un raidisseur	
t_i	Épaisseur d'un raidisseur	Lorsque les raidisseurs sont soumis à un effort de compression, ils ne voilent pas si : $t_i \geq \frac{L_i}{25}$ (Livre d'Yvon Lescouarc'h sur les pieds de poteaux articulés)
f_{yi}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
a_i	Gorge des soudures entre un raidisseur et la platine	
l_i	Longueur des soudures entre un raidisseur et la platine	
Bêche (Profilé en I ou H)		
f_{yn}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
h_n	Hauteur du profilé	
b_n	Largeur du profilé	
L_n	Profondeur totale de la bêche	
t_{fn}	Épaisseur des semelles	
t_{wn}	Épaisseur de l'âme	
$A_{vn,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vn,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
$I_{y,n}$	Inertie selon l'axe y-y	
$I_{x,n}$	Inertie selon l'axe x-x	
a_{fn}	Gorge des soudures entre les semelles et la platine	
a_{wn}	Gorge des soudures entre l'âme et la platine	
l_{fn}	Longueur des soudures entre une semelle et la platine	
l_{wn}	Longueur des soudures entre l'âme et la platine	

Grain et boîte à grain		
f_{yg}	Nuance de l'acier du grain	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
E	Module de Young de l'acier du grain	
b_g	Largeur de la face supérieure du grain	
h_g	Hauteur de la face supérieure du grain	
b'_g	Largeur de la face inférieure du grain	
h'_g	Hauteur de la face inférieure du grain	
t_g	Épaisseur du grain	
$b_{bg,x}$	Largeur de l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe x-x	
$b_{bg,y}$	Largeur de l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe y-y	
$a_{bg,x}$	Gorge des soudures entre l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe x-x et plaque	
$a_{bg,y}$	Gorge des soudures entre l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe y-y et la plaque	
$l_{bg,x}$	Longueur des soudures entre l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe x-x et la plaque	
$l_{bg,y}$	Longueur des soudures entre l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe x-x et la plaque	

Effort maximal transmissible en compression		
Les composantes actives sont : Colonne, raidisseurs d'âme, soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, plaque d'assise, béton.		
L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties : $N_{C,Rd} = \min (N_{C,fc,Rd}; N_{C,a,Rd}; N_{C,w,Rd})$ Il ne devrait jamais être relatif à $N_{C,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.		
3. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{C,fc,Rd}$		
$N_{C,fc,Rd} = \min (N_{C,fcw,Rd}; N_{C,Rd}; N_{C,fi,Rd})$		<p>Résistance de calcul à la compression de la semelle et de l'âme de la colonne combinées :</p> <p><i>Remarque : on considère la section de la colonne juste au-dessus des raidisseurs.</i></p> $N_{C,fcw,Rd} = \frac{M_{C,Rd}}{h_{fc} - t_{fc}}$ <p>$M_{C,Rd}$ = moment résistant de calcul de la section transversale</p> <p>Résistance en section juste au-dessus des raidisseurs :</p> $N_{C,Rd} = \begin{cases} \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 1, 2 ou 3} \\ \frac{A_{eff} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 4} \end{cases}$ <p>A_{eff} = Aire de la section efficace</p> <p>Résistance en section au niveau du grain :</p> $N_{C,fi,Rd} = \frac{4 \cdot t_i \cdot b_i \cdot \sin \alpha \cdot f_{yi} + d_{wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$
		<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-1</p> <p>Eurocode 3 partie 1-1</p>
4. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{C,a,Rd}$		
Lors de la transmission d'un effort de compression, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont : grain, plaque d'assise, béton. Ces composantes forment ensemble des tronçons en T-équivalents.		
$N_{C,a,Rd} = \min (N_{C,T,Rd}; N_{C,g,Rd}; N_{C,p,Rd})$		
<p>Tronçons en T : Colonne + Platine + Béton (+ Raidisseurs)</p>	$N_{C,T,Rd} = \min (F_{C,f_{jd},Rd}; F_{C,g,Rd})$ <p>Résistance à la pression localisée sous une semelle : Résistance à la pression localisée du béton :</p> $f_{jd} = \beta_j \cdot \alpha_{bf} \cdot f_{cd}$ $\alpha_{bf} = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$ <p>Aire maximale de diffusion : $A_{c1} = \min \left\{ \begin{matrix} 9 \cdot A_{c0} \\ h_f \cdot b_f \end{matrix} \right.$ Hauteur de la rehausse (dimension en plan) : $h_f = h_p + e_{x1} + e_{x2}$ Largeur de la rehausse : $b_f = b_p + e_{y1} + e_{y2}$ Aire chargée : $A_{c0} = b_p \cdot h_p$ $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ $F_{C,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$ </p>	
		<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 2 partie 1-1</p>

<p>Tronçons en T : Grain + Plaque + Béton</p>	<p>Remarque : au fil des rotations, la face inférieure du grain subit un matage. Elle devient cylindrique. Les caractéristiques de cette nouvelle surface sont données sur les figures ci-dessous. L'effort de compression est alors transmis par la nouvelle surface de contact entre le grain et la plaque d'assise, définie par h'_g et b.</p>  $b = 2,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot N_{Ed} \cdot R}{E \cdot h'_g}}$ $R = \frac{h'_g}{2 \cdot \sin \beta}$ $l_{eff} = \begin{cases} h_p & \text{si } c > \frac{h_p - h'_g}{2} \\ h'_g + 2 \cdot c & \end{cases}$ <p>Largeur additionnelle : $c = t_p \cdot \sqrt{\frac{f_{yp}}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}}$</p> $b_{eff} = \begin{cases} b_p & \text{si } c > \frac{b_p - b}{2} \\ b + 2 \cdot c & \end{cases}$ <p>Résistance en compression du grain :</p> $F_{C,g,Rd} = \frac{h'_g \cdot b \cdot f_{yg}}{\gamma_{M0}}$	<p>Livre d'Yvon Lescouarc'h sur les pieds de poteaux articulés</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-1</p>
<p>Grain</p>	<p>Résistance en section :</p> $N_{C,g,Rd} = \frac{h_g \cdot b_g \cdot f_{yg}}{\gamma_{M0}}$	<p>Eurocode 3 partie 1-1</p>
<p>Grain + Plaque d'assise</p>	<p>Pression au contact du grain (pression de Hertz) :</p> $N_{C,p,Rd} = \frac{25,85 \cdot h'_g \cdot b'_g \cdot f_{yg}}{E \cdot \sin \beta \cdot \gamma_{M0}}$	<p>Livre d'Yvon Lescouarc'h sur les pieds de poteaux articulés</p>
<p>5. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{C,w,Rd}$</p>		
<p>Soudures entre la colonne et la platine</p>	$N_{C,w,Rd} = N_{C,wc,Rd} + 4 \cdot N_{C,wi,Rd}$ <p>$N_{C,wc,Rd}$ = Résistance des soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain</p> <p>$N_{C,wi,Rd}$ = Résistance des soudures entre les raidisseurs et le grain</p> <p>La formule générale d'évaluation de la résistance des soudures est :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>

Effort maximal transmissible en traction

Les composantes actives sont :

- Solution de base et variantes 2 et 3 : Colonne, raidisseurs d'âme, soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, soudures entre les rondelles et le grain, rondelles, tiges, béton ;
- Variante 1 : Colonne, raidisseurs d'âme, soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, tiges, béton.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties :

$$N_{C,Rd} = \min (N_{T,fc,Rd}; N_{T,a,Rd}; N_{T,w,Rd})$$

Il ne devrait jamais être relatif à $N_{T,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

4. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{T,fc,Rd}$

$$N_{T,fc,Rd} = \min (N_{t,Rd}; N_{t,fi,Rd})$$

Colonne (âme + semelles)	<p>Résistance en section de la colonne :</p> <p><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs.</i></p> $N_{t,Rd} = \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$	Eurocode 3 partie 1-1
Portion d'âme entre les raidisseurs + raidisseurs	<p>Résistance en section au niveau du grain :</p> $N_{C,fi,Rd} = \frac{4 \cdot t_i \cdot b_i \cdot \sin \alpha \cdot f_{yi} + d_{wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$	Eurocode 3 partie 1-1

5. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{T,a,Rd}$

Pour la transmission de l'effort de traction, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Pour la solution de base et variantes 2 et 3 : le grain, les rondelles, les tiges, le béton ;
- Pour la variante 1 : le grain, les tiges, le béton.

L'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné correspond à : $N_{T,a,Rd} = n_r \cdot F_{T,Rd}$

$F_{T,Rd}$ = Résistance d'un tronçon en T tendu :

- Effet de levier : $F_{T,Rd} = \min (F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$;
- Sans effet de levier : $F_{T,Rd} = \min (F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$.

Remarque 1 :

Les modes de ruine 2 et 3 sont relatifs à la rupture en section des tiges. L'effort maximal transmissible de l'assemblage boulonné ne devrait donc pas être relatif à ceux-ci.

Remarque 2 :

L'effort maximal ne dépend ni des modes de ruines possibles des rondelles, ni de ceux du béton.

Les dimensions des rondelles seront toujours choisies telles que les rondelles ne provoquent jamais la ruine de l'assemblage.

Les modes de ruine du béton sont des modes de ruine fragile à éviter à tout prix. Ainsi, les dispositions constructives sont toujours choisies telles que ces modes de ruine ne se produisent jamais.

Remarque 3 :

Les modes de rupture liés aux armatures (rupture de l'acier de l'armature et résistance à la rupture d'ancrage de l'armature) ne sont pas pris en compte dans cette feuille de calcul. Les règles de calcul qui y sont relatives se trouvent dans l'Eurocode 2 partie 4.

L'effet levier est à prendre en compte si $L_b \leq L_b^*$ (Eurocode 3 partie 1-8)

Avec $L_b = 8 \cdot d_b + e_m + t_p + t_g + t_r + \frac{t_e}{2}$ et $L_b^* = \frac{8,8 \cdot m_y^3 \cdot A_s}{l_{eff,1} \cdot t_g^3}$

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc})$$

$$l_{eff,cp} = 2 \cdot \pi \cdot m_y$$

$$m_y = \frac{e_b - t_{wc}}{2} - 0,8\sqrt{2} \cdot a_{wc}$$

Solution de base et variantes 1 et 2 :

$$l_{eff,nc} = 4 \cdot m_y + 1,25 \cdot e$$

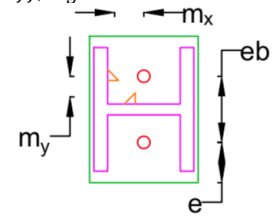
Variante 3 :

$$l_{eff,nc} = \min(\alpha \cdot m_y; \alpha \cdot m_y - (2 \cdot m_y + 0,625 \cdot e) + 0,5 \cdot e_d)$$

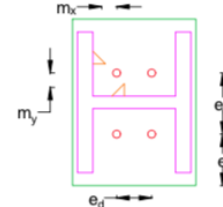
$$e = \frac{h_g - e_b}{2}$$

α est déterminé à l'aide de la figure 6.11 de l'EN 1993-1-8 avec :

$$\lambda_1 = \frac{m_y}{m_y + e} \text{ et } \lambda_2 = \frac{m_x}{m_y + e}$$

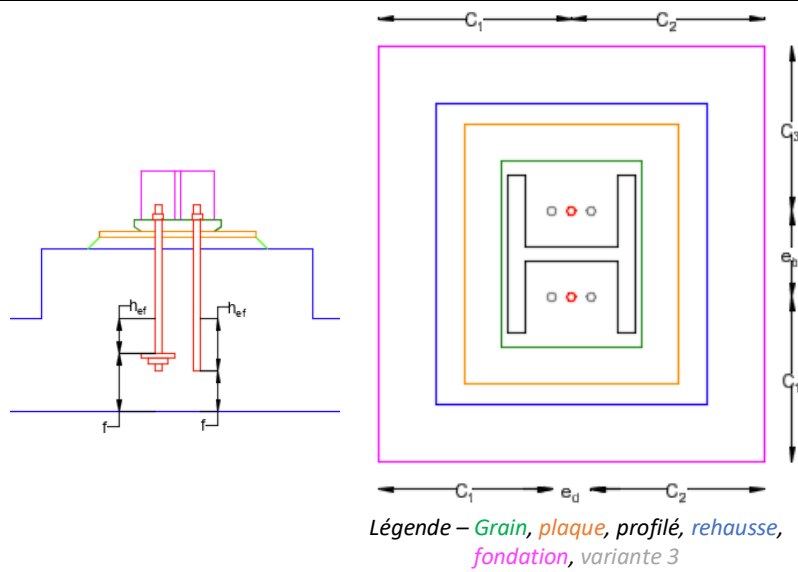


Solution de base et variantes 1 et 2



Variante 3

Grain	<p>Résistance associée au mode de ruine 1 :</p> $F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_y}$ $M_{pl,1,Rd} = l_{eff,1} \cdot m_{pl,Rd}$ $m_{pl,Rd} = \frac{t_g^2 \cdot f_{yp}}{4 \cdot \gamma_{M0}}$ <p>Résistance associée au mode de ruine 1-2 :</p> $F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_y}$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges - Platine	<p>Résistance associée au mode de ruine 2 :</p> $F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot n_b \cdot F_{t,Rd}}{m_y + n}$ $M_{pl,2,Rd} = l_{eff,2} \cdot m_{pl,Rd}$ $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$ $n = \min(e_{nc}; 1,25 \cdot m_y)$ $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $k_2 = 0,9$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges	<p>Résistance associée au mode de ruine 3 :</p> $F_{T,3,Rd} = n_b \cdot F_{t,Rd}$	Eurocode 3 partie 1-8
Colonne	<p>Résistance associée au mode de ruine 4 :</p> $F_{T,4,Rd} = \frac{b_{eff,t,wc} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$ $b_{eff,t,wc} = \min(l_{eff,1}; l_{eff,2})$	
Tiges – Béton	<p>Résistance à la rupture par cône de béton :</p> $N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \leq N_{T,a,Rd}$ $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N}$ $N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1,5}$	Eurocode 2 partie 4



$$k_1 = \begin{cases} 7,7 \text{ béton fissuré} \\ 11 \text{ béton non fissuré} \end{cases}$$

$A_{c,N}$ = surface projetée réelle

Hypothèse : La fondation en béton est rectangulaire ou carrée.

Pour la solution de base et les variantes 1, 2, 4 :

$$A_{c,N} = \left(2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_b}{2} \right) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_3) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_1) \right) \cdot \left(\min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_2) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_4) \right)$$

Variante 3 :

$$A_{c,N} = \left(2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_b}{2} \right) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_3) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_1) \right) \cdot \left(\min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_2) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_4) + 2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_d}{2} \right) \right)$$

$$s_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef}$$

$$A_{c,N}^0 = \text{surface projetée de référence} = n_b \cdot s_{cr,N}^2$$

$$\psi_{s,N} = \psi_s \cdot \psi_c$$

$$\psi_s = \psi_{s,y} \cdot \psi_{s,x}$$

$$\psi_{s,y} = \frac{1 + \frac{e_b}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

Pour la solution de base et les variantes 1, 2, 4 :

$$\psi_{s,x} = 1$$

Variante 3 :

$$\psi_{s,x} = \frac{1 + \frac{e_d}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

$$\psi_c = \psi_{c,y} \cdot \psi_{c,x}$$

$$\psi_{c,y} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_1; c_3)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$c_{cr,N} = 1,5 \cdot h_{ef}$$

$$\psi_{c,x} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_2; c_4)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$\psi_{re,N} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1$$

$$\psi_{ec,N} = \psi_{M,N} = 1$$

Livre du
CTICM

Résistance à la rupture par fendage du béton :

$$\text{Sinon } N_{Rd,sp} = \frac{N_{Rk,sp}}{\gamma_{Msp}} \leq N_{T,a,Rd}$$

L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si ces deux conditions sont satisfaites :

$$\begin{cases} c \geq c_{cr,sp} \\ t_c - t_f \geq h_{min} \end{cases}$$

$$c = \min(c_1; c_2; c_3; c_4)$$

$c_{cr,sp}$ = distance au bord caractéristique en cas de fendage sous charge, obtenue dans la spécification technique du produit

h_{min} = épaisseur minimale autorisée pour l'élément en béton, obtenue dans la spécification technique du produit

$$N_{Rk,sp} = N_{Rk,sp}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{h,sp}$$

$$N_{Rk,sp}^0 = \min(N_{Rk,p}; N_{Rk,c}^0)$$

$N_{Rk,p} = 0N$ car pas de résistance à l'adhérence vu l'utilisation de bande DENZO

$A_{c,N}, A_{c,N}^0, \psi_{s,N}, \psi_{re,N}, \psi_{ec,N} \rightarrow$ Idem que pour le calcul de la résistance à la rupture par cône de béton mais en utilisant $s_{cr,sp}$ et

$$\begin{aligned} s_{cr,sp} &= 2 \cdot c_{cr,sp} \\ \psi_{h,sp} &= \left(\frac{t_c - t_f}{h_{min}}\right)^{\frac{2}{3}} \leq \max\left(1; \left(\frac{h_{eff} + 1,5 \cdot c}{h_{min}}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \leq 2 \\ c &= \min(c_1; c_3) \end{aligned}$$

Résistance à la rupture par éclatement du béton :

$$N_{Rd,cb} = N_{Rd,i,cb} \leq \frac{N_{T,a,Rd}}{2 \cdot n_r} \text{ avec } i = \text{nombre de bords}$$

(généralement 4)

Cette résistance est évaluée pour chaque bord en considérant la tige la plus proche du bord étudié.

L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si $c_i > 0,5 \cdot h_{eff}$

$$N_{Rk,i,cb} = N_{Rk,i,cb}^0 \cdot \frac{A_{c,i,Nb}}{A_{c,i,Nb}^0} \cdot \psi_{s,i,Nb} \cdot \psi_{g,i,Nb} \cdot \psi_{ec,Nb}$$

$$N_{Rk,i,cb}^0 = k_5 \cdot c_i \cdot \sqrt{A_h} \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ avec } c_i \leq 0,5 \cdot h_{eff}$$

$$k_5 = \begin{cases} 8,5 & \text{si béton fissuré} \\ 12,2 & \text{si béton non fissuré} \end{cases}$$

$$A_h = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_b^2)$$

$A_{c,i,Nb}$ = surface projetée réelle

Solution de base et variantes 1, 2, 4 :

$$\text{Si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3, A_{c,i,Nb} = (\min(c_2; 2 \cdot c_i) + \min(c_4; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

$$\text{Si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4, A_{c,i,Nb} = (\min(c_1; 2 \cdot c_i) + \min(e_b; 4 \cdot c_i) + \min(c_3; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

Variante 3 :

$$\text{Si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3, A_{c,i,Nb} = (\min(c_2; 2 \cdot c_i) + \min(c_4; 2 \cdot c_i) + \min(e_d; 4 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

$$\text{Si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4, A_{c,i,Nb} = (\min(c_1; 2 \cdot c_i) + \min(e_b; 4 \cdot c_i) + \min(c_3; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$$

$$A_{c,i,Nb}^0 = (4 \cdot c_i)^2$$

	$\psi_{s,i,Nb} = 0,7 + 0,3 \cdot \frac{c_j}{2 \cdot c_i} \leq 1$ $c_j = \begin{cases} \min(c_2; c_4) & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ \min(c_1; c_3) & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$ $\psi_{g,i,Nb} = \sqrt{n} + (1 - \sqrt{n}) \cdot \frac{e_i}{4 \cdot c_i}$ <p>Solution de base et variantes 1, 2, 4 :</p> $e_i = \begin{cases} 0 & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ e_b & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$ <p>Variante 3 :</p> $e_i = \begin{cases} e_d & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ e_b & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$ $\psi_{ec,Nb} = 1$	
Rondelles	<p>Solution de base et variantes 1, 2, 4 :</p> $F_{T,r,Rd} = \min(B_{r,Rd}; F_{t,pl,Rd}) \leq N_{T,a,Rd}$ <p>Résistance au poinçonnement :</p> $B_{r,Rd} = n_r \cdot n_b \cdot \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_r \cdot f_{ur}}{\gamma_{M2}}$ <p>d_m = moyenne entre surangle et surplat de la tête de boulon ou de l'écrou, en prenant la plus petite</p> <p>Résistance à la flexion due aux écrous :</p> $F_{t,pl,Rd} = n_r \cdot n_b \cdot \frac{\pi \cdot t_r \cdot f_{yr}}{2 \cdot \gamma_{M0}}$ <p>Ce mode de ruine n'est pas à considérer si :</p> $d_{b,p} \leq d_e \text{ ou } d_{b,p} > d_e \text{ et } t_r > \frac{d_{b,p} + d_e}{2}$ <p>Au vu des dimensions standards imposées par Solvay, cette résistance n'est généralement pas à prendre en compte.</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Article du CTIC</p>
6. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{T,w,Rd}$		
$N_{T,w,Rd} = N_{T,wf,Rd}$		
Soudures entre la platine d'extrémité et la colonne (et les raidisseurs)	<p><i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i></p> $N_{T,wf,Rd} = N_{T,wc,Rd} + N_{T,wi,Rd}$ <p>$N_{T,wc,Rd}$ = Résistance des soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain</p> <p>$N_{T,wi,Rd}$ = Résistance des soudures entre les raidisseurs et le grain</p> <p>La formule générale d'évaluation de la résistance des soudures est :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
Soudures entre les rondelles et la platine d'extrémité	<p>Solution de base et variantes 2, 3 et 4 :</p> $N_{T,wr,Rd} \leq \frac{N_{T,w,Rd}}{2 \cdot n_r}$ <p>$N_{T,wr,Rd}$ = Résistance des soudures entre une rondelle et la platine</p>	

Effort maximal transmissible en cisaillement

Les composantes actives sont :

- En compression :
 - Le frottement suffit à la reprise des efforts : colonne, raidisseurs d'âme, soudures entre la portion d'âme comprise entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, plaque d'assise, béton ;
 - Le frottement n'est pas suffisant : les trous dans la plaque d'assise pour la solution de base et la variante 2 sont surdimensionnés, donc une bêche doit être utilisée pour reprendre le reliquat d'effort tranchant ;
Variante 2, solution de base avec bêche et variante 3 avec bêche : colonne, raidisseurs, soudures entre la portion d'âme comprise entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, boîte à grain, soudures entre la boîte à grain et la plaque d'assise, plaque d'assise, soudures entre la plaque d'assise et la bêche, bêche, béton ;
Variante 1 : colonne, raidisseurs, soudures entre la portion d'âme comprise entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, plaque d'assise, tiges, béton.
- Traction : l'effort tranchant est transmis par les tiges si le jeu entre les rondelles et les tiges est inférieur à celui entre le grain et la boîte à grain. Sinon, il sera repris par la boîte grain. Dans ce cas, pour la même raison que précédemment, une bêche doit être mise en œuvre avec la solution de base et la variante 3. Or, il est difficile à prédire quel jeu sera le plus petit. Ainsi, dans les calculs, on considère, la solution menant à l'effort maximal transmissible le plus faible.
 - Solution de base et variantes 2 et 3 :
Les tiges résistent : colonne, raidisseurs, soudures entre la portion d'âme comprise entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, soudures entre les rondelles et le grain, rondelles, tiges, béton ;
La boîte à grain et la bêche résistent : colonne, raidisseurs, soudures entre la portion d'âme comprise entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, boîte à grain, soudures entre la boîte à grain et la plaque d'assise, plaque d'assise, soudures entre la plaque d'assise et la bêche, bêche, béton ;
 - Variante 1 :
Les tiges résistent : colonne, raidisseurs, soudures entre la portion d'âme comprise entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, tiges, béton ;
La boîte à grain et les tiges résistent : colonne, raidisseurs, soudures entre la portion d'âme comprise entre les raidisseurs et le grain et entre les raidisseurs et le grain, grain, boîte à grain, soudures entre la boîte à grain et la plaque d'assise, plaque d'assise, tiges, béton.

L'assemblage est composé de trois parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort de cisaillement maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces trois parties :

- Effort dans la direction de l'axe x : $V_{Ed,x}$ avec $V_{Rd,x} = \min (V_{fc,x,Rd}; V_{a,x,Rd}; V_{w,x,Rd})$;
- Effort dans la direction y : $V_{Ed,y}$ avec $V_{Rd,y} = \min (V_{fc,y,Rd}; V_{a,y,Rd}; V_{w,y,Rd})$.

Il ne devrait jamais être relatif à la résistance des soudures, celles-ci présentant un mode de ruine fragile.

L'évaluation de l'effort maximal transmissible est définie en tenant compte d'une éventuelle interaction N-V.

4. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par la colonne

$$V_{fc,x,Rd}, V_{fc,y,Rd} \text{ ou } V_{fc,Rd}$$

Sans interaction M-N :

$$V_{fc,x,Rd} = \min (V_{hwc,x,Rd}; V_{dwc,x,Rd})$$

$$V_{fc,y,Rd} = \min (V_{f,y,Rd}; V_{r,y,Rd})$$

Avec interaction M-N :

$$V_{fc,x,Rd} = \frac{\min (V_{hwc,x,Rd}; V_{dwc,x,Rd})}{2}$$

$$V_{fc,y,Rd} = \frac{\min (V_{f,y,Rd}; V_{r,y,Rd})}{2}$$

Âme de la colonne	<p>Résistance en section :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{hwc,x,Rd} = \frac{A_{vc,y} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{hwc,x,Rd} = \frac{I_y \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$</p> $S_y = b_{fc} \cdot t_{fc} \cdot \left(\frac{h_{fc} - t_{fc}}{2} \right) + t_{wc} \cdot \frac{\left(\frac{h_{fc}}{2} - t_{fc} \right)^2}{2}$	Eurocode 3 partie 1-1
Portion d'âme entre les raidisseurs	<p>Résistance en section :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{dwc,x,Rd} = \frac{A_{vcr,y} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{dwc,x,Rd} = \frac{I_{yr} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_{yr}}$</p> <p><i>Hypothèse : les congés de raccordement sont négligés.</i></p> $A_r = d_{wc} \cdot t_{wc} + 2 \cdot t_i \cdot (2 \cdot b_i + t_{wc})$ $A_{vcr,y} = A_r - 2 \cdot (2 \cdot b_i + t_{wc}) \cdot t_i + t_{wc} \cdot t_i$ $I_{yr} = 2 \cdot (2 \cdot b_i + t_{wi}) \cdot t_i^3 + t_{wc} \cdot d_{wc}^3$ $S_{yr} = \frac{t_i}{2} \cdot (2 \cdot b_i + t_{wc}) \cdot (d_{wc} + t_i) + \frac{t_{wc}}{8} \cdot d_{wc}^2$	
Semelles de la colonne	<p>Résistance en section :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{f,y,Rd} = \frac{A_{vc,x} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{f,y,Rd} = \frac{2 \cdot I_x \cdot t_{fc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$</p> $S_x = t_{fc} \cdot \frac{(b_{fc} - t_{wc})^2}{4} + h_{fc} \cdot \frac{t_{wc}^2}{8}$	Eurocode 3 partie 1-1
Raidisseurs d'âme	<p>Résistance en section :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{dwc,y,Rd} = \frac{A_{vcr,x} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{dwc,y,Rd} = \frac{I_{xr} \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_{xr}}$</p> $A_{vcr,x} = A_r - d_{wc} \cdot t_{wc}$ $I_{xr} = 2 \cdot t_i \cdot (2 \cdot b_i + t_{wc})^3 + d_{wc} \cdot t_{wc}^3$ $S_{xr} = t_i \cdot b_i \cdot (t_i + b_i) + \frac{t_{wc}^2}{8} \cdot (d_{wc} + 2 \cdot t_i)$	

5. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par l'assemblage boulonné

$$V_{a,x,Rd}, V_{a,y,Rd} \text{ ou } V_{a,Rd}$$

Les composantes actives sont :

- En compression :
 - Le frottement suffit à la reprise des efforts (**cas 1**) : colonne, raidisseurs d'âme, grain, plaque d'assise, béton ;
 - Le frottement n'est pas suffisant :
 Variante 2, solution de base avec bêche et variante 3 avec bêche (**cas 2**) : colonne, raidisseurs, grain, boîte à grain, plaque d'assise, bêche, béton ;
 Variante 1 (**cas 3**) : colonne, raidisseurs, grain, plaque d'assise, tiges, béton ;
- Traction :
 - Solution de base et variantes 2 et 3 (**cas 4**) :
 Les tiges résistent : colonne, raidisseurs, grain, rondelles, tiges, béton ;
 La boîte à grain et la bêche résistent : colonne, raidisseurs, grain, boîte à grain, soudures entre la boîte à grain et la plaque d'assise, plaque d'assise, bêche, béton ;
 - Variante 1 (**cas 5**) :
 Les tiges résistent : colonne, raidisseurs, grain, tiges, béton ;
 La boîte à grain et les tiges résistent : colonne, raidisseurs, grain, boîte à grain, plaque d'assise, tiges, béton.

Si l'effort axial est un effort de compression, l'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné vaut :

- Cas 1 :
 - Effort selon x : $V_{a,Rd,x} = \min(V_{f,Rd}; V_{g,Rd})$;
 - Effort selon y : $V_{a,Rd,y} = \min(V_{f,Rd}; V_{g,Rd})$;
 - Effort selon x et y :

$$V_{a,Rd,x} = \min(V_{f,Rd}; V_{g,Rd}) \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \quad \text{et} \quad V_{a,Rd,y} = \min(V_{f,Rd}; V_{g,Rd}) \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) ;$$
- Cas 2 :
 - Effort selon x : $V_{a,Rd,x} = \min(V_{f,Rd} + \min(V_{bg,x,Rd}; V_{Rd,x,n}); V_{g,Rd})$;
 - Effort selon y : $V_{a,Rd,y} = \min(V_{f,Rd} + \min(V_{bg,y,Rd}; V_{Rd,y,n}); V_{g,Rd})$;
 - Effort selon x et y :

$$V_{a,Rd,x} = \min(a \cdot V_{f,Rd} + \min(V_{bg,x,Rd}; V_{Rd,y,n}); a \cdot V_{g,Rd}) \text{ avec } a = \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) ;$$

$$V_{a,Rd,y} = \min(b \cdot V_{f,Rd} + \min(V_{bg,y,Rd}; V_{Rd,y,n}); b \cdot V_{g,Rd}) \text{ avec } b = \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) ;$$
- Cas 3 :
 - Effort selon x : $V_{a,Rd,x} = \min(V_{f,Rd} + \min(V_{bg,x,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}); V_{g,Rd})$;
 - Effort selon y : $V_{a,Rd,y} = \min(V_{f,Rd} + \min(V_{bg,y,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}); V_{g,Rd})$;
 - Effort selon x et y :

$$V_{a,Rd,x} = \min(V_{f,Rd} \cdot a + \min(V_{bg,x,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd} \cdot a); V_{g,Rd} \cdot a) ;$$

$$V_{a,Rd,y} = \min(V_{f,Rd} \cdot b + \min(V_{bg,y,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd} \cdot b); V_{g,Rd} \cdot b) ;$$
- Cas 4 :
 - Effort selon x : $V_{a,Rd,x} = \min(V_{g,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}; \min(V_{bg,x,Rd}; V_{Rd,x,n}))$;
 - Effort selon y : $V_{a,Rd,y} = \min(V_{g,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}; \min(V_{bg,y,Rd}; V_{Rd,y,n}))$;
 - Effort selon x et y :

$$V_{a,Rd,x} = \min(V_{g,Rd} \cdot a; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd} \cdot a; \min(V_{bg,x,Rd}; V_{Rd,x,n})) ;$$

$$V_{a,Rd,y} = \min(V_{g,Rd} \cdot b; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd} \cdot b; \min(V_{bg,y,Rd}; V_{Rd,y,n})) ;$$
- Cas 5 :

	<ul style="list-style-type: none"> • Effort selon x : $V_{a,Rd,x} = \min (V_{g,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}; V_{bg,x,Rd})$; • Effort selon y : $V_{a,Rd,y} = \min (V_{g,Rd}; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd}; V_{bg,y,Rd})$; • Effort selon x et y : $V_{a,Rd,x} = \min (V_{g,Rd} \cdot a; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd} \cdot a; V_{bg,x,Rd})$; $V_{a,Rd,y} = \min (V_{g,Rd} \cdot b; 2 \cdot n_r \cdot V_{b,Rd} \cdot b; V_{bg,y,Rd})$. <p>Remarque : la détermination de l'effort maximal transmissible ne tient pas compte de la résistance à la pression diamétrale des rondelles ou de la platine d'extrémité. Les dimensions données aux éléments sont suffisantes afin que ce mode de ruine ne soit jamais critique.</p>	
Grain	$V_{g,Rd} = \min (V_{g,v,Rd}; V_{g,v-N,Rd})$ <p>Résistance en section :</p> $V_{g,v,Rd} = \frac{b_g \cdot h_g \cdot f_{y,g}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$ <p>Interaction V-N :</p> $V_{g,v-N,Rd} = \frac{\sqrt{\left(\frac{b_g \cdot h_g \cdot f_{y,g}}{\gamma_{M0}}\right)^2 - N_{Ed}^2}}{\sqrt{3}}$	
Boîte à grain	<p>Effort selon x :</p> $V_{bg,x,Rd} = \frac{0,16 \cdot b_{bg,x} \cdot f_{y,bg} \cdot h_g}{\gamma_{M0}}$ <p>Effort selon y :</p> $V_{bg,y,Rd} = \frac{0,16 \cdot b_{bg,y} \cdot f_{y,bg} \cdot h_g}{\gamma_{M0}}$	
Grain – Plaque – Béton	<p>Résistance par frottement :</p> $V_{f,Rd} = C \cdot N_{Ed} $ $C = \min (C_{fd}; \mu)$ $C_{fd} = 0,2$ <p>μ=coefficient de frottement entre 2 éléments en acier</p>	Eurocode 3 partie 1-8
Bêche	<p>Le critère suivant d'interaction doit être satisfait :</p> $\frac{V_{Ed,x,n}}{V_{Rd,x,n}} + \frac{V_{Ed,y,n}}{V_{Rd,y,n}} \leq 1 \text{ avec}$ <p>Si l'effort axial est nul ou de traction :</p> $V_{Ed,x,n} = V_{Ed,x}$ $V_{Ed,y,n} = V_{Ed,y}$ <p>Si l'effort axial est de compression :</p> $V_{Ed,x,n} = \sin \left(\arctan \left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}} \right) \right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$ $V_{Ed,y,n} = \cos \left(\arctan \left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}} \right) \right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$ $V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,x}^2 + V_{Ed,y}^2}$ <p>L'effort maximal transmissible par la bêche est donné par :</p> $V_{Rd,x,n} = \min (V_{cn,x,Rd}; V_{wn,x,Rd})$ $V_{Rd,y,n} = \min (V_{cn,y,Rd}; V_{fn,y,Rd})$ <p>Remarque : le moment créé par la pression du béton est négligé. Le livre du CTICM recommande des dimensions minimales pour la bêche :</p> $60mm \leq L_{eff,n} \leq 1,5 \cdot h_n$ $L_{eff,n} = L_n - e_m$	Livre du CTICM

	$h_{n,max} = 0,4 \cdot h_{fc}$ $b_{n,max} = 20 \cdot t_{fn}$ <p>Résistance au cisaillement de l'âme :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{A_{vn,y} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{I_{yn} \cdot t_{wn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$</p> $S_y = b_n \cdot t_{fn} \cdot \left(\frac{h_n - t_{fn}}{2}\right) + t_{wn} \cdot \frac{\left(\frac{h_n - t_{fn}}{2}\right)^2}{2}$ <p>Résistance au cisaillement des semelles :</p> <p>Section de classe 1 ou 2 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{A_{vn,x} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p>Section de classe 3 ou 4 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{2 \cdot I_{xn} \cdot t_{fn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$</p> $S_x = t_{fn} \cdot \frac{(b_n - t_{wn})^2}{4} + h_n \cdot \frac{t_{wn}^2}{8}$	<p>Eurocode 3 partie 1-1</p> <p>Eurocode 3 partie 1-1</p>
Béton	<p>Résistance à la pression localisée due aux semelles de la bêche :</p> $V_{cn,x,Rd} = f_{cd} \cdot b_n \cdot L_{eff,n}$ $V_{cn,y,Rd} = \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot (h_n - 2 \cdot t_{fc}) \cdot L_{eff,n}$	<p>Livre du CTICM</p>
Tiges	$V_{b,Rd} = \min(V_{b,v,Rd}; V_{b,l,Rd})$ <p>Résistance au cisaillement :</p> $V_{b,v,Rd} = \min(V_{b1,v,Rd}; V_{b,v2,Rd})$ $V_{b1,v,Rd} = 2 \cdot n_r \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_v = 0,6$ $V_{b,v2,Rd} = 2 \cdot n_r \cdot \frac{\alpha_b \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_b = 0,44 - 0,0003 \cdot f_{yb}$ <p>Interaction N-V avec N en traction :</p> $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot 2 \cdot n_r \cdot F_{t,Rd}}\right) \cdot V_{b,v,Rd}$ <p>Si l'effort axial est un effort de compression, il n'y a pas d'interaction.</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
Rondelles	<p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> <p>Résistance à la pression diamétrale :</p> $V_{r,Rd} = 4 \cdot \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{ur} \cdot d_b \cdot t_r}{\gamma_{M2}} \leq V$ $V = \begin{cases} V_{a,Rd,x} \\ V_{a,Rd,y} \\ \sqrt{V_{a,Rd,x}^2 + V_{a,Rd,y}^2} \end{cases}$ $k_1 = \min\left(2,5; 1,4 \cdot \frac{e_d}{d_{b,r}} - 1,7\right)$ $\alpha_b = \min\left(\frac{f_{ub}}{f_{ur}}; 1\right)$	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
Grain	<p>Variante 1 :</p> <p>Les mêmes formules que pour les rondelles sont utilisées, en prenant les caractéristiques de la platine pour s'assurer que $V_{g,Rd} \leq V$.</p>	

Plaque	Variante 1 : Les mêmes formules que pour les rondelles sont utilisées, en prenant les caractéristiques de la platine pour s'assurer que $V_{p,Rd} \leq V$.	
6. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par les soudures $V_{w,x,Rd}$ et/ou $V_{w,y,Rd}$		
L'effort maximal transmis par les soudures est donné par :		
<ul style="list-style-type: none"> - Cas 1 : $V_{w,x,Rd} = V_{w,wc,Rd}$ et $V_{w,x,Rd} = V_{w,i,Rd}$; - Cas 2 et 4 : $V_{w,x,Rd} = \min (V_{w,wc,Rd}; V_{w,bgy,Rd}; V_{w,wn,Rd})$ et $V_{w,x,Rd} = \min (V_{w,i,Rd}; V_{w,bgx,Rd}; V_{w,fn,Rd})$; - Cas 3 et 5 : $V_{w,x,Rd} = \min (V_{w,wc,Rd}; V_{w,bgy,Rd})$ et $V_{w,x,Rd} = \min (V_{w,i,Rd}; V_{w,bgx,Rd})$. 		
Soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain	<p>Cisaillement seul :</p> <p>$V_{w,wc,Rd}$ = résistance des soudures entre la portion d'âme entre les raidisseurs et le grain</p> <p>La résistance des soudures est donnée par :</p> $V_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p> <p>Interaction N-V :</p> <p>Si le critère suivant est vérifié, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{wc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{A_r - 2 \cdot b_i \cdot t_i}{A_r} \cdot \frac{1}{l_{wc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,x}}{l_{wc}}$	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
Soudures entre les raidisseurs et le grain	<p>Cisaillement seul :</p> <p>$V_{w,i,Rd}$ = résistance des soudures entre les raidisseurs et le grain</p> <p>Interaction N-V :</p> <p>Si le critère suivant est vérifié, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_i \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_i \cdot t_i}{A_r} \cdot \frac{1}{l_i}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,y}}{l_i}$	Eurocode 3 partie 1-8
Soudures entre la boîte à grain et la plaque	<p>$V_{w,bgx,Rd}$ = résistance des soudures entre l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe x-x et la plaque d'assise</p> <p>$V_{w,bgy,Rd}$ = résistance des soudures entre l'élément de la boîte à grain parallèle à l'axe y-y et la plaque d'assise</p>	

Soudures entre la plaque et la bêche	$V_{w,wn,Rd}$ = Résistance des soudures entre l'âme de la bêche et la plaque d'assise $V_{w,fn,Rd}$ = Résistance des soudures entre les semelles de la bêche et la plaque d'assise	
Soudures entre le grain d'extrémité et les rondelles	<p style="text-align: center;">Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> <p style="text-align: center;">Cisaillement seul :</p> $V_{w,r,Rd} \leq \frac{V}{2.n_r}$ $V = \begin{cases} V_{w,x,Rd} \\ V_{w,y,Rd} \\ \sqrt{V_{w,x,Rd}^2 + V_{w,y,Rd}^2} \end{cases}$ <p>$V_{w,r,Rd}$, la résistance des soudures entre les rondelles et le grain</p> <p style="text-align: center;">Interaction N-V avec N en traction :</p> <p style="text-align: center;">Si le critère suivant est vérifié, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3.(\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_r.f_u}{\gamma_{M2}.\beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{N_{Ed}}{2.n_r} \cdot \frac{1}{l_r}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed}}{2.n_r.l_r}$	Eurocode 3 partie 1-8

Annexe 3 : Feuille de calcul – Solution encastrée 1

Feuille de calcul : *Assemblage encastré avec 4 tiges d'ancrage*

Note d'utilisation :

Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage présentées ci-après. Elle fournit les efforts maximaux auxquels l'assemblage peut être soumis en fonction des caractéristiques de l'assemblage imposées.

Pour cela, dans un premier temps, l'utilisateur doit choisir la configuration qu'il étudie.

Dans un second temps, toutes les données nécessaires au dimensionnement sont définies.

Enfin, les efforts maximaux transmissibles (efforts de compression, de traction, de flexion et de cisaillement) sont déterminés à l'aide de règles provenant de documents de référence sur les pieds de poteaux. Ce dimensionnement repose sur la méthode des composantes.

Configurations prises en compte

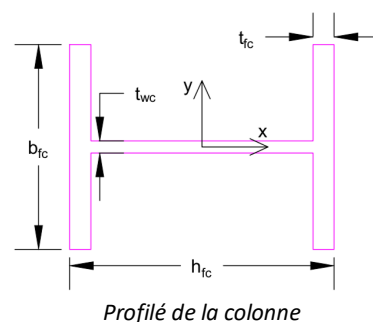
Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage de pieds de poteaux (en I ou H) encastrés avec quatre tiges d'ancrage.

Quatre variantes possibles sont prises en compte :

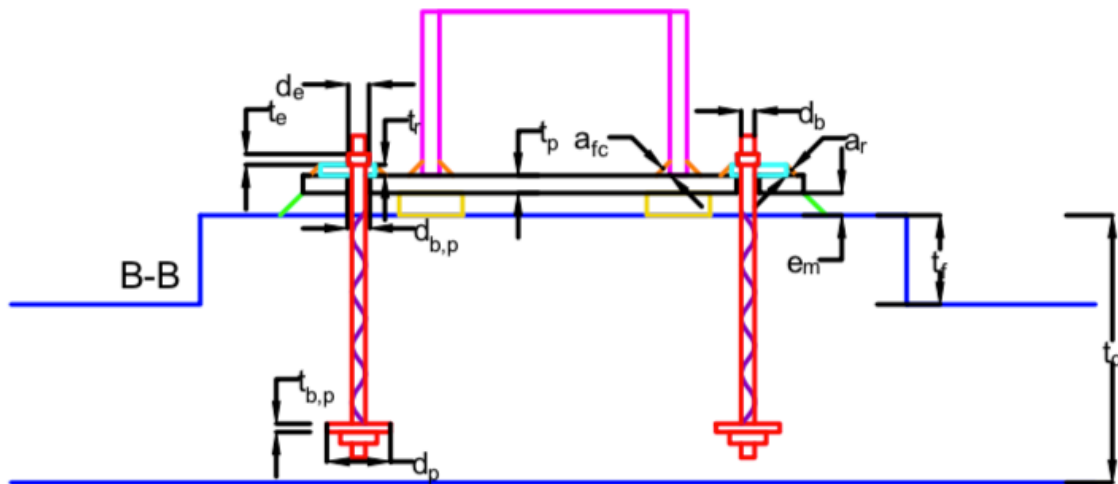
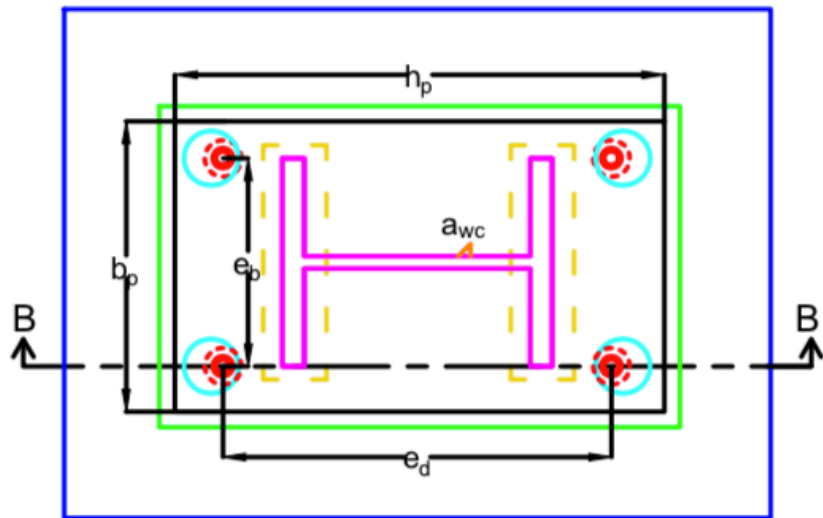
- Tiges droites avec ou sans plat d'ancrage ;
- Une bêche en I parallèle au profilé de la colonne ;
- Des raidisseurs dans le prolongement de l'âme ou des semelles.

Celles-ci sont présentées sur les figures des pages suivantes.

Remarque : la feuille de calcul est réalisée en considérant les variantes individuellement. Néanmoins, en utilisant les règles définies de façon adéquate, celles-ci peuvent être combinées.

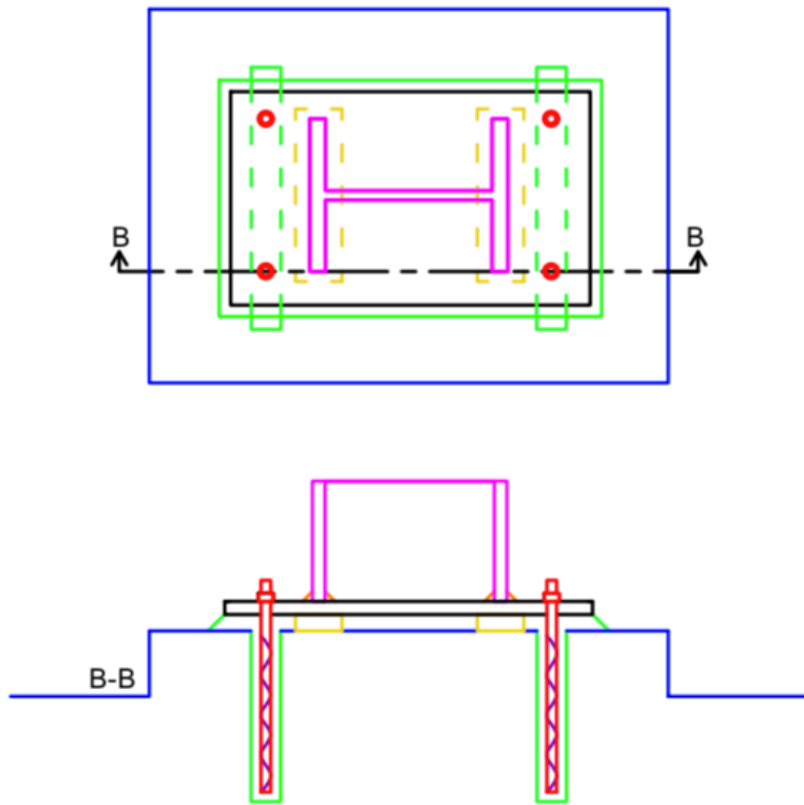


Solution de base



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo

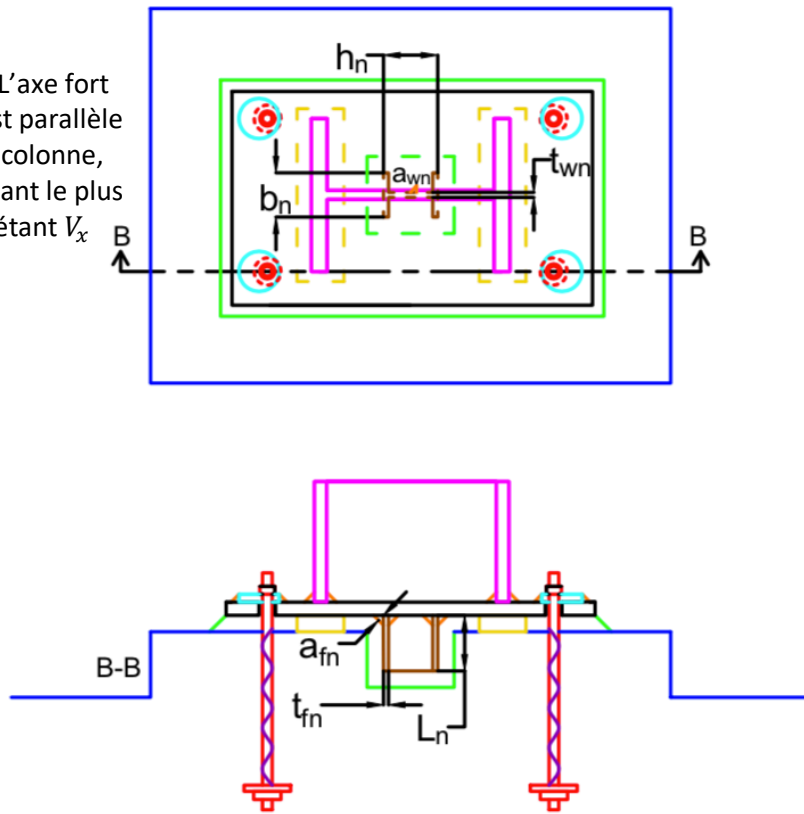
Variante 1 : Tiges droites non-précellées



Légende - Poteau, platine, tiges, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo

Variante 2 : Bêche

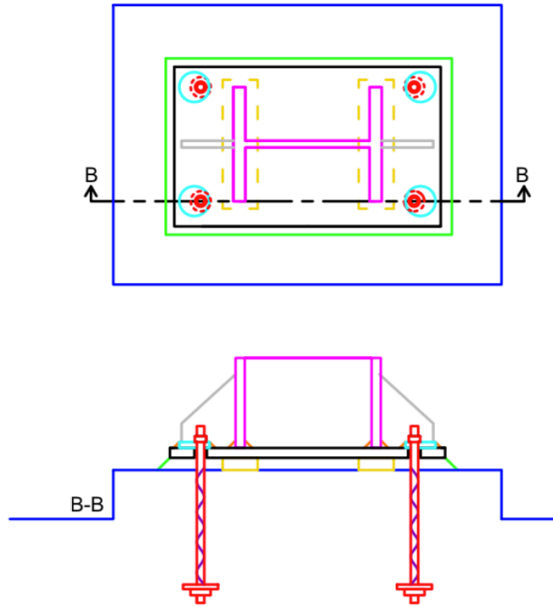
Hypothèse : L'axe fort de la bêche est parallèle à celui de la colonne, l'effort tranchant le plus important étant V_x



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, bêche

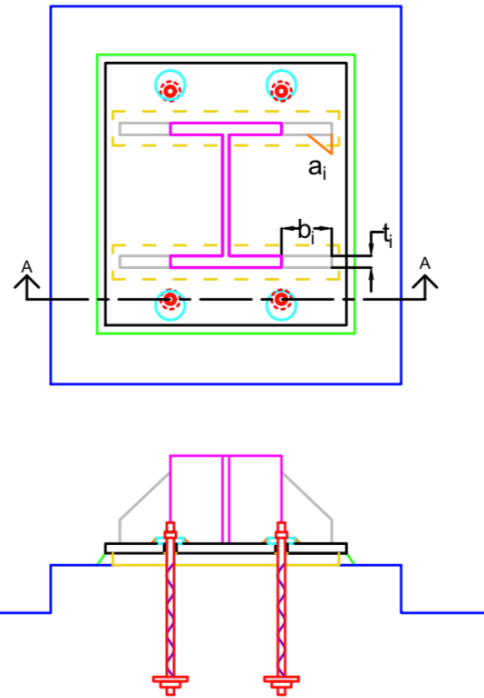
Variante 3 : Raidisseurs

c. Raidisseurs dans le prolongement des semelles



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, raidisseurs

d. Raidisseurs dans le prolongement de l'âme

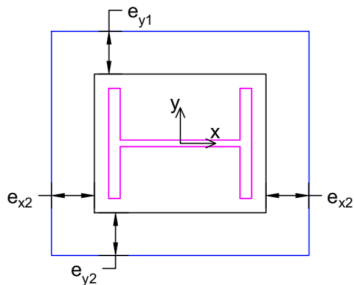


Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, raidisseurs

Définition des données	
Efforts appliqués	
N_{Ed}	Effort normal de traction ou de compression
$V_{x,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe x
$V_{y,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe y
$M_{y,Ed}$ ou $M_{x,Ed}$	Moment de flexion autour de l'axe y-y ou x-x (La bi-flexion n'est pas prise en compte dans cette feuille de calcul)

Coefficients partiels de sécurité		
γ_{M0}	Coefficient partiel pour la résistance des sections en acier, pris égal à 1	EN 1993-1-1
γ_C	Coefficient partiel pour le béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{M2}	Coefficient partiel pour les assemblages par soudure, pris égal à 1,25 Coefficient partiel pour les boulons, pris égal à 1,25	EN 1993-1-8
γ_{MC}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par cône de béton, de rupture du bord du béton, de rupture par éclatement du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{Msp}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par fendage du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4

Caractéristiques des composantes		
Colonne		
f_{yc}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay: S235, S275 ou S355
E	Module de Young	
/	Profilé	Choix imposés par Solvay : IPE, HEA, HEB ou reconstitué
b_{fc}	Largeur du profilé	Solvay impose une valeur maximale de 400mm
h_{fc}	Hauteur du profilé	Solvay impose une valeur comprise entre 140 et 1000mm
t_{fc}	Épaisseur des semelles	Solvay impose une valeur maximale de 40mm
t_{wc}	Épaisseur de l'âme	Solvay impose une valeur maximale de 25mm
r	Congé de raccordement	
A_{fc}	Aire de la section	
I_y	Inertie selon l'axe y-y	
I_x	Inertie selon l'axe x-x	
$A_{vc,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vc,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
a_{wc}	Gorge des soudures entre l'âme et la platine	De façon sécuritaire, vu les nuances d'acier imposées, Solvay considère que si la gorge de soudure a est supérieure à la moitié de l'épaisseur d'un des deux éléments à assembler, la soudure est une soudure à pleine pénétration. Cette remarque est valable pour toutes les soudures réalisées.
a_{fc}	Gorge des soudures entre les semelles et la platine	
l_{wc}	Longueur des soudures entre l'âme et la platine	
l_{fc}	Longueur des soudures entre une semelle et la platine	

Platine			
f_{yp}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355	
b_p	Largeur		
h_p	Hauteur		
t_p	Épaisseur	Solvay impose une valeur maximale de 40mm	
$d_{b,p}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose des valeurs en fonction du diamètre du boulon : M12: 54mm, M16: 58mm, M20: 62mm, M22: 64mm, M24: 66mm, M27: 69mm, M30: 73mm	
Béton			
Hypothèse : Les caractéristiques mécaniques du mortier de scellement sont identiques à celles du béton de la fondation.			
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton	Choix imposés par Solvay : C25/30 ou C30/37	
e_m	Épaisseur du mortier de scellement	Solvay impose une valeur comprise entre 30 et 50mm. Ces valeurs tiennent compte d'une tolérance d'exécution de 20mm. Dans les calculs, on tiendra souvent compte de l'épaisseur minimale, soit 20mm.	
t_f	Épaisseur de la rehausse	Solvay impose une valeur minimale de 200mm	
t_c	Épaisseur de la fondation (rehausse comprise)		
e_{x1}	Dimensions en plan de la rehausse 		
e_{x2}			
e_{y1}			
e_{y2}			
Légende – Colonne, platine, rehausse			
β_j		Coefficient du matériau de scellement, pris égal à 2/3	EN 1993-1-8
Tiges : boulons et écrous			
f_{yb}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : 5.6 avec $f_{yb} = 300MPa$ ou 8.8 avec $f_{yb} = 640MPa$	
/	Type de tiges	Droites ou avec plat	
e_b	Distance entre 2 tiges d'une même rangée		
e_d	Distance entre 2 rangées de tiges		
d_b	Diamètre d'un boulon	Choix imposés par Solvay : M12, M16, M20, M22, M24, M27, M30	
d_p	Diamètre du plat d'ancrage		
$t_{b,p}$	Épaisseur du plat d'ancrage		
A_s	Aire résistante du boulon		
t_e	Épaisseur de l'écrou		
d_e	Diamètre extérieur de l'écrou		

Rondelles		
f_{yr}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235 ou S355
t_r	Épaisseur d'une rondelle	Solvay impose des épaisseurs standards pour les rondelles en fonction du diamètre du boulon et de la nuance d'acier de la rondelle.
a_r	Gorge des soudures entre une rondelle et la platine	
l_r	Longueur des soudures entre une rondelle et la platine	
$d_{b,r}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose un diamètre égal à celui du boulon augmenté de 2mm pour les boulons M12 à M27 et de 3mm pour les boulons M30.
Raidisseurs		
b_i	Longueur d'un raidisseur	
t_i	Épaisseur d'un raidisseur	Lorsque les raidisseurs sont soumis à un effort de compression, ils ne voilent pas si : $t_i \geq \frac{L_i}{25}$ (Livre d'Yvon Lescouarc'h sur les pieds de poteaux articulés)
f_{yi}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
a_i	Gorge des soudures entre un raidisseur et la platine	
l_i	Longueur des soudures entre un raidisseur et la platine	
Bêche (profilé en I ou H)		
f_{yn}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
h_n	Hauteur du profilé	
b_n	Largeur du profilé	
L_n	Profondeur totale de la bêche	
t_{fn}	Épaisseur des semelles	
t_{wn}	Épaisseur de l'âme	
$A_{vn,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vn,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
$I_{y,n}$	Inertie selon l'axe y-y	
$I_{x,n}$	Inertie selon l'axe x-x	
a_{fn}	Gorge des soudures entre les semelles et la platine	
a_{wn}	Gorge des soudures entre l'âme et la platine	
l_{fn}	Longueur des soudures entre une semelle et la platine	
l_{wn}	Longueur des soudures entre l'âme et la platine	

Effort maximal transmissible en compression

Les composantes actives sont :

- Solution de base et variantes 1 et 2 : colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, béton de fondation ;
- Variante 3 : colonne, raidisseurs, soudures entre la platine d'extrémité et la colonne et entre la platine et les raidisseurs, platine d'extrémité, béton de fondation.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal en compression pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties :

- Compression seule : $N_{C,Rd} = \min (N_{C,fc,Rd}; N_{C,a,Rd}; N_{C,w,Rd})$;
- Combinaison M-N : $N_{C,Rd} = \min (N_{C,fc,Rd}; N_{C,a,Rd}; N_{C,w,Rd}; N_{M-C,fc,Rd}; N_{M-C,a,Rd}; N_{M-C,w,Rd})$.

Il ne devrait jamais être relatif à $N_{C,w,Rd}$ ou $N_{M-C,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

$N_{M-C,fc,Rd}, N_{M-C,a,Rd}, N_{M-C,w,Rd}$ sont déterminés dans la section relative à la flexion.

Remarque : ci-dessous, on détermine la résistance de l'assemblage en traction seule. Pour tenir compte de l'interaction M-N, il faut se référer à la section dédiée à la flexion.

6. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{C,fc,Rd}$

$$N_{C,fc,Rd} = \min (N_{C,fcw,Rd}; N_{C,Rd})$$

Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.

Résistance de calcul à la compression de la semelle et de l'âme de la colonne combinées :

$$N_{C,fcw,Rd} = \frac{M_{C,Rd}}{h_{fc} - t_{fc}}$$

$M_{C,Rd}$ = moment résistant de calcul de la section transversale

Résistance en section du poteau :

$$N_{C,Rd} = \begin{cases} \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 1, 2 ou 3} \\ \frac{A_{eff} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 4} \end{cases}$$

A_{eff} = Aire de la section efficace

Eurocode 3
partie 1-8

Eurocode 3
partie 1-1

7. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{C,a,Rd}$

Lors de la transmission d'un effort de compression, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Pour la solution de base et les variantes 1 et 2 : la colonne, la platine et le béton ;
- Pour la variante 3 : la colonne, les raidisseurs, la platine et le béton.

Ces composantes forment ensemble des tronçons en T-équivalents.

Solution de base et variantes 1 et 2 : $N_{C,a,Rd} = F_{c,1,Rd} + F_{c,2,Rd}$

Résistance à la pression localisée du béton :

$$f_{jd} = \beta_j \cdot \alpha_{bf} \cdot f_{cd}$$

$$\alpha_{bf} = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$$

Aire maximale de diffusion :

$$A_{c1} = \min \left\{ 9 \cdot A_{c0} \right. \\ \left. h_f \cdot b_f \right\}$$

Tronçons en T :
Colonne +
Platine +
Béton
(+ Raidisseurs)

Eurocode 3
partie 1-8

<p>Tronçons en T : Colonne + Platine + Béton (+ Raidisseurs)</p>	<p>Hauteur de la rehausse (dimension en plan) : $h_f = h_p + e_{x1} + e_{x2}$</p> <p>Largeur de la rehausse : $b_f = b_p + e_{y1} + e_{y2}$</p> <p>Aire chargée : $A_{c0} = b_p \cdot h_p$</p> <p>Résistance de calcul du béton à la compression :</p> $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ <p>Résistance des tronçons en T sous les semelles du profilé :</p> $F_{c,1,Rd} = 2 \cdot \min (F_{c,f_{jd},Rd}; F_{c,Rd})$ <p>Résistance à la pression localisée sous une semelle :</p> $F_{c,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$ $l_{eff} = \begin{cases} b_p & \text{si } c > \frac{b_p - b_{fc}}{2} \\ b_{fc} + 2 \cdot c & \end{cases}$ <p>Largeur additionnelle : $c = t_p \cdot \sqrt{\frac{f_{yp}}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}}$</p> $b_{eff} = \begin{cases} \frac{h_p - h_{fc}}{2} + t_{fc} + c & \text{si } c > \frac{h_p - h_{fc}}{2} \\ t_{fc} + 2 \cdot c & \end{cases}$ <p>Résistance en compression de la semelle :</p> $F_{c,Rd} = \frac{b_{fc} \cdot t_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$ <p>Résistance des tronçons en T sous l'âme du profilé :</p> <p><i>Remarquons que l'Eurocode néglige la contribution du tronçon sous l'âme.</i></p> $F_{c,2,Rd} = \min (F_{c,f_{jd},Rd}; F_{c,Rd})$ <p>Résistance à la pression localisée sous l'âme :</p> $F_{c,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$ $l_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \text{ (recouvrement)} \\ h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} - 2 \cdot c & \end{cases}$ <p><i>On parle de recouvrement lorsque les aires des tronçons en T sous les semelles couvrent l'entièreté de l'âme.</i></p> $b_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \\ t_{wc} + 2 \cdot c & \text{si } c < h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \text{ et } b_p > t_{wc} + 2 \cdot c \\ b_p & \text{si } c < h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \text{ et } b_p \leq t_{wc} + 2 \cdot c \end{cases}$ <p>Résistance en compression de l'âme :</p> $F_{c,Rd} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ si recouvrement} \\ \frac{(h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} - 2 \cdot c) \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} \end{array} \right.$	<p>Eurocode 2 partie 1-1</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Livre du CTICM</p>
	<p>Variante 3a : $N_{C,a,Rd} = F_{c,1,Rd} + F_{c,2,Rd} + F_{c,3,Rd}$</p> <p>Résistance des tronçons en T sous les raidisseurs :</p> $F_{c,3,Rd} = 4 \cdot \min (F_{c,f_{jd},Rd}; F_{c,Rd})$ <p><i>Remarquons que l'Eurocode néglige la contribution des tronçons sous les raidisseurs.</i></p> <p>Résistance à la pression localisée sous un raidisseur :</p> $F_{c,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$	

	$l_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq b_i \text{ si recouvrement} \\ b_i & \text{si } c < \frac{b_p - b_{fc}}{2} \\ \frac{b_p - b_{fc}}{2} - c & \text{si } c \geq \frac{b_p - b_{fc}}{2} \end{cases}$ $b_{eff} = \begin{cases} \frac{h_p - h_{fc}}{2} + t_{fc} + c & \text{si } c > \frac{h_p - h_{fc}}{2} \\ t_{fc} + 2 \cdot c & \end{cases}$ <p>Résistance en compression des raidisseurs :</p> $F_{c,Rd} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ si recouvrement} \\ \frac{(b_i - c) \cdot t_i \cdot f_{yi}}{\gamma_{M0}} \end{array} \right.$	
	<p>Variante 3b : $N_{C,a,Rd} = F_{c,1,Rd} + F_{c,2,Rd} + F_{c,4,Rd}$</p>	
	<p>Résistance des tronçons en T sous les raidisseurs :</p> $F_{c,4,Rd} = 2 \cdot \min (F_{c,f_{jd},Rd}; F_{c,Rd})$	
	<p>Résistance à la pression localisée sous un raidisseur :</p> $F_{c,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$	
	$l_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq b_i \text{ (recouvrement)} \\ b_i & \text{si } c \leq \frac{h_p - (h_{fc} + b_i)}{2} \\ \frac{h_p - h_{fc}}{2} - c & \text{si } c > \frac{h_p - (h_{fc} + b_i)}{2} \end{cases}$	
	$b_{eff} = \min \left\{ \begin{array}{l} t_i + 2 \cdot c \\ b_p \end{array} \right.$	
	<p>Résistance en compression des raidisseurs :</p> $F_{c,Rd} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ (recouvrement)} \\ \frac{(b_i - c) \cdot t_i \cdot f_{yi}}{\gamma_{M0}} \end{array} \right.$	
<p>8. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{C,w,Rd}$</p>		
<p>Soudures entre la colonne et la platine</p>	$N_{C,w,Rd} = N_{C,wc,Rd} + N_{C,wfc,Rd}$ <p>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</p> <p>$N_{C,wc,Rd}$ = Résistance des soudures entre l'âme du poteau et la platine</p> <p>$N_{C,wfc,Rd}$ = Résistance des soudures entre les semelles du poteau et la platine</p> <p>La formule générale d'évaluation de la résistance des soudures est :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>

Effort maximal transmissible en traction

Les composantes actives sont :

- Solution de base et variante 2 : Colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton ;
- Variante 1 : Colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, tiges, béton ;
- Variante 3 : Colonne, raidisseurs, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité et entre les raidisseurs et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties :

- Traction seule : $N_{T,Rd} = \min(N_{T,fc,Rd}; N_{T,a,Rd}; N_{T,w,Rd})$;
- Combinaison M-N : $N_{T,Rd} = \min(N_{T,fc,Rd}; N_{T,a,Rd}; N_{T,w,Rd}; N_{M-T,fc,Rd}; N_{M-T,a,Rd}; N_{M-T,w,Rd})$.

Il ne devrait jamais être relatif à $N_{T,w,Rd}$ ou $N_{M-T,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

$N_{M-T,fc,Rd}$, $N_{M-T,a,Rd}$, $N_{M-T,w,Rd}$ sont déterminés dans la section relative à la flexion.

Remarque : ci-dessous, on détermine la résistance de l'assemblage en traction seule. Pour tenir compte de l'interaction M-N, il faut se référer à la section dédiée à la flexion.

7. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{T,fc,Rd}$

$N_{T,fc,Rd} = N_{t,Rd}$ <p><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</i></p> <p style="text-align: center;">Résistance en section de la colonne :</p> $N_{t,Rd} = \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$	Eurocode 3 partie 1-1
--	--------------------------

8. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{T,a,Rd}$

Pour la transmission de l'effort de traction, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Pour la solution de base et variante 2 : la platine, les rondelles, les tiges, le béton ;
- Pour la variante 1 : la platine, les tiges, le béton ;
- Pour la variante 3 : la platine, les raidisseurs, les rondelles, les tiges, le béton.

L'effort maximal de traction, pouvant être transmis par l'assemblage boulonné, correspond à :

$N_{T,a,Rd} = 2 \cdot F_{T,Rd}$ avec $F_{T,Rd}$ = Résistance d'un tronçon en T tendu :

- Pour la solution de base et les variantes 1, 2 et 3a :
 - Effet de levier : $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$;
 - Sans effet de levier : $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$;
- Pour la variante 3b :
 - $L_b \leq L_{b,fc}^*$ et $L_b \leq L_{b,i}^*$: $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd,fc}; F_{T,1,Rd,i}; F_{T,2,Rd,fc}; F_{T,2,Rd,i}; F_{T,3,Rd})$;
 - $L_b \leq L_{b,fc}^*$ et $L_b > L_{b,i}^*$: $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd,fc}; F_{T,2,Rd,fc}; F_{T,1-2,Rd,i}; F_{T,3,Rd})$;
 - $L_b > L_{b,fc}^*$ et $L_b > L_{b,i}^*$: $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1-2,Rd,fc}; F_{T,1-2,Rd,i}; F_{T,3,Rd})$;
 - $L_b > L_{b,fc}^*$ et $L_b \leq L_{b,i}^*$: $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd,i}; F_{T,1-2,Rd,fc}; F_{T,2,Rd,i}; F_{T,3,Rd})$.

Remarque 1 :

Les modes de ruine 2 et 3 sont relatifs à la rupture en section des tiges. L'effort maximal transmissible de l'assemblage boulonné ne devrait donc pas être relatif à ceux-ci.

Remarque 2 :

L'effort maximal ne dépend ni des modes de ruines possibles des rondelles, ni de ceux du béton.

Les dimensions des rondelles seront toujours choisies telles que cette composante ne provoque jamais la ruine de l'assemblage.

Les modes de ruine du béton sont des modes de ruine fragile à éviter à tout prix. Ainsi, les dispositions constructives sont toujours choisies telles que ces modes de ruine ne se produisent jamais.

Remarque 3 :

Les modes de rupture liés aux armatures (rupture de l'acier de l'armature et résistance à la rupture d'ancrage de l'armature) ne sont pas pris en compte dans cette feuille de calcul. Les règles de calcul qui y sont relatives se trouvent dans l'Eurocode 2 partie 4.

a. Solution de base et variantes 1, 2 et 3a : Effort maximal transmis par le tronçon en T

L'effet levier est à prendre en compte si $L_b \leq L_b^*$ (Eurocode 3 partie 1-8)

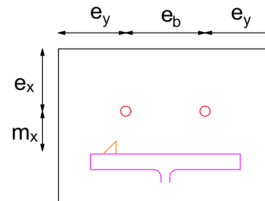
$$\text{Avec } L_b = 8 \cdot d_b + e_m + t_p + t_r + \frac{t_e}{2} \text{ et } L_b^* = \frac{8,8 \cdot m_x^3 \cdot A_s}{l_{eff,1} \cdot t_p^3}$$

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc})$$

$$l_{eff,cp} = \min(2 \cdot \pi \cdot m_x; \pi \cdot m_x + e_b; \pi \cdot m_x + 2 \cdot e_x; \pi \cdot m_x + 2 \cdot e_y)$$

$$m_x = \frac{h_p}{2} - e_x - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_{fc}$$

$$l_{eff,nc} = \min(4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x; 0,5 \cdot e_b + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x; e_y + 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x; 0,5 \cdot b_p)$$

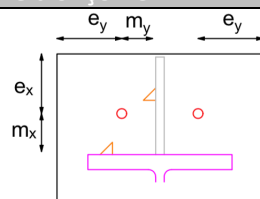


Platine	Résistance associée au mode de ruine 1 : $F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$ $M_{pl,1,Rd} = l_{eff,1} \cdot m_{pl,Rd}$ $m_{pl,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot f_{yp}}{4 \cdot \gamma_{M0}}$	Eurocode 3 partie 1-8
	Résistance associée au mode de ruine 1-2 : $F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges - Platine	Résistance associée au mode de ruine 2 : $F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m_x + n}$ $M_{pl,2,Rd} = l_{eff,2} \cdot m_{pl,Rd}$ $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$ $n = \min(e_x; 1,25 \cdot m_x)$ $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $k_2 = 0,9$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges	Résistance associée au mode de ruine 3 : $F_{T,3,Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd}$	Eurocode 3 partie 1-8

b. Variante 3b : Effort maximal transmis par le tronçon en T

L'effet levier est à prendre en compte si $L_b \leq L_b^*$
(Eurocode 3 partie 1-8)

$$L_b = 8 \cdot d_b + e_m + t_p + t_r + \frac{t_e}{2}$$



Étude du tronçon dont l'âme est la semelle du profilé :

$$L_{b,fc}^* = \frac{8,8 \cdot m_x^3 \cdot A_s}{l_{eff,1} \cdot t_p^3}$$

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc})$$

$$l_{eff,cp} = \min(2 \cdot \pi \cdot m_x; \pi \cdot m_x + 2 \cdot e_y)$$

$l_{eff,nc}$

$$= \min \begin{cases} \alpha \cdot m_x \\ \alpha \cdot m_x - (2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x) + e_y \\ 4 \cdot m_x + 1,25 \cdot e_x \end{cases}$$

Étude du tronçon dont l'âme est le raidisseur :

$$L_{b,i}^* = \frac{8,8 \cdot m_y^3 \cdot A_s}{l_{eff,1} \cdot t_p^3}$$

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc})$$

$$l_{eff,cp} = \min(2 \cdot \pi \cdot m_y; \pi \cdot m_y + 2 \cdot e_x)$$

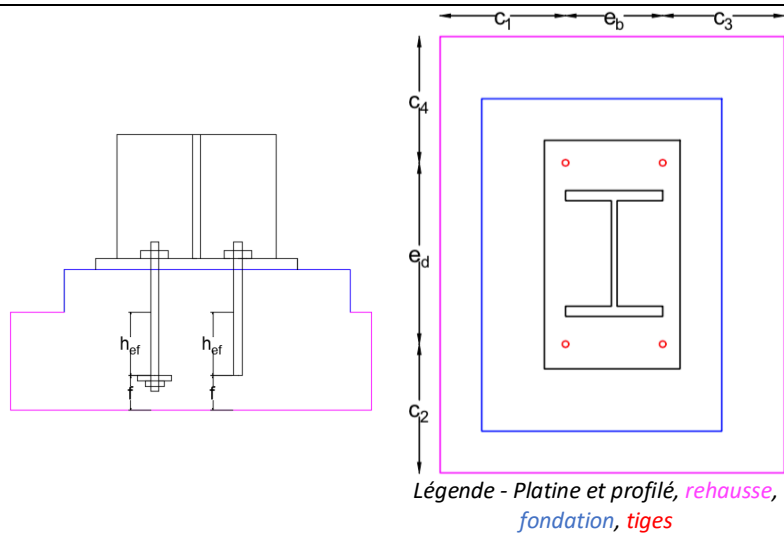
$l_{eff,nc}$

$$= \min \begin{cases} \alpha \cdot m_y \\ \alpha \cdot m_y - (2 \cdot m_y + 0,625 \cdot e_y) + e_x \\ 4 \cdot m_y + 1,25 \cdot e_y \end{cases}$$

Platine	Étude du tronçon dont l'âme est la semelle du profilé : Résistance associée au mode de ruine 1 : $F_{T,1,Rd,fc} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$ $M_{pl,1,Rd} = l_{eff,1} \cdot m_{pl,Rd}$ $m_{pl,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot f_{yp}}{4 \cdot \gamma_{M0}}$	Étude du tronçon dont l'âme est le raidisseur : Résistance associée au mode de ruine 1 : $F_{T,1,Rd,i} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_y}$ $M_{pl,1,Rd} = l_{eff,1} \cdot m_{pl,Rd}$ $m_{pl,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot f_{yp}}{4 \cdot \gamma_{M0}}$	Eurocode 3 partie 1-8
	Résistance associée au mode de ruine 1-2 : $F_{T,1-2,Rd,fc} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$	Résistance associée au mode de ruine 1-2 : $F_{T,1-2,Rd,i} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_y}$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges - Platine	Résistance associée au mode de ruine 2 : $F_{T,2,Rd,fc} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m_x + n}$ $M_{pl,2,Rd} = l_{eff,2} \cdot m_{pl,Rd}$ $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$ $n = \min(e_x; 1,25 \cdot m_x)$ $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $k_2 = 0,9$	Résistance associée au mode de ruine 2 : $F_{T,2,Rd,i} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}}{m_y + n}$ $M_{pl,2,Rd} = l_{eff,2} \cdot m_{pl,Rd}$ $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$ $n = \min(e_y; 1,25 \cdot m_y)$ $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $k_2 = 0,9$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges	Résistance associée au mode de ruine 3 : $F_{T,3,Rd} = 2 \cdot F_{t,Rd}$		Eurocode 3 partie 1-8

c. Étude des modes de ruine à l'interface entre les tiges et le béton

Tiges – Béton	Résistance à la rupture par cône de béton : $N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \leq N_{T,a,Rd}$ $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N}$ $N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1,5}$	Eurocode 2 partie 4
---------------	--	---------------------



$$k_1 = \begin{cases} 7,7 \text{ béton fissuré} \\ 11 \text{ béton non fissuré} \end{cases}$$

$A_{c,N}$ = surface projetée réelle

Hypothèse : La fondation en béton est rectangulaire ou carrée.

$$A_{c,N} = \left(2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_b}{2} \right) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_3) \right. \\ \left. + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_1) \right) \cdot \left(\min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_2) \right. \\ \left. + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_4) + 2 \cdot \min \left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_d}{2} \right) \right)$$

$$s_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef}$$

$$A_{c,N}^0 = \text{surface projetée de référence} = 2 \cdot s_{cr,N}^2$$

$$\psi_{s,N} = \psi_s \cdot \psi_c$$

$$\psi_s = \psi_{s,y} \cdot \psi_{s,x}$$

$$\psi_{s,y} = \frac{1 + \frac{e_b}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

$$\psi_{s,x} = \frac{1 + \frac{e_d}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

$$\psi_c = \psi_{c,y} \cdot \psi_{c,x}$$

$$\psi_{c,y} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_1; c_3)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$c_{cr,N} = 1,5 \cdot h_{ef}$$

$$\psi_{c,x} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_2; c_4)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$\psi_{re,N} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1$$

$$\psi_{ec,N} = 1$$

$$\psi_{M,N} = \begin{cases} 2 - \frac{z}{1,5 \cdot h_{eff}} \geq 1 \text{ s'il existe un moment de flexion} \\ 1 \text{ sinon} \end{cases}$$

z , bras de levier déterminé dans la section relative à la recherche de l'effort maximal transmissible en flexion

Résistance à la rupture par fendage du béton :

$$\text{Sinon } N_{Rd,sp} = \frac{N_{Rk,sp}}{\gamma_{Msp}} \leq N_{T,a,Rd}$$

Livre du
CTICM

L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si ces deux conditions sont satisfaites :

$$\begin{cases} c \geq c_{cr,sp} \\ t_c - t_f \geq h_{min} \end{cases}$$

$$c = \min(c_1; c_2; c_3; c_4)$$

$c_{cr,sp}$ = distance au bord caractéristique en cas de fendage sous charge, obtenue dans la spécification technique du produit

h_{min} = épaisseur minimale autorisée pour l'élément en béton, obtenue dans la spécification technique du produit

$$N_{Rk,sp} = N_{Rk,sp}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{h,sp}$$

$$N_{Rk,sp}^0 = \min(N_{Rk,p}^0; N_{Rk,c}^0)$$

$N_{Rk,p} = 0N$ car pas de résistance à l'adhérence vu l'utilisation de bande DENZO

$A_{c,N}, A_{c,N}^0, \psi_{s,N}, \psi_{re,N}, \psi_{ec,N} \rightarrow$ Idem que pour le calcul de la résistance à la rupture par cône de béton mais en utilisant $s_{cr,sp}$ et

$$c_{cr,sp}$$

$$s_{cr,sp} = 2 \cdot c_{cr,sp}$$

$$\psi_{h,sp} = \left(\frac{t_d}{h_{min}}\right)^{\frac{2}{3}} \leq \max\left(1; \left(\frac{h_{eff}+1,5 \cdot c}{h_{min}}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \leq 2$$

$$c = \min(c_1; c_3)$$

Résistance à la rupture par éclatement du béton :

$$N_{Rd,cb} = N_{Rd,i,cb} \leq \frac{N_{T,a,Rd}}{4}$$

Cette résistance est évaluée pour chaque bord en considérant la tige la plus proche du bord étudié.

L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si $c_i > 0,5 \cdot h_{eff}$

$$N_{Rk,i,cb} = N_{Rk,i,cb}^0 \cdot \frac{A_{c,i,Nb}}{A_{c,i,Nb}^0} \cdot \psi_{s,i,Nb} \cdot \psi_{g,i,Nb} \cdot \psi_{ec,Nb}$$

$$N_{Rk,i,cb}^0 = k_5 \cdot c_i \cdot \sqrt{A_h} \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ avec } c_i \leq 0,5 \cdot h_{eff}$$

$$k_5 = \begin{cases} 8,5 & \text{si béton fissuré} \\ 12,2 & \text{si béton non fissuré} \end{cases}$$

$$A_h = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_b^2)$$

$A_{c,i,Nb}$ = surface projetée réelle

Si $c_i = c_1$ ou c_3 , $A_{c,i,Nb} = (\min(c_2; 2 \cdot c_i) + \min(c_4; 2 \cdot c_i) + \min(e_d; 4 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$

Si $c_i = c_2$ ou c_4 , $A_{c,i,Nb} = (\min(c_1; 2 \cdot c_i) + \min(e_b; 4 \cdot c_i) + \min(c_3; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$

$$A_{c,i,Nb}^0 = (4 \cdot c_i)^2$$

$$\psi_{g,i,Nb} = \sqrt{n} + (1 - \sqrt{n}) \cdot \frac{e_i}{4 \cdot c_i}$$

$$\psi_{s,Nb} = 0,7 + 0,3 \cdot \frac{c_j}{2 \cdot c_i} \leq 1$$

$$c_j = \begin{cases} \min(c_2; c_4) & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ \min(c_1; c_3) & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$$

$$\psi_{ec,Nb} = 1$$

d. Étude des rondelles		
Rondelles	<p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $F_{T,r,Rd} = \min (B_{r,Rd}; F_{t,pl,Rd}) \leq N_{T,a,Rd}$ <p>Résistance au poinçonnement :</p> $B_{r,Rd} = 4 \cdot \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_r \cdot f_{ur}}{\gamma_{M2}}$ <p>d_m = moyenne entre surangle et surplat de la tête de boulon ou de l'écrou, en prenant la plus petite</p> <p>Résistance à la flexion due aux écrous :</p> $F_{t,pl,Rd} = 4 \cdot \frac{\pi \cdot t_r \cdot f_{yr}}{2 \cdot \gamma_{M0}}$ <p>Ce mode de ruine n'est pas à considérer si :</p> $d_{b,p} \leq d_e \text{ ou } d_{b,p} > d_e \text{ et } t_r > \frac{d_{b,p} + d_e}{2}$ <p>Au vu des dimensions standards imposées par Solvay, cette résistance n'est généralement pas à prendre en compte.</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Article du CTICM</p>
Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{T,w,Rd}$		
$N_{T,w,Rd} = N_{T,wf,Rd}$		
Soudures entre la platine d'extrémité et la colonne	<p><i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i></p> $N_{T,wf,Rd} = N_{T,wc,Rd} + N_{T,wfc,Rd}$ <p>$N_{T,wc,Rd}$ = Résistance des soudures entre l'âme du poteau et la platine</p> <p>$N_{T,wfc,Rd}$ = Résistance des soudures entre les semelles du poteau et la platine</p> <p>La résistance des soudures est donnée par :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
Soudures entre les rondelles et la platine d'extrémité	<p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $N_{T,wr,Rd} \leq \frac{N_{T,w,Rd}}{4}$ <p>$N_{T,wr,Rd}$ = Résistance des soudures entre une rondelle et la platine</p>	

Effort maximal transmissible en flexion

Les composantes actives dépendent du cas de répartition des efforts :

- Si l'assemblage est partiellement ou totalement comprimé : les composantes sont identiques à celles actives en compression seule ;
- Si l'assemblage est totalement tendu : les composantes sont identiques à celles actives que pour la traction seule ;
- Si l'assemblage est partiellement tendu et partiellement comprimé :
 - Solution de base et variante 2 : colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton ;
 - Variante 1 : colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, tiges, béton ;
 - Variante 3 : colonne, raidisseurs, soudures entre la platine d'extrémité et la colonne et entre les raidisseurs et la platine, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort de flexion maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties : $M_{Rd} = \min (M_{fc,Rd}; M_{a,Rd}; M_{w,Rd})$.

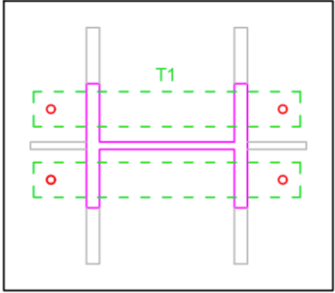
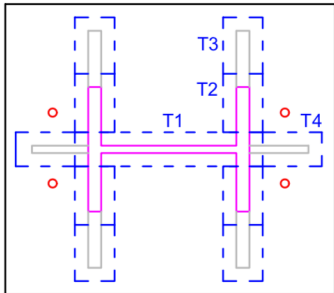
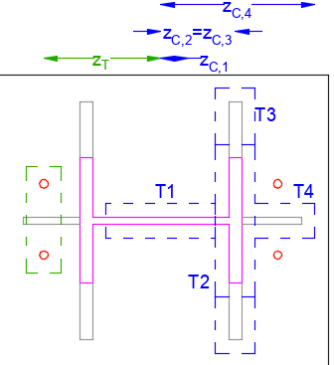
Il ne devrait jamais être relatif à $M_{w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

Remarque 1 : L'assemblage peut être soumis à un effort de flexion autour d'un seul de ses deux axes principaux. La bi-flexion n'est pas prise en compte dans le cadre de cette feuille de calcul.

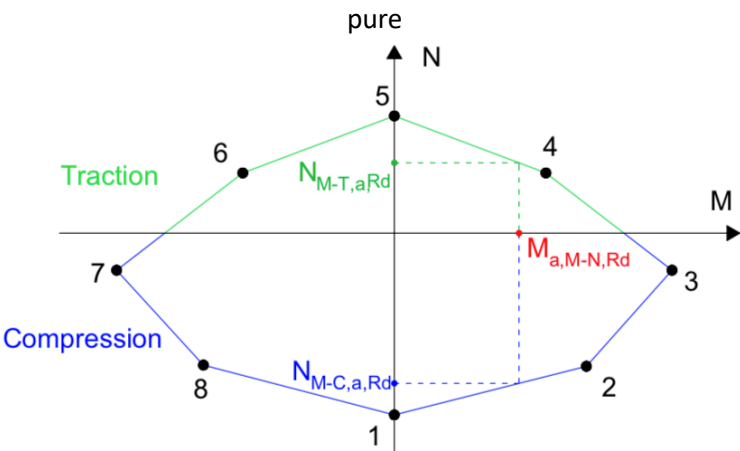
Remarque 2 : Ci-dessous, l'effort axial maximal transmissible dans le cas d'une combinaison M-N est également déterminé pour chacune des trois parties principales de l'assemblage.

1. Évaluation du moment de flexion maximal transmissible par la colonne $M_{fc,Rd}$

Colonne	<p style="text-align: center;">En flexion seule : $M_{fc,Rd} = M_{c,Rd}$</p> <p>En flexion combinée à un effort axial : $M_{fc,Rd} = \min (M_{c,Rd}; M_{M-N,Rd})$</p> <p style="text-align: center;"><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</i></p> <p style="text-align: center;">Flexion seule :</p> $M_{c,Rd} = \begin{cases} \frac{W_{pl} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{pour les sections de classe 1 ou 2} \\ \frac{W_{el,min} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{pour les sections de classe 3} \\ \frac{W_{eff,min} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{pour les sections de classe 4} \end{cases}$ <p style="text-align: center;">W_{pl} = le module plastique de section $W_{el,min}$ = le module élastique minimal de section $W_{eff,min}$ = le module minimal de section efficace</p> <p style="text-align: center;">Les formules sont identiques, peu importe l'axe de rotation choisi. Les modules de flexion sont à choisir en fonction.</p> <p style="text-align: center;">Interaction M-N</p> <p style="text-align: center;"><i>Hypothèse : On fait l'hypothèse que $N_{M-T,fc,Rd} = N_{M-C,fc,Rd} = N_{Ed}$. Sur cette base, l'effort de flexion maximal que l'assemblage peut reprendre en plus est déterminé.</i></p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 :</p> $c = \frac{0,5 \cdot (h_{fc} - 2 \cdot t_{fc}) \cdot t_{wc}}{A_{fc}}$ $N_{pl,Rd} = \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$	Eurocode 3 partie 1-1
---------	--	--------------------------

	<p style="text-align: center;">Flexion d'axe fort :</p> <p style="text-align: center;">Si $N_{Ed} \leq c \cdot N_{pl,Rd}$, $M_{M-N,Rd} = M_{c,Rd}$</p> <p style="text-align: center;">Sinon, $M_{M-N,Rd} = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}}{1 - c} \cdot M_{c,Rd}$</p> <p style="text-align: center;">Flexion d'axe faible :</p> <p style="text-align: center;">Si $N_{Ed} \leq 2 \cdot c \cdot N_{pl,Rd}$, $M_{M-N,Rd} = M_{c,Rd}$</p> <p style="text-align: center;">Sinon, $M_{M-N,Rd} = \left(1 - \left(\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} - 2 \cdot c\right)^2\right) \cdot M_{c,Rd}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 :</p> $M_{M-N,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{A_{fc} \cdot f_{yc}}\right) \cdot \frac{W_{el,min} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$ <p style="text-align: center;">Section de classe 4 :</p> $M_{M-N,Rd} = \left(\left(1 - \frac{N_{Ed}}{A_{eff} \cdot \frac{f_{yc}}{\gamma_{M0}}}\right) \cdot W_{eff,min} \cdot \frac{f_{yc}}{\gamma_{M0}}\right) - N_{Ed} \cdot e_N$ <p style="text-align: center;">e_N = décalage d'axe neutre approprié en supposant la section transversale soumise à la seule compression.</p>	
2. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $M_{a,Rd}$		
<p style="text-align: center;">L'effort de flexion maximal transmissible par l'assemblage boulonné est donné par :</p> <p style="text-align: center;">Flexion seule : $M_{a,Rd} = M_{a,c,Rd}$;</p> <p style="text-align: center;">Flexion combinée à un effort axial :</p> $M_{a,Rd} = \min(M_{a,c,Rd}; M_{a,M-N,Rd}) \text{ et } N_{T,a,Rd} = \min(N_{T,a,Rd}; N_{M-T,a,Rd}) \text{ ou } N_{C,a,Rd} = \min(N_{C,a,Rd}; N_{M-C,a,Rd}).$ <p>Les études ci-dessous sont menées pour un moment de flexion appliqué autour de l'axe fort de la section. Néanmoins, les principes sont identiques dans le cas où le moment est appliqué autour de l'axe faible. Ils peuvent être facilement adaptés. Dans le cas d'une interaction M-N, la résistance des tronçons en T doit être réévaluée en compression et en traction en considérant les tronçons présentés sur les figures ci-dessous (pour autant qu'il n'y ait pas de recouvrement).</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p style="color: green; font-size: small;">Traction</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p style="color: blue; font-size: small;">Compression</p>  </div> </div>		
	<p style="text-align: center;">Flexion seule : $M_{a,c,Rd} = \min(M_{T,Rd}; M_{C,Rd})$</p> <p style="text-align: center;"><i>Remarque : l'Eurocode néglige la contribution de l'âme à la résistance en flexion.</i></p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>Eurocode 3 partie 1-8 et Livre du CTIM</p>

<p>Tronçons en T comprimés : colonne + platine + béton (+raidisseurs)</p>	$M_{T,Rd} = F_{T,Rd} \cdot (z_T + z_C)$ <p>$F_{T,Rd}$ = Résistance d'un tronçon en T tendu, donnée dans la partie consacrée à l'évaluation de l'effort maximal transmissible en traction seule de cette note de calcul</p> $z_C = \frac{\frac{F_{C,1,Rd}}{2} \cdot (z_{C,1} + z_T) + F_{C,2,Rd} \cdot (z_{C,2} + z_T) + 2 \cdot F_{C,3,Rd} \cdot (z_{C,3} + z_T) + F_{C,4,Rd} \cdot (z_{C,4} + z_T)}{\frac{F_{C,1,Rd}}{2} + F_{C,2,Rd} + 2 \cdot F_{C,3,Rd} + F_{C,4,Rd}}$ <p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pour la configuration de base et les variantes 1 et 2 : $F_{C,4,Rd} = F_{C,3,Rd} = 0$ - Pour la variante 3a : $F_{C,4,Rd} = 0$ - Pour la variante 3b : $F_{C,3,Rd} = 0$ <p>$F_{C,i,Rd}$ = Résistance d'un tronçon en T comprimé, donnée dans la partie consacrée à l'évaluation de l'effort maximal transmissible en compression seule de cette note de calcul</p> $M_{C,Rd} = \frac{F_{C,1,Rd}}{2} \cdot (z_{C,1} + z_T) + F_{C,2,Rd} \cdot (z_{C,2} + z_T) + 2 \cdot F_{C,3,Rd} \cdot (z_{C,3} + z_T) + F_{C,4,Rd} \cdot (z_{C,4} + z_T)$ <p>Interaction M-N : Deux méthodes peuvent être utilisées afin de déterminer le couple d'efforts résistants M-N :</p>															
<p>Tronçon en T tendu : colonne, platine, rondelles, tiges, béton</p>	<p>1. Les formules analytiques :</p> $e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}}$ <table border="1" data-bbox="395 1104 1200 1729"> <thead> <tr> <th>Cas de répartition des efforts</th> <th>Moment résistant $M_{a,M-N,Rd}$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">Côté gauche tendu Côté droit comprimé</td> <td>$N_{Ed} > 0$ et $e > z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e \leq -z_C$</td> </tr> <tr> <td>$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Côté gauche tendu Côté droit tendu</td> <td>$N_{Ed} > 0$ et $0 < e < z_T$ ou $N_{Ed} > 0$ et $-z_T < e \leq 0$</td> </tr> <tr> <td>$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Côté gauche comprimé Côté droit tendu</td> <td>$N_{Ed} > 0$ et $e \leq -z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e > -z_C$</td> </tr> <tr> <td>$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Côté gauche comprimé Côté droit comprimé</td> <td>$N_{Ed} \leq 0$ et $0 < e < z_C$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $-z_C < e \leq 0$</td> </tr> <tr> <td>$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$</td> </tr> </tbody> </table> $N_{M-T,a,,Rd} \text{ ou } N_{M-C,a,,Rd} = \frac{M_{a,M-N,Rd}}{e}$	Cas de répartition des efforts	Moment résistant $M_{a,M-N,Rd}$	Côté gauche tendu Côté droit comprimé	$N_{Ed} > 0$ et $e > z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e \leq -z_C$	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$	Côté gauche tendu Côté droit tendu	$N_{Ed} > 0$ et $0 < e < z_T$ ou $N_{Ed} > 0$ et $-z_T < e \leq 0$	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$	Côté gauche comprimé Côté droit tendu	$N_{Ed} > 0$ et $e \leq -z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e > -z_C$	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$	Côté gauche comprimé Côté droit comprimé	$N_{Ed} \leq 0$ et $0 < e < z_C$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $-z_C < e \leq 0$	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$	
Cas de répartition des efforts	Moment résistant $M_{a,M-N,Rd}$															
Côté gauche tendu Côté droit comprimé	$N_{Ed} > 0$ et $e > z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e \leq -z_C$															
	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$															
Côté gauche tendu Côté droit tendu	$N_{Ed} > 0$ et $0 < e < z_T$ ou $N_{Ed} > 0$ et $-z_T < e \leq 0$															
	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$															
Côté gauche comprimé Côté droit tendu	$N_{Ed} > 0$ et $e \leq -z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e > -z_C$															
	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$															
Côté gauche comprimé Côté droit comprimé	$N_{Ed} \leq 0$ et $0 < e < z_C$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $-z_C < e \leq 0$															
	$M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$															

	<p>2. Le diagramme d'interaction M-N :</p> <p>On construit le diagramme d'interaction M-N à partir de 8 points :</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. $(N_{C,a,Rd}; 0)$ 2. $(\frac{N_{C,a,Rd}}{2}; -\frac{N_{C,a,Rd}}{2} \cdot Z_C)$ 3. $(\frac{N_{T,a,Rd}+N_{C,a,Rd}}{2}; N_{T,a,Rd} \cdot \frac{Z_T}{2} - N_{C,a,Rd} \cdot Z_C)$ 4. $(\frac{N_{T,a,Rd}}{2}; \frac{N_{T,a,Rd}}{2} \cdot Z_C)$ 5. $(N_{T,a,Rd}; 0)$ 6. $(\frac{N_{T,a,Rd}}{2}; -\frac{N_{T,a,Rd}}{2} \cdot Z_C)$ 7. $(\frac{N_{T,a,Rd}+N_{C,a,Rd}}{2}; -N_{T,a,Rd} \cdot \frac{Z_T}{2} + N_{C,a,Rd} \cdot Z_C)$ 8. $(\frac{N_{C,a,Rd}}{2}; \frac{N_{C,a,Rd}}{2} \cdot Z_C)$ <p>$N_{T,a,Rd}$ = la résistance de l'assemblage boulonné à la traction pure $N_{C,a,Rd}$ = la résistance de l'assemblage boulonné à la compression</p> 	
3. Évaluation de l'effort de flexion maximal transmissible par les soudures $M_{w,Rd}$		
Soudure entre la platine et la colonne	<p>Flexion seule : $M_{w,Rd} = M_{w,c,Rd}$ Flexion combinée à un effort axial : $M_{w,Rd} = \min(M_{w,c,Rd}; M_{w,M-N,Rd})$ <i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i></p> <p>Flexion seule : <i>Hypothèse : les soudures au niveau des semelles résistent seules à l'effort de flexion.</i></p> <p>Moment autour de l'axe fort :</p> $M_{w,c,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \cdot (h_{fc} - t_{fc})$ <p>Moment autour de l'axe faible :</p> $M_{w,c,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \cdot 0,5 \cdot b_{fc}$ <p>Interaction M-N :</p> <p>Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p><i>Hypothèses :</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Les soudures au niveau des semelles résistent seules à l'effort de flexion et les soudures entre les raidisseurs et la platine sont négligées ; - L'effort axial peut être réparti comme ci-dessous entre l'âme et les semelles si : <ul style="list-style-type: none"> • Si la rigidité de la platine est suffisante pour que celle-ci ne se déforme pas et que toutes les soudures travaillent de la même façon ; • Les gorges de soudures sont respectivement proportionnelles à l'épaisseur de l'âme et de la platine. 	

	<p>Soudure entre l'âme et la platine :</p> $N_{w,wc,Rd} = a_{wc} \cdot l_{wc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq N_{Ed} \cdot \frac{A_{fc} - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}}$ <p>Soudures entre les semelles et la platine :</p> <p>Moment autour de l'axe fort :</p> $N_{w,fc,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} + \frac{M_{Ed,y}}{h_{fc} - t_{fc}}$ <p>Moment autour de l'axe faible :</p> $N_{w,fc,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} + \frac{M_{Ed,z}}{0,5 \cdot b_{fc}}$ <p style="text-align: center;">-</p>	
Soudures entre les rondelles et la platine	<p>Flexion seule :</p> $M_{w,r,Rd} = a_r \cdot l_r \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \cdot Z_T \leq \frac{M_{w,Rd}}{2}$ <p>Interaction M-N avec N est traction :</p> <p>Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> $N_{wr,Rd} = a_r \cdot l_r \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq \frac{N_{Ed}}{4} + \frac{M_{Ed,y}}{2 \cdot Z_T}$	

Effort maximal transmissible en cisaillement

L'assemblage est composé de trois parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort de cisaillement maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces trois parties :

- Effort dans la direction de l'axe x : $V_{Ed,x}$ avec $V_{Rd,x} = \min(V_{fc,x,Rd}; V_{a,x,Rd}; V_{w,x,Rd})$;
- Effort dans la direction y : $V_{Ed,y}$ avec $V_{Rd,y} = \min(V_{fc,y,Rd}; V_{a,y,Rd}; V_{w,y,Rd})$.

Il ne devrait jamais être relatif à la résistance des soudures, celles-ci présentant un mode de ruine fragile.

L'évaluation de l'effort maximal transmissible est définie en tenant compte d'une éventuelle interaction N-V, M-V ou M-N-V.

7. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par la colonne

$$V_{fc,x,Rd}, V_{fc,y,Rd} \text{ ou } V_{fc,Rd}$$

Âme de la colonne	<p style="text-align: center;">Résistance en section :</p> <p style="text-align: center;"><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</i></p> <p style="text-align: center;">Sans interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,x,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_{vc,y} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,x,Rd} = V_{el,Rd} = \frac{I_y \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$</p> $S_y = b_{fc} \cdot t_{fc} \cdot \left(\frac{h_{fc} - t_{fc}}{2} \right) + t_{wc} \cdot \frac{\left(\frac{h_{fc}}{2} - t_{fc} \right)^2}{2}$ <p style="text-align: center;">Avec interaction N-V, M-V ou M-N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,x,Rd} = \frac{V_{pl,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,x,Rd} = \frac{V_{el,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">En considérant ces valeurs d'effort de cisaillement maximal transmissible, le cisaillement n'influence pas les efforts maximaux transmissibles en traction, compression et flexion.</p>	Eurocode 3 partie 1-1
Semelles de la colonne	<p style="text-align: center;">Résistance en section :</p> <p style="text-align: center;">Sans interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,y,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_{vc,x} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,y,Rd} = V_{el,Rd} = \frac{2 \cdot I_x \cdot t_{fc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$</p> $S_x = t_{fc} \cdot \frac{(b_{fc} - t_{wc})^2}{4} + h_{fc} \cdot \frac{t_{wc}^2}{8}$ <p style="text-align: center;">Avec interaction N-V, M-V ou M-N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,y,Rd} = \frac{V_{pl,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,y,Rd} = \frac{V_{el,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">En considérant ces valeurs d'effort de cisaillement maximal transmissible, le cisaillement n'influence pas les efforts maximaux transmissibles en traction, compression et flexion.</p>	Eurocode 3 partie 1-1

8. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par l'assemblage boulonné

$$V_{a,x,Rd}, V_{a,y,Rd} \text{ ou } V_{a,Rd}$$

Les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Si l'effort axial est nul ou de traction :
 - Pour la solution de base et la variante 3 : colonne, platine d'extrémité, rondelles, tiges, béton ;
 - Variante 1 : colonne, platine d'extrémité, tiges, béton ;
 - Variante 2 : colonne, platine d'extrémité, bêche, béton ;
- Effort axial de compression : si les effets de frottement ne permettent pas de reprendre l'entièreté de l'effort de cisaillement, avec la solution de base et la variante 3, il faudra utiliser une bêche pour reprendre le reliquat d'effort et pour la variante 1, les tiges le reprendront.
 - Effets de frottement suffisants : la colonne, la platine, le béton ;
 - Effets de frottement insuffisants :
Pour la solution de base et les variantes 2 et 3 : colonne, platine d'extrémité, bêche, béton ;
Variante 1 : colonne, platine d'extrémité, tiges, béton.

Si l'effort axial est un effort de compression, l'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné vaut :

- Effort selon x :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd}$;
 - Frottement + bêche (variante 2, solution de base avec bêche et variante 3 avec bêche) :
 $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} + V_{Rd,x,n}$;
 - Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} + 4 \cdot V_{b,Rd}$;
- Effort selon y :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd}$;
 - Frottement + bêche (variante 2, solution de base avec bêche et variante 3, utilisées avec une bêche) :
 $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} + V_{Rd,y,n}$;
- Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) : $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} + 4 \cdot V_{b,Rd}$ Effort selon x et y :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$ et $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$;
 - Frottement + bêche (variante 2 ou solution de base et variante 3, utilisées avec une bêche) :
 $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) + V_{Rd,x,n}$ et $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) + V_{Rd,y,n}$;
 - Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) :
 $V_{a,Rd,x} = (V_{f,Rd} + 4 \cdot V_{b,Rd}) \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$ et $V_{a,Rd,y} = (V_{f,Rd} + 4 \cdot V_{b,Rd}) \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$.

Si l'effort axial est nul ou un effort de traction, l'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné vaut :

- Effort selon x :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,x} = V_{Rd,x,n}$;
 - Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1 et 3) : $V_{a,Rd,x} = 4 \cdot V_{b,Rd}$;
- Effort selon y :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,y} = V_{Rd,y,n}$;
 - Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1 et 3) : $V_{a,Rd,y} = 4 \cdot V_{b,Rd}$;
- Effort selon x et y :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,x} = V_{Rd,x,n}$ et $V_{a,Rd,y} = V_{Rd,y,n}$;

- Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1 et 3) :

$$V_{a,Rd,x} = 4 \cdot V_{b,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \text{ et } V_{a,Rd,y} = V_{b,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right).$$

Remarque : la détermination de l'effort maximal transmissible ne tient pas compte de la résistance à la pression diamétrale des rondelles ou de la platine d'extrémité. Les dimensions données aux éléments sont suffisantes afin que ce mode de ruine ne soit jamais critique.

d. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par frottement $V_{f,Rd}$

Béton - Platine	Résistance par frottement : $V_{f,Rd} = C_{fd} \cdot N_{Ed} $ avec $C_{fd} = 0,2$	Eurocode 3 partie 1-8
--------------------	---	--------------------------

e. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par la bêche $V_{n,Rd}$

Le critère suivant d'interaction doit être satisfait :

$$\frac{V_{Ed,x,n}}{V_{Rd,x,n}} + \frac{V_{Ed,y,n}}{V_{Rd,y,n}} \leq 1 \text{ avec}$$

Si l'effort axial est nul ou de traction

$$V_{Ed,x,n} = V_{Ed,x}$$

$$V_{Ed,y,n} = V_{Ed,y}$$

Si l'effort axial est de compression :

$$V_{Ed,x,n} = \sin\left(\arctan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$$

$$V_{Ed,y,n} = \cos\left(\arctan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$$

$$V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,x}^2 + V_{Ed,y}^2}$$

L'effort maximal transmissible par la bêche est donné par :

$$V_{Rd,x,n} = \min(V_{cn,x,Rd}; V_{wn,x,Rd})$$

$$V_{Rd,y,n} = \min(V_{cn,y,Rd}; V_{fn,y,Rd})$$

Remarque : le moment créé par la pression du béton est négligé.

Le livre du CTICM recommande des dimensions minimales pour la bêche :

$$60\text{mm} \leq L_{eff,n} \leq 1,5 \cdot h_n$$

$$L_{eff,n} = L_n - e_m$$

$$h_{n,max} = 0,4 \cdot h_{fc}$$

$$b_{n,max} = 20 \cdot t_{fn}$$

Âme de la bêche	Résistance au cisaillement : Section de classe 1 ou 2 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{A_{vn,y} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$ Section de classe 3 ou 4 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{I_{yn} \cdot t_{wn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$ $S_y = b_n \cdot t_{fn} \cdot \left(\frac{h_n - t_{fn}}{2}\right) + t_{wn} \cdot \frac{(\frac{h_n}{2} - t_{fn})^2}{2}$	Livre du CTICM
Semelles de la bêche	Résistance au cisaillement : Section de classe 1 ou 2 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{A_{vn,x} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$ Section de classe 3 ou 4 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{2 \cdot I_{xn} \cdot t_{fn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$ $S_x = t_{fn} \cdot \frac{(b_n - t_{wn})^2}{4} + h_n \cdot \frac{t_{wn}^2}{8}$	Livre du CTICM
Béton	Résistance à la pression localisée due aux semelles de la bêche : $V_{cn,x,Rd} = f_{cd} \cdot b_n \cdot L_{eff,n}$ $V_{cn,y,Rd} = \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot (h_n - 2 \cdot t_{fc}) \cdot L_{eff,n}$	Livre du CTICM

f. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par les tiges $V_{b,Rd}$		
	$V_{b,Rd} = \min (V_{b,v,Rd}; V_{b,l,Rd})$	
Tiges	<p>Résistance au cisaillement :</p> $V_{b,v,Rd} = \min (V_{b1,v,Rd}; V_{b,v2,Rd})$ $V_{b1,v,Rd} = 4 \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_v = 0,6$ $V_{b,v2,Rd} = 4 \cdot \frac{\alpha_b \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_b = 0,44 - 0,0003 \cdot f_{yb}$ <p><i>Remarque : les formules ci-après sont identiques dans le cas d'un moment de flexion appliqué autour de l'axe faible.</i></p> <p>Interaction N-V, avec N en traction :</p> $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot 4 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$ <p>Interaction M-V :</p> $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{\frac{M_{Ed,y}}{z_T}}{1,4 \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$ <p>Interaction M-N-V :</p> <p>Assemblage complètement tendu :</p> $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{\frac{N_{Ed} + \frac{M_{Ed,y}}{z_T}}{2}}{1,4 \cdot 4 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$ <p>Assemblage partiellement tendu :</p> $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed} + \frac{M_{Ed,y}}{z_T}}{1,4 \cdot 2 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
	Rondelles	<p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> <p>Résistance à la pression diamétrale :</p> $V_{r,Rd} = 4 \cdot \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{ur} \cdot d_b \cdot t_r}{\gamma_{M2}} \leq V$ $V = \begin{cases} V_{a,Rd,x} \\ V_{a,Rd,y} \\ \sqrt{V_{a,Rd,x}^2 + V_{a,Rd,y}^2} \end{cases}$ $k_1 = \min (2,5; 1,4 \cdot \frac{e_d}{d_{b,r}} - 1,7)$ $\alpha_b = \min \left(\frac{f_{ub}}{f_{ur}}; 1 \right)$
Platine	<p>Variante 1 :</p> <p>Les mêmes formules que pour les rondelles sont utilisées, en prenant les caractéristiques de la platine pour $V_{r,Rd}$.</p>	

9. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par les soudures $V_{w,x,Rd}$ et/ou $V_{w,y,Rd}$		
<p>Frottement seul ou frottement + cisaillement des tiges :</p> $V_{w,x,Rd} = V_{w,wc,Rd}$ $V_{w,y,Rd} = V_{w,fc,Rd}$ <p>Frottement + bêteche :</p> $V_{w,x,Rd} = \min (V_{w,wc,Rd}; V_{w,wn,Rd})$ $V_{w,y,Rd} = \min (V_{w,fc,Rd}; V_{w,fn,Rd})$		
<p>Soudures entre la platine d'extrémité et la colonne</p>	<p><i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i></p> <p style="text-align: center;">Cisaillement seul :</p> <p>$V_{w,wc,Rd}$ = la résistance des soudures entre l'âme de la colonne et la platine d'extrémité</p> <p>$V_{w,fc,Rd}$ = la résistance des soudures entre les semelles de la colonne et la platine d'extrémité</p> <p style="text-align: center;">La résistance des soudures est donnée par :</p> $V_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p> <p style="text-align: center;">Interaction N-V :</p> <p><i>Hypothèse : la contribution des soudures entre les raidisseurs et la platine sont négligées.</i></p> <p>Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p style="text-align: center;">Soudures entre la platine et l'âme du poteau :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{wc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{A_{fc} - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{wc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,x}}{l_{wc}}$ <p style="text-align: center;">Soudures entre la platine et les semelles du poteau :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{fc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{fc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,y}}{l_{fc}}$ <p style="text-align: center;">Interaction M-N-V, si nécessaire :</p> <p><i>Hypothèse : les soudures sous les semelles résistent seules à l'effort de flexion et les soudures entre les raidisseurs et la platine sont négligées.</i></p> <p>Les formules ci-dessous sont similaires si le moment est appliqué autour de l'axe faible.</p> <p>Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p style="text-align: center;">Soudures entre la platine et l'âme du poteau :</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p>

	$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{wc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{A_{fc} - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{wc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,x}}{l_{wc}}$ <p>Soudures entre la platine et les semelles du poteau :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{fc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} + \frac{M_{Ed,y}}{h_{fc} - t_{fc}}) \cdot \frac{1}{l_{fc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,y}}{l_{fc}}$	
Soudures entre la platine d'extrémité et la bêche	<p>$V_{w,wn,Rd}$ = la résistance des soudures entre l'âme de la bêche et la platine d'extrémité</p> <p>$V_{w,fn,Rd}$, la résistance des soudures entre les semelles de la bêche et la platine d'extrémité</p>	
Soudures entre la platine d'extrémité et les rondelles	<p>Cisaillement seule :</p> $V_{w,r,Rd} \leq \frac{V}{4}$ $V = \begin{cases} V_{w,x,Rd} \\ V_{w,y,Rd} \\ \sqrt{V_{w,x,Rd}^2 + V_{w,y,Rd}^2} \end{cases}$ <p>$V_{w,r,Rd}$, la résistance des soudures entre les rondelles et la platine d'extrémité</p> <p>Interaction N-V avec N en traction :</p> <p>Si le critère suivant est vérifié, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_r \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{N_{Ed}}{4} \cdot \frac{1}{l_r}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed}}{4 \cdot l_r}$ <p>Interaction M-N-V avec N en traction :</p> <p>Si le critère suivant est vérifié, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_r \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{N_{Ed}}{4} + \frac{M_{Ed,y}}{2 \cdot z_T} \right) \cdot \frac{1}{l_r}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed}}{4 \cdot l_r}$	Eurocode 3 partie 1-8

Annexe 4 : Feuille de calcul – Solution encastrée 2

Feuille de calcul : *Assemblage encastré avec 8 tiges d'ancrage*

Note d'utilisation :

Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage présentées ci-après. Elle fournit les efforts maximaux auxquels l'assemblage peut être soumis en fonction des caractéristiques de l'assemblage imposées.

Pour cela, dans un premier temps, l'utilisateur doit choisir la configuration qu'il étudie.

Dans un second temps, toutes les données nécessaires au dimensionnement sont définies.

Enfin, les efforts maximaux transmissibles (efforts de compression, de traction, de flexion et de cisaillement) sont déterminés à l'aide de règles provenant de documents de référence sur les pieds de poteaux. Ce dimensionnement repose sur la méthode des composantes.

Configurations prises en compte

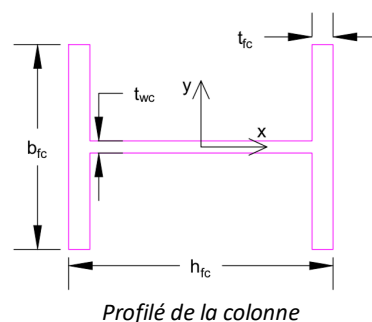
Cette feuille de calcul permet de dimensionner les solutions d'assemblage de pieds de poteaux (en I ou H) encastrés avec huit tiges d'ancrage.

Quatre variantes possibles sont prises en compte :

- Tiges droites avec ou sans plat d'ancrage ;
- Une bêche en I parallèle au profilé de la colonne ;
- Des raidisseurs dans le prolongement des semelles.

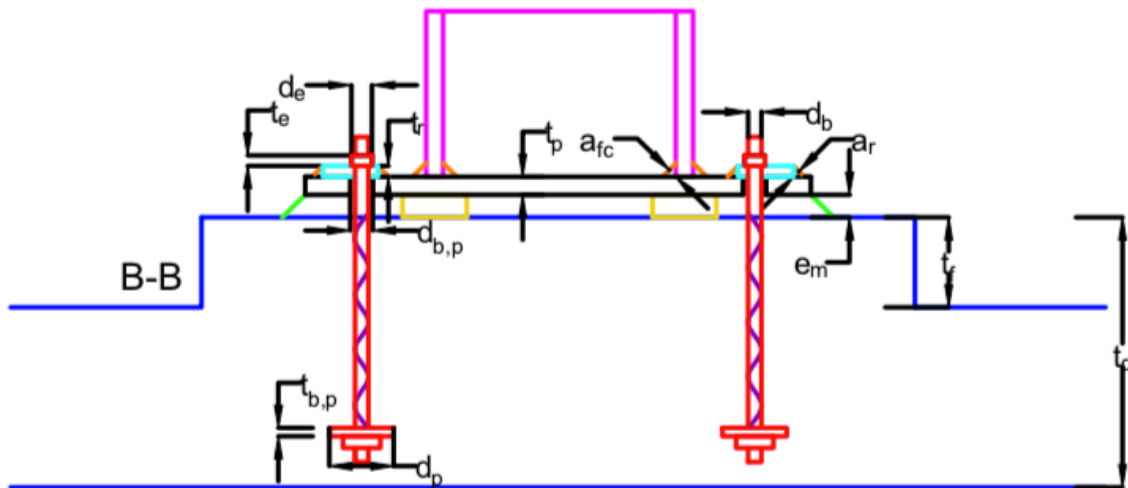
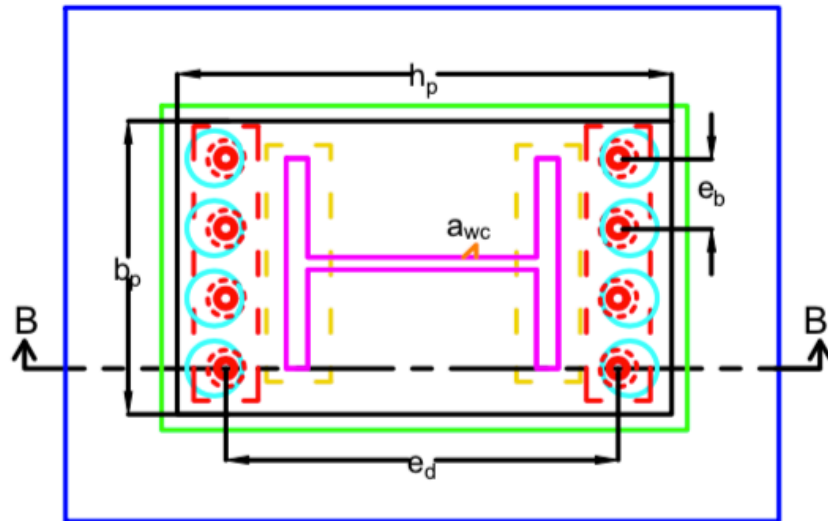
Celles-ci sont présentées sur les figures des pages suivantes.

Remarque : la feuille de calcul est réalisée en considérant les variantes individuellement. Néanmoins, en utilisant les règles définies de façon adéquate, celles-ci peuvent être combinées.



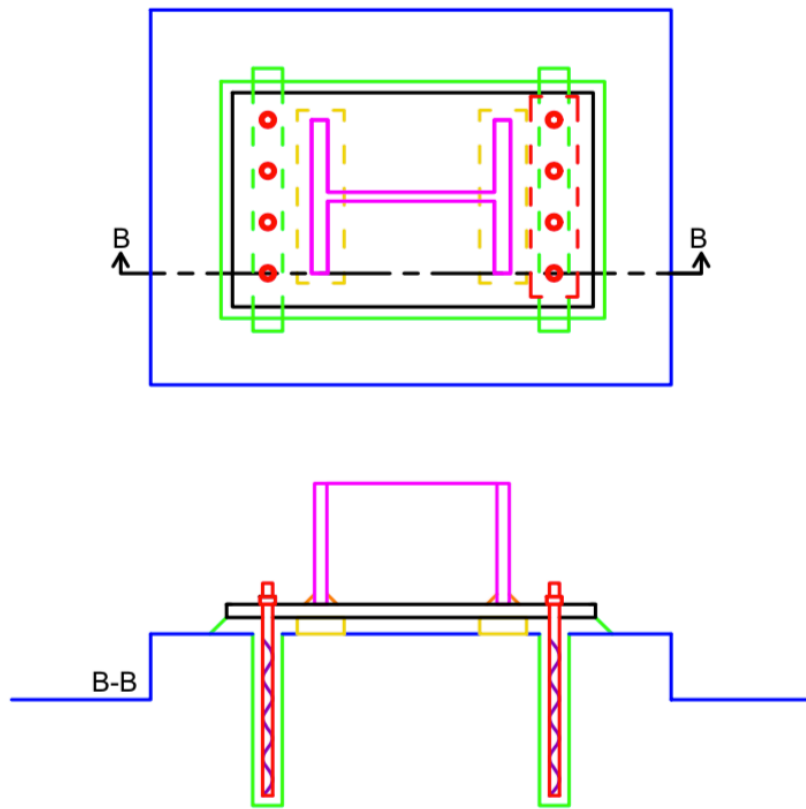
Profilé de la colonne

Solution de base



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo

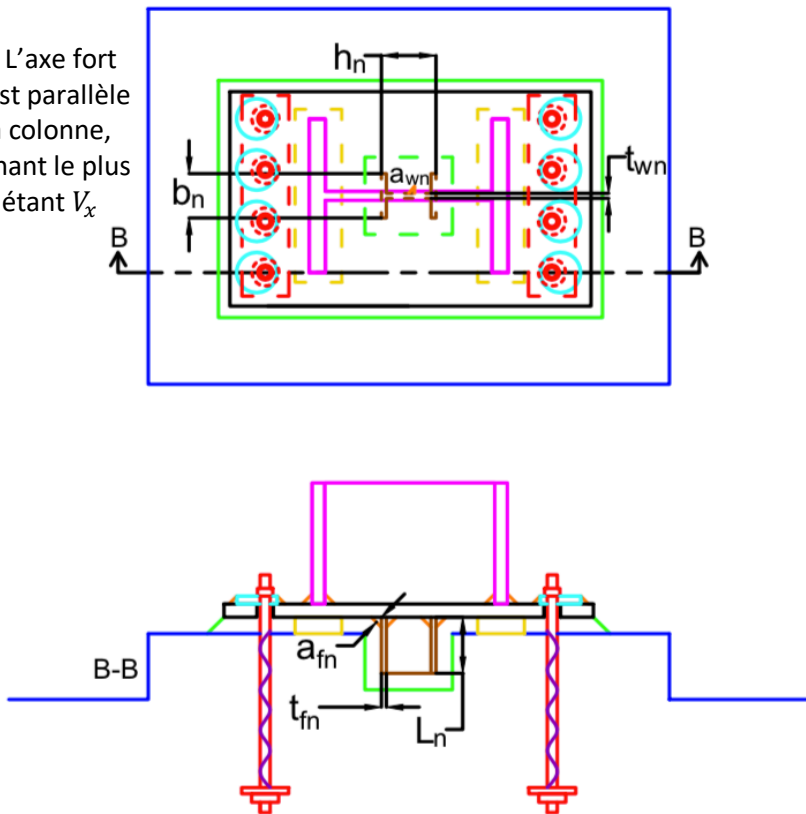
Variante 1 : Tiges droites non-précellées



Légende - Poteau, platine, tiges, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo

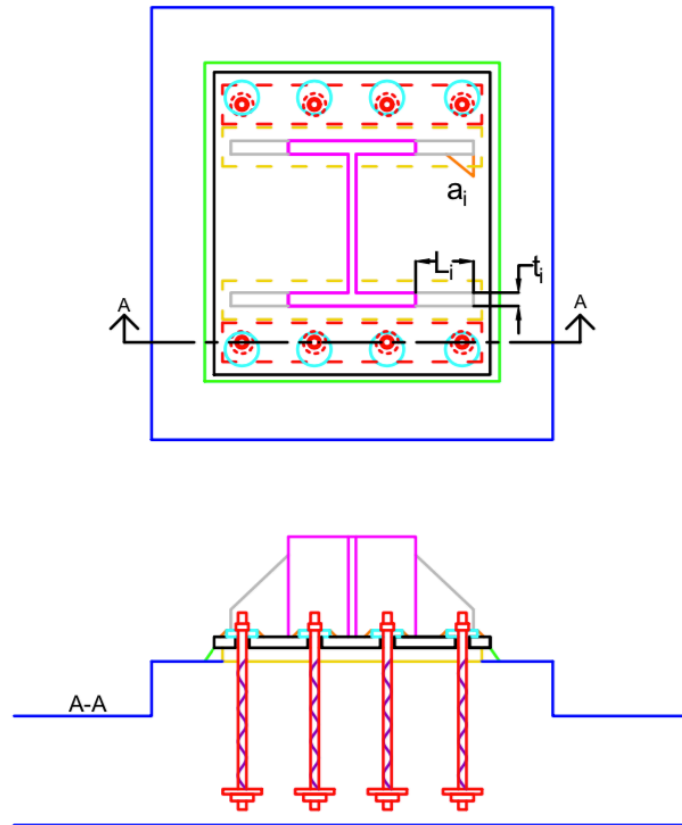
Variante 2 : Bêche

Hypothèse : L'axe fort de la bêche est parallèle à celui de la colonne, l'effort tranchant le plus important étant V_x



Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, bêche

Variante 3 : Raidisseurs

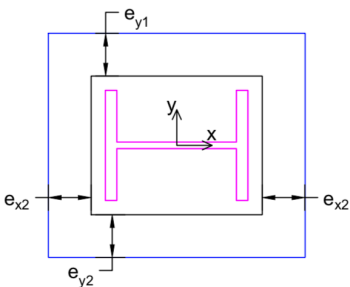


Légende - Poteau, platine, tiges, rondelles, soudures, béton de scellement, béton, cales de réglage, bande Denzo, raidisseurs

Définition des données	
Efforts appliqués	
N_{Ed}	Effort normal de traction ou de compression
$V_{x,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe x
$V_{y,Ed}$	Effort tranchant appliqué suivant l'axe y
$M_{y,Ed}$ ou $M_{x,Ed}$	Moment de flexion autour de l'axe y-y ou x-x (La bi-flexion n'est pas prise en compte dans cette feuille de calcul)

Coefficients partiels de sécurité		
γ_{M0}	Coefficient partiel pour la résistance des sections en acier, pris égal à 1	EN 1993-1-1
γ_C	Coefficient partiel pour le béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{M2}	Coefficient partiel pour les assemblages par soudure, pris égal à 1,25 Coefficient partiel pour les boulons, pris égal à 1,25	EN 1993-1-8
γ_{MC}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par cône de béton, de rupture du bord du béton, de rupture par éclatement du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4
γ_{Msp}	Coefficient partiel pour les modes de rupture par fendage du béton, pris égal à 1,5	EN 1992-4

Caractéristiques des composantes		
Colonne		
f_{yc}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay: S235, S275 ou S355
E	Module de Young	
/	Profilé	Choix imposés par Solvay : IPE, HEA, HEB ou reconstitué
b_{fc}	Largeur du profilé	Solvay impose une valeur maximale de 400mm
h_{fc}	Hauteur du profilé	Solvay impose une valeur comprise entre 140 et 1000mm
t_{fc}	Épaisseur des semelles	Solvay impose une valeur maximale de 40mm
t_{wc}	Épaisseur de l'âme	Solvay impose une valeur maximale de 25mm
r	Congé de raccordement	
A_{fc}	Aire de la section	
I_y	Inertie selon l'axe y-y	
I_x	Inertie selon l'axe x-x	
$A_{vc,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vc,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
a_{wc}	Gorge des soudures entre l'âme et la platine	De façon sécuritaire, vu les nuances d'acier imposées, Solvay considère que si la gorge des soudures a est supérieure à la moitié de l'épaisseur d'un des deux éléments à assembler, la soudure est une soudure à pleine pénétration. Cette remarque est valable pour toutes les soudures réalisées.
a_{fc}	Gorge des soudures entre les semelles et la platine	
l_{wc}	Longueur des soudures entre l'âme et la platine	
l_{fc}	Longueur des soudures entre une semelle et la platine	

Platine			
f_{yp}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355	
b_p	Largeur		
h_p	Hauteur		
t_p	Épaisseur	Solvay impose une valeur maximale de 40mm	
$d_{b,p}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose des valeurs en fonction du diamètre du boulon : M12: 54mm, M16: 58mm, M20: 62mm, M22: 64mm, M24: 66mm, M27: 69mm, M30: 73mm	
Béton			
Hypothèse : Les caractéristiques mécaniques du mortier de scellement sont identiques à celles du béton de la fondation.			
f_{ck}	Résistance caractéristique du béton	Choix imposés par Solvay : C25/30 ou C30/37	
e_m	Épaisseur du mortier de scellement	Solvay impose une valeur comprise entre 30 et 50mm. Ces valeurs tiennent compte d'une tolérance d'exécution de 20mm. Dans les calculs, on tiendra souvent compte de l'épaisseur minimale, soit 30mm.	
t_f	Épaisseur de la rehausse	Solvay impose une valeur minimale de 200mm	
t_c	Épaisseur de la fondation (rehausse comprise)		
e_{x1}	Dimensions en plan de la rehausse 		
e_{x2}			
e_{y1}			
e_{y2}			
Légende – Colonne, platine, rehausse			
β_j		Coefficient du matériau de scellement, pris égal à 2/3	EN 1993-1-8
Tiges : boulons et écrous			
f_{yb}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : 5.6 avec $f_{yb} = 300MPa$ ou 8.8 avec $f_{yb} = 640MPa$	
/	Type de tiges	Droites ou avec plat	
e_b	Distance entre 2 tiges d'une même rangée	Hypothèse : cet espacement est identique partout.	
e_a	Distance entre 2 rangées de tiges		
d_b	Diamètre d'un boulon	Choix imposés par Solvay : M12, M16, M20, M22, M24, M27, M30	
d_p	Diamètre du plat d'ancrage		
$t_{b,p}$	Épaisseur du plat d'ancrage		
A_s	Aire résistante du boulon		
t_e	Épaisseur de l'écrou		
d_e	Diamètre extérieur de l'écrou		

Rondelles		
f_{yr}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235 ou S355
t_r	Épaisseur d'une rondelle	Solvay impose des épaisseurs standards pour les rondelles en fonction du diamètre du boulon et de la nuance d'acier de la rondelle.
a_r	Gorge des soudures entre une rondelle et la platine	
l_r	Longueur des soudures entre une rondelle et la platine	
$d_{b,r}$	Diamètre du trou des boulons	Solvay impose un diamètre égal à celui du boulon augmenté de 2mm pour les boulons M12 à M27 et de 3mm pour les boulons M30.
Raidisseurs		
b_i	Longueur d'un raidisseur	
t_i	Épaisseur d'un raidisseur	Lorsque les raidisseurs sont soumis à un effort de compression, ils ne voilent pas si : $t_i \geq \frac{L_i}{25}$ (Livre d'Yvon Lescouarc'h sur les pieds de poteaux articulés)
f_{yi}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
a_i	Gorge des soudures entre un raidisseur et la platine	
l_i	Longueur des soudures entre un raidisseur et la platine	
Bêche (Profilé en I ou H)		
f_{yn}	Nuance de l'acier	Choix imposés par Solvay : S235, S275 ou S355
h_n	Hauteur du profilé	
b_n	Largeur du profilé	
L_n	Profondeur totale de la bêche	
t_{fn}	Épaisseur des semelles	
t_{wn}	Épaisseur de l'âme	
$A_{vn,y}$	Aire cisailée selon l'axe y-y	
$A_{vn,x}$	Aire cisailée selon l'axe x-x	
$I_{y,n}$	Inertie selon l'axe y-y	
$I_{x,n}$	Inertie selon l'axe x-x	
a_{fn}	Gorge des soudures entre les semelles et la platine	
a_{wn}	Gorge des soudures entre l'âme et la platine	
l_{fn}	Longueur des soudures entre une semelle et la platine	
l_{wn}	Longueur des soudures entre l'âme et la platine	

Effort maximal transmissible en compression

Les composantes actives sont :

- Solution de base et variantes 1 et 2 : colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, béton de fondation ;
- Variante 3 : colonne, raidisseurs, soudures entre la platine d'extrémité et la colonne et entre la platine et les raidisseurs, platine d'extrémité, béton de fondation.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal en compression pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties :

- Compression seule : $N_{C,Rd} = \min (N_{C,fc,Rd}; N_{C,a,Rd}; N_{C,w,Rd})$;
- Combinaison M-N : $N_{C,Rd} = \min (N_{C,fc,Rd}; N_{C,a,Rd}; N_{C,w,Rd}; N_{M-C,fc,Rd}; N_{M-C,a,Rd}; N_{M-C,w,Rd})$.

Il ne devrait jamais être relatif à $N_{C,w,Rd}$ ou $N_{M-C,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

$N_{M-C,fc,Rd}, N_{M-C,a,Rd}, N_{M-C,w,Rd}$ sont déterminés dans la section relative à la flexion.

Remarque : ci-dessous, on détermine la résistance de l'assemblage en traction seule. Pour tenir compte de l'interaction M-N, il faut se référer à la section dédiée à la flexion.

9. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{C,fc,Rd}$

$$N_{C,fc,Rd} = \min (N_{C,fcw,Rd}; N_{C,Rd})$$

Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.

Résistance de calcul à la compression de la semelle et de l'âme de la colonne combinées :

$$N_{C,fcw,Rd} = \frac{M_{C,Rd}}{h_{fc} - t_{fc}}$$

$M_{C,Rd}$ = moment résistant de calcul de la section transversale

Résistance en section du poteau :

$$N_{C,Rd} = \begin{cases} \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 1, 2 ou 3} \\ \frac{A_{eff} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{si classe 4} \end{cases}$$

A_{eff} = Aire de la section efficace

Eurocode 3
partie 1-8

Eurocode 3
partie 1-1

10. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{C,a,Rd}$

Lors de la transmission d'un effort de compression, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Pour la solution de base et les variantes 1 et 2 : la colonne, la platine et le béton ;
- Pour la variante 3 : la colonne, les raidisseurs, la platine et le béton.

Ces composantes forment ensemble des tronçons en T-équivalents.

Solution de base et variantes 1 et 2 : $N_{C,a,Rd} = F_{c,1,Rd} + F_{c,2,Rd}$

Résistance à la pression localisée du béton :

$$f_{jd} = \beta_j \cdot \alpha_{bf} \cdot f_{cd}$$

$$\alpha_{bf} = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}}$$

Aire maximale de diffusion :

$$A_{c1} = \min \left\{ 9 \cdot A_{c0} \right. \\ \left. h_f \cdot b_f \right\}$$

Tronçons en T :
Colonne +
Platine +
Béton
(+ Raidisseurs)

Eurocode 3
partie 1-8

<p>Tronçons en T : Colonne + Platine + Béton (+ Raidisseurs)</p>	<p>Hauteur de la rehausse (dimension en plan) : $h_f = h_p + e_{x1} + e_{x2}$</p> <p>Largeur de la rehausse : $b_f = b_p + e_{y1} + e_{y2}$</p> <p>Aire chargée : $A_{c0} = b_p \cdot h_p$</p> <p>Résistance de calcul du béton à la compression :</p> $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$ <p>Résistance des tronçons en T sous les semelles du profilé :</p> $F_{c,1,Rd} = 2 \cdot \min (F_{c,f_{jd},Rd}; F_{c,Rd})$ <p>Résistance à la pression localisée sous une semelle :</p> $F_{c,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$ $l_{eff} = \begin{cases} b_p & \text{si } c > \frac{b_p - b_{fc}}{2} \\ b_{fc} + 2 \cdot c & \end{cases}$ <p>Largeur additionnelle : $c = t_p \cdot \sqrt{\frac{f_{yp}}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}}$</p> $b_{eff} = \begin{cases} \frac{h_p - h_{fc}}{2} + t_{fc} + c & \text{si } c > \frac{h_p - h_{fc}}{2} \\ t_{fc} + 2 \cdot c & \end{cases}$ <p>Résistance en compression de la semelle :</p> $F_{c,Rd} = \frac{b_{fc} \cdot t_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$ <p>Résistance des tronçons en T sous l'âme du profilé :</p> <p><i>Remarquons que l'Eurocode néglige la contribution du tronçon sous l'âme.</i></p> $F_{c,2,Rd} = \min (F_{c,f_{jd},Rd}; F_{c,Rd})$ <p>Résistance à la pression localisée sous l'âme :</p> $F_{c,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$ $l_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \text{ (recouvrement)} \\ h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} - 2 \cdot c & \end{cases}$ <p><i>On parle de recouvrement lorsque les aires des tronçons en T sous les semelles couvrent l'entièreté de l'âme.</i></p> $b_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \\ t_{wc} + 2 \cdot c & \text{si } c < h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \text{ et } b_p > t_{wc} + 2 \cdot c \\ b_p & \text{si } c < h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} \text{ et } b_p \leq t_{wc} + 2 \cdot c \end{cases}$ <p>Résistance en compression de l'âme :</p> $F_{c,Rd} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ si recouvrement} \\ \frac{(h_{fc} - 2 \cdot t_{fc} - 2 \cdot c) \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} \end{array} \right.$	<p>Eurocode 2 partie 1-1</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Livre du CTICM</p>
	<p>Variante 3 : $N_{c,a,Rd} = F_{c,1,Rd} + F_{c,2,Rd} + F_{c,3,Rd}$</p> <p>Résistance des tronçons en T sous les raidisseurs :</p> $F_{c,4,Rd} = 2 \cdot \min (F_{c,f_{jd},Rd}; F_{c,Rd})$ <p>Résistance à la pression localisée sous un raidisseur :</p> $F_{c,f_{jd},Rd} = l_{eff} \cdot b_{eff} \cdot f_{jd}$ $l_{eff} = \begin{cases} 0 & \text{si } c \geq b_i \text{ (recouvrement)} \\ b_i & \text{si } c \leq \frac{h_p - (h_{fc} + b_i)}{2} \\ \frac{h_p - h_{fc}}{2} - c & \text{si } c > \frac{h_p - (h_{fc} + b_i)}{2} \end{cases}$	

	$b_{eff} = \min \begin{cases} t_i + 2 \cdot c \\ b_p \end{cases}$ <p>Résistance en compression des raidisseurs :</p> $F_{c,Rd} = \max \begin{cases} 0 \text{ (recouvrement)} \\ \frac{(b_i - c) \cdot t_i \cdot f_{yi}}{\gamma_{M0}} \end{cases}$	
11. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{C,w,Rd}$		
Soudures entre la colonne et la platine	$N_{C,w,Rd} = N_{C,wc,Rd} + N_{C,wfc,Rd}$ <p><i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i></p> <p>$N_{C,wc,Rd}$ = Résistance des soudures entre l'âme du poteau et la platine</p> <p>$N_{C,wfc,Rd}$ = Résistance des soudures entre les semelles du poteau et la platine</p> <p>La formule générale d'évaluation de la résistance des soudures est :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	Eurocode 3 partie 1-8

Effort maximal transmissible en traction

Les composantes actives sont :

- Solution de base et variante 2 : Colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton ;
- Variante 1 : Colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, tiges, béton ;
- Variante 3 : Colonne, raidisseurs, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité et entre les raidisseurs et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort axial maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties :

- Traction seule : $N_{T,Rd} = \min(N_{T,fc,Rd}; N_{T,a,Rd}; N_{T,w,Rd})$;
 - Combinaison M-N : $N_{T,Rd} = \min(N_{T,fc,Rd}; N_{T,a,Rd}; N_{T,w,Rd}; N_{M-T,fc,Rd}; N_{M-T,a,Rd}; N_{M-T,w,Rd})$.
- Il ne devrait jamais être relatif à $N_{T,w,Rd}$ ou $N_{M-T,w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

$N_{M-T,fc,Rd}$, $N_{M-T,a,Rd}$, $N_{M-T,w,Rd}$ sont déterminés dans la section relative à la flexion.

Remarque : ci-dessous, on détermine la résistance de l'assemblage en traction seule. Pour tenir compte de l'interaction M-N, il faut se référer à la section dédiée à la flexion.

9. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par la colonne $N_{T,fc,Rd}$

$N_{T,fc,Rd} = N_{t,Rd}$
Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.

Résistance en section de la colonne :

$$N_{t,Rd} = \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

Eurocode 3
partie 1-1

10. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $N_{T,a,Rd}$

Pour la transmission de l'effort de traction, les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Pour la solution de base et variante 2 : la platine, les rondelles, les tiges, le béton.
- Pour la variante 1 : la platine, les tiges, le béton.
- Pour la variante 3 : la platine, les raidisseurs, les rondelles, les tiges, le béton.

L'effort maximal de traction, pouvant être transmis par l'assemblage boulonné, correspond à :

$$N_{T,a,Rd} = 2 \cdot F_{T,Rd} \text{ avec } F_{T,Rd} = \text{Résistance d'un tronçon en T tendu :}$$

- Effet de levier : $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$
- Sans effet de levier : $F_{T,Rd} = \min(F_{T,1-2,Rd}; F_{T,3,Rd}; F_{T,4,Rd})$

Remarque 1 :

Les modes de ruine 2 et 3 sont relatifs à la rupture en section des tiges. L'effort maximal transmissible de l'assemblage boulonné ne devrait donc pas être relatif à ceux-ci.

Remarque 2 :

L'effort maximal ne dépend ni des modes de ruines possibles des rondelles ni de ceux du béton.

Les dimensions des rondelles seront toujours choisies telles que les rondelles ne provoquent jamais la ruine de l'assemblage.

Les modes de ruine du béton sont des modes de ruine fragile à éviter à tout prix. Ainsi, les dispositions constructives sont toujours choisies telles que ces modes de ruine ne se produisent jamais.

Remarque 3 :

Les modes de rupture liés aux armatures (rupture de l'acier de l'armature et résistance à la rupture d'ancrage de l'armature) ne sont pas pris en compte dans cette feuille de calcul. Les règles de calcul qui y sont relatives se trouvent dans l'Eurocode 2 partie 4.

L'effet levier est à prendre en compte si $L_b \leq L_b^*$ (Eurocode 3 partie 1-8)

$$\text{Avec } L_b = 8 \cdot d_b + e_m + t_p + t_r + \frac{t_e}{2} \text{ et } L_b^* = \frac{4,4 \cdot m_x^3 \cdot A_s}{l_{eff,1} \cdot t_p^3}$$

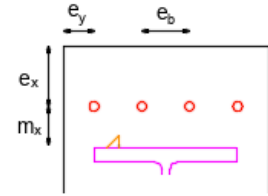
$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc})$$

Hypothèse : pour la variante 3, l'épaisseur des raidisseurs t_i est identique à celle des semelles t_{fc} et la gorge de soudure entre les semelles et la platine est identique à celle entre les raidisseurs et la platine. Ainsi, les longueurs efficaces sont identiques avec ou sans raidisseur(s).

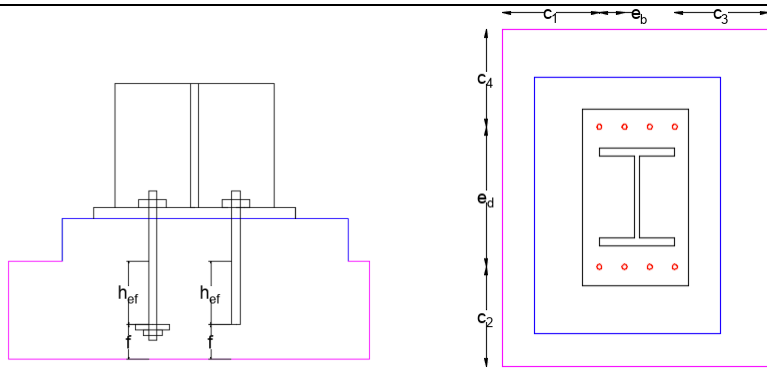
$$l_{eff,cp} = \min(4 \cdot \pi \cdot m_x; \pi \cdot m_x + 2 \cdot e_y + 2 \cdot e_b; \pi \cdot m_x + 3 \cdot e_b; 2 \cdot \pi \cdot m_x + 4 \cdot e_x)$$

$$m_x = \frac{h_p}{2} - e_x - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot a_{fc}$$

$$l_{eff,nc} = \min(8 \cdot m_x + 2,5 \cdot e_x; 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x + e_y + e_b; 2 \cdot m_x + 0,625 \cdot e_x + 1,5 \cdot e_b; 0,5 \cdot b_p)$$



Platine	<p>Résistance associée au mode de ruine 1 :</p> $F_{T,1,Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$ $M_{pl,1,Rd} = l_{eff,1} \cdot m_{pl,Rd}$ $m_{pl,Rd} = \frac{t_p^2 \cdot f_{yp}}{4 \cdot \gamma_{M0}}$ <p>Résistance associée au mode de ruine 1-2 :</p> $F_{T,1-2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,1,Rd}}{m_x}$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges - Platine	<p>Résistance associée au mode de ruine 2 :</p> $F_{T,2,Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd} + n \cdot 4 \cdot F_{t,Rd}}{m_x + n}$ $M_{pl,2,Rd} = l_{eff,2} \cdot m_{pl,Rd}$ $l_{eff,2} = l_{eff,nc}$ $n = \min(e_x; 1,25 \cdot m_x)$ $F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $k_2 = 0,9$	Eurocode 3 partie 1-8
Tiges	<p>Résistance associée au mode de ruine 3 :</p> $F_{T,3,Rd} = 4 \cdot F_{t,Rd}$	Eurocode 3 partie 1-8
e. Étude des modes de ruine à l'interface entre les tiges et le béton		
Tiges – Béton	<p>Résistance à la rupture par cône de béton :</p> $N_{Rd,c} = \frac{N_{Rk,c}}{\gamma_{Mc}} \leq N_{T,a,Rd}$ $N_{Rk,c} = N_{Rk,c}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{M,N}$ $N_{Rk,c}^0 = k_1 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot h_{ef}^{1,5}$	Eurocode 2 partie 4



Légende - Platine et profilé, rehausse, fondation, tiges

$$k_1 = \begin{cases} 7,7 \text{ béton fissuré} \\ 11 \text{ béton non fissuré} \end{cases}$$

$A_{c,N}$ = surface projetée réelle

Hypothèse : La fondation en béton est rectangulaire ou carrée.

$$A_{c,N} = \left(\min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_1) + 4 \cdot \min\left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_b}{2}\right) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_3) \right) \cdot \left(\min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_2) + 2 \cdot \min\left(0,5 \cdot s_{cr,N}; \frac{e_d}{2}\right) + \min(0,5 \cdot s_{cr,N}; c_4) \right)$$

$$s_{cr,N} = 3 \cdot h_{ef}$$

$$A_{c,N}^0 = \text{surface projetée de référence} = 2 \cdot s_{cr,N}^2$$

$$\psi_{s,N} = \psi_s \cdot \psi_c$$

$$\psi_s = \psi_{s,y} \cdot \psi_{s,x}$$

$$\psi_{s,y} = \frac{1 + \frac{e_b}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

$$\psi_{s,x} = \frac{1 + \frac{e_d}{s_{cr,N}}}{2} \leq 1$$

$$\psi_c = \psi_{c,y} \cdot \psi_{c,x}$$

$$\psi_{c,y} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_1; c_3)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$c_{cr,N} = 1,5 \cdot h_{ef}$$

$$\psi_{c,x} = 0,3 + 0,7 \cdot \frac{\min(c_2; c_4)}{c_{cr,N}} \leq 1$$

$$\psi_{re,N} = 0,5 + \frac{h_{ef}}{200} \leq 1$$

$$\psi_{ec,N} = 1$$

$$\psi_{M,N} = \begin{cases} 2 - \frac{z}{1,5 \cdot h_{eff}} \geq 1 \text{ s'il existe un moment de flexion} \\ 1 \text{ sinon} \end{cases}$$

z, bras de levier déterminé dans la section relative à la recherche de l'effort maximal transmissible en flexion

Résistance à la rupture par fendage du béton :

$$\text{Sinon } N_{Rd,sp} = \frac{N_{Rk,sp}}{\gamma_{Msp}} \leq N_{T,a,Rd}$$

Livre du CTICM

	<p>L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si ces deux conditions sont satisfaites :</p> $\begin{cases} c \geq c_{cr,sp} \\ t_c - t_f \geq h_{min} \end{cases}$ $c = \min(c_1; c_2; c_3; c_4)$ <p>$c_{cr,sp}$ = distance au bord caractéristique en cas de fendage sous charge, obtenue dans la spécification technique du produit</p> <p>h_{min} = épaisseur minimale autorisée pour l'élément en béton, obtenue dans la spécification technique du produit</p> $N_{Rk,sp} = N_{Rk,sp}^0 \cdot \frac{A_{c,N}}{A_{c,N}^0} \cdot \psi_{s,N} \cdot \psi_{re,N} \cdot \psi_{ec,N} \cdot \psi_{h,sp}$ $N_{Rk,sp}^0 = \min(N_{Rk,p}; N_{Rk,c}^0)$ <p>$N_{Rk,p} = 0N$ car pas de résistance à l'adhérence vu l'utilisation de bande DENZO</p> <p>$A_{c,N}, A_{c,N}^0, \psi_{s,N}, \psi_{re,N}, \psi_{ec,N} \rightarrow$ Idem que pour le calcul de la résistance à la rupture par cône de béton mais en utilisant $s_{cr,sp}$ et</p> $s_{cr,sp} = 2 \cdot c_{cr,sp}$ $\psi_{h,sp} = \left(\frac{t_d}{h_{min}}\right)^{\frac{2}{3}} \leq \max\left(1; \left(\frac{h_{eff}+1,5 \cdot c}{h_{min}}\right)^{\frac{2}{3}}\right) \leq 2$ $c = \min(c_1; c_3)$ <p>Résistance à la rupture par éclatement du béton :</p> $N_{Rd,cb} = N_{Rd,i,cb} \leq \frac{N_{T,a,Rd}}{4}$ <p>Cette résistance est évaluée pour chaque bord en considérant la tige la plus proche du bord étudié.</p> <p>L'évaluation de cette résistance n'est pas nécessaire si $c_i > 0,5 \cdot h_{eff}$</p> $N_{Rk,i,cb} = N_{Rk,i,cb}^0 \cdot \frac{A_{c,i,Nb}}{A_{c,i,Nb}^0} \cdot \psi_{s,i,Nb} \cdot \psi_{g,i,Nb} \cdot \psi_{ec,Nb}$ $N_{Rk,i,cb}^0 = k_5 \cdot c_i \cdot \sqrt{A_h} \cdot \sqrt{f_{ck}} \text{ avec } c_i \leq 0,5 \cdot h_{eff}$ $k_5 = \begin{cases} 8,5 & \text{si béton fissuré} \\ 12,2 & \text{si béton non fissuré} \end{cases}$ $A_h = \frac{\pi}{4} \cdot (d_e^2 - d_b^2)$ <p>$A_{c,i,Nb}$ = surface projetée réelle</p> <p>Si $c_i = c_1$ ou c_3, $A_{c,i,Nb} = (\min(c_2; 2 \cdot c_i) + \min(c_4; 2 \cdot c_i) + \min(e_d; 4 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$</p> <p>Si $c_i = c_2$ ou c_4, $A_{c,i,Nb} = (\min(c_1; 2 \cdot c_i) + 3 \cdot \min(e_b; 4 \cdot c_i) + \min(c_3; 2 \cdot c_i)) \cdot (\min(h_{eff}; 2 \cdot c_i) + \min(f; 2 \cdot c_i))$</p> $A_{c,i,Nb}^0 = (4 \cdot c_i)^2$ $\psi_{g,i,Nb} = \sqrt{n} + (1 - \sqrt{n}) \cdot \frac{e_i}{4 \cdot c_i}$ $\psi_{s,Nb} = 0,7 + 0,3 \cdot \frac{c_j}{2 \cdot c_i} \leq 1$ $c_j = \begin{cases} \min(c_2; c_4) & \text{si } c_i = c_1 \text{ ou } c_3 \\ \min(c_1; c_3) & \text{si } c_i = c_2 \text{ ou } c_4 \end{cases}$ $\psi_{ec,Nb} = 1$	
f. Étude des rondelles		
Rondelles	<p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $F_{T,r,Rd} = \min(B_{r,Rd}; F_{t,pl,Rd}) \leq N_{T,a,Rd}$	

	<p>Résistance au poinçonnement :</p> $B_{r,Rd} = 8 \cdot \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_r \cdot f_{ur}}{\gamma_{M2}}$ <p>d_m=moyenne entre surangle et surplat de la tête de boulon ou de l'écrou, en prenant la plus petite</p> <p>Résistance à la flexion due aux écrous :</p> $F_{t,pl,Rd} = 8 \cdot \frac{\pi \cdot t_r \cdot f_{yr}}{2 \cdot \gamma_{M0}}$ <p>Ce mode de ruine n'est pas à considérer si :</p> $d_{b,p} \leq d_e \text{ ou } d_{b,p} > d_e \text{ et } t_r > \frac{d_{b,p} + d_e}{2}$ <p>Au vu des dimensions standards imposées par Solvay, cette résistance n'est généralement pas à prendre en compte.</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p> <p>Article du CTICM</p>
1. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par les soudures $N_{T,w,Rd}$		
$N_{T,w,Rd} = N_{T,wf,Rd}$		
<p>Soudures entre la platine d'extrémité et la colonne</p>	<p><i>Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</i></p> $N_{T,wf,Rd} = N_{T,wc,Rd} + N_{T,wfc,Rd}$ <p>$N_{T,wc,Rd}$=Résistance des soudures entre l'âme du poteau et la platine</p> <p>$N_{T,wfc,Rd}$=Résistance des soudures entre les semelles du poteau et la platine</p> <p>La résistance des soudures est donnée par :</p> $N_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ <p>On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler</p> <p>β_w=facteur de corrélation pour les soudures d'angle</p> <p>f_u=résistance à la traction des aciers laminés à chaud (Eurocode 3 partie 1-1)</p>	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>
<p>Soudures entre les rondelles et la platine d'extrémité</p>	<p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $N_{T,wr,Rd} \leq \frac{N_{T,w,Rd}}{8}$ <p>$N_{T,wr,Rd}$= Résistance des soudures entre une rondelle et la platine</p>	

Effort maximal transmissible en flexion

Les composantes actives dépendent du cas de répartition des efforts :

- Si l'assemblage est partiellement ou totalement comprimé : Les composantes sont identiques aux composantes actives en compression seule ;
- Si l'assemblage est totalement tendu : Idem que pour la traction seule ;
- Si l'assemblage est partiellement tendu et partiellement comprimé :
 - Solution de base et variante 2 : colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton ;
 - Variante 1 : colonne, soudures entre la colonne et la platine d'extrémité, platine d'extrémité, tiges, béton ;
 - Variante 3 : colonne, raidisseurs, soudures entre la platine d'extrémité et la colonne et entre les raidisseurs et la platine, platine d'extrémité, soudures entre la platine et les rondelles, rondelles, tiges, béton.

L'assemblage est composé de 3 parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort de flexion maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces 3 parties : $M_{Rd} = \min (M_{fc,Rd}; M_{a,Rd}; M_{w,Rd})$.

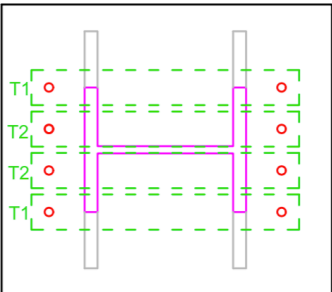
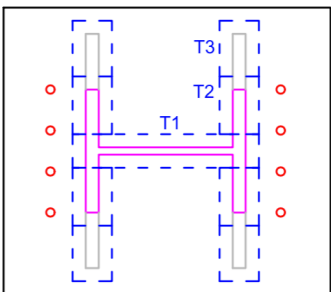
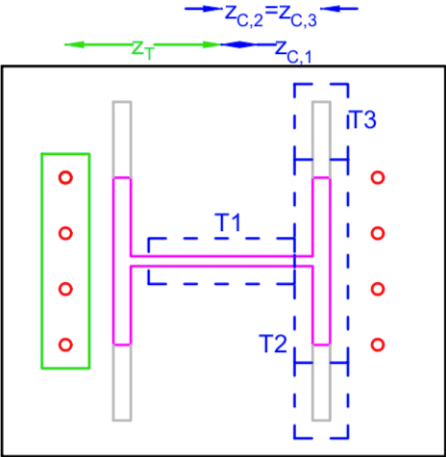
Il ne devrait jamais être relatif à $M_{w,Rd}$, les soudures présentant un mode de ruine fragile.

Remarque 1 : L'assemblage peut être soumis à un effort de flexion autour d'un seul de ses deux axes principaux. La bi-flexion n'est pas prise en compte dans le cadre de cette feuille de calcul.

Remarque 2 : Ci-dessous, l'effort axial maximal transmissible dans le cas d'une combinaison M-N est également déterminé pour chacune des trois parties principales de l'assemblage.

4. Évaluation du moment de flexion maximal transmissible par la colonne $M_{fc,Rd}$

Colonne	<p style="text-align: center;">En flexion seule : $M_{fc,Rd} = M_{c,Rd}$</p> <p>En flexion combinée à un effort axial : $M_{fc,Rd} = \min (M_{c,Rd}; M_{M-N,Rd})$</p> <p><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</i></p> <p style="text-align: center;">Flexion seule :</p> $M_{c,Rd} = \begin{cases} \frac{W_{pl} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{pour les sections de classe 1 ou 2} \\ \frac{W_{el,min} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{pour les sections de classe 3} \\ \frac{W_{eff,min} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} & \text{pour les sections de classe 4} \end{cases}$ <p style="text-align: center;">W_{pl} = le module plastique de section $W_{el,min}$ = le module élastique minimal de section $W_{eff,min}$ = le module minimal de section efficace</p> <p>Les formules sont identiques peu importe l'axe de rotation choisi. Les modules de flexion sont à choisir en fonction.</p> <p style="text-align: center;">Interaction M-N</p> <p><i>Hypothèse : On fait l'hypothèse que $N_{M-T,fc,Rd} = N_{M-C,fc,Rd} = N_{Ed}$. Sur cette base, l'effort de flexion maximal que l'assemblage peut reprendre en plus est déterminé.</i></p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 :</p> $c = \frac{0,5 \cdot (h_{fc} - 2 \cdot t_{fc}) \cdot t_{wc}}{A_{fc}}$ $N_{pl,Rd} = \frac{A_{fc} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$ <p style="text-align: center;">Flexion d'axe fort :</p> <p style="text-align: center;">Si $N_{Ed} \leq c \cdot N_{pl,Rd}$, $M_{M-N,Rd} = M_{c,Rd}$</p>	Eurocode 3 partie 1-1
---------	---	--------------------------

	<p style="text-align: center;"> $\text{Sinon, } M_{M-N,Rd} = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}}}{1 - c} \cdot M_{C,Rd}$ </p> <p style="text-align: center;">Flexion d'axe faible :</p> <p style="text-align: center;">Si $N_{Ed} \leq 2 \cdot c \cdot N_{pl,Rd}$, $M_{M-N,Rd} = M_{C,Rd}$</p> <p style="text-align: center;">Sinon, $M_{M-N,Rd} = \left(1 - \left(\frac{\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} - 2 \cdot c}{1 - 2 \cdot c}\right)^2\right) \cdot M_{C,Rd}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 :</p> <p style="text-align: center;"> $M_{M-N,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{A_{fc} \cdot f_{yc}}\right) \cdot \frac{W_{el,min} \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}}$ </p> <p style="text-align: center;">Section de classe 4 :</p> <p style="text-align: center;"> $M_{M-N,Rd} = \left(\left(1 - \frac{N_{Ed}}{A_{eff} \cdot \frac{f_{yc}}{\gamma_{M0}}}\right) \cdot W_{eff,min} \cdot \frac{f_{yc}}{\gamma_{M0}}\right) - N_{Ed} \cdot e_N$ </p> <p style="text-align: center;">e_N = décalage d'axe neutre approprié en supposant la section transversale soumise à la seule compression.</p>	
5. Évaluation de l'effort axial maximal transmissible par l'assemblage boulonné $M_{a,Rd}$		
<p>L'effort de flexion maximal transmissible par l'assemblage boulonné est donné par :</p> <p style="text-align: center;">Flexion seule : $M_{a,Rd} = M_{a,c,Rd}$;</p> <p style="text-align: center;">Flexion combinée à un effort axial : $M_{a,Rd} = \min(M_{a,c,Rd}; M_{a,M-N,Rd})$ et $N_{T,a,Rd} = \min(N_{T,a,Rd}; N_{M-T,a,Rd})$ ou $N_{C,a,Rd} = \min(N_{C,a,Rd}; N_{M-C,a,Rd})$.</p> <p>Les études ci-dessous sont menées pour un moment de flexion appliqué autour de l'axe fort de la section. Néanmoins, les principes sont identiques dans le cas où le moment est appliqué autour de l'axe faible. Ils peuvent être facilement adaptés. Dans le cas d'une interaction M-N, la résistance des tronçons en T doit être réévaluée en compression et en traction en considérant les tronçons présentés sur les figures ci-dessous (pour autant qu'il n'y ait pas de recouvrement).</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p style="color: green;">Traction</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p style="color: blue;">Compression</p>  </div> </div>		
<p>Tronçons en T comprimés : colonne + platine + béton (+raidisseurs)</p> <p>Tronçon en T tendu : colonne, platine, rondelles, tiges, béton</p>	<p style="text-align: center;">Flexion seule : $M_{a,c,Rd} = \min(M_{T,Rd}; M_{C,Rd})$</p> <p style="text-align: center;"><i>Remarque : l'Eurocode néglige la contribution de l'âme à la résistance en flexion.</i></p> <div style="text-align: center;">  </div>	<p>Eurocode 3 partie 1-8 et Livre du CTIM</p>

$$M_{T,Rd} = F_{T,Rd} \cdot (z_T + z_C)$$

$F_{T,Rd}$ = Résistance d'un tronçon en T tendu, donnée dans la partie consacrée à l'évaluation de l'effort maximal transmissible en traction seule de cette note de calcul

$$z_C = \frac{\frac{F_{C,1,Rd}}{2} \cdot (z_{C,1} + z_T) + F_{C,2,Rd} \cdot (z_{C,2} + z_T) + 2 \cdot F_{C,3,Rd} \cdot (z_{C,3} + z_T)}{\frac{F_{C,1,Rd}}{2} + F_{C,2,Rd} + 2 \cdot F_{C,3,Rd}}$$

Pour la configuration de base et les variantes 1 et 2 : $F_{C,3,Rd} = 0$

$F_{C,i,Rd}$ = Résistance d'un tronçon en T comprimé, donnée dans la partie consacrée à l'évaluation de l'effort maximal transmissible en compression seule de cette note de calcul

$$M_{C,Rd} = \frac{F_{C,1,Rd}}{2} \cdot (z_{C,1} + z_T) + F_{C,2,Rd} \cdot (z_{C,2} + z_T) + 2 \cdot F_{C,3,Rd} \cdot (z_{C,3} + z_T)$$

Interaction M-N :

Deux méthodes peuvent être utilisées afin de déterminer le couple d'efforts résistants M-N :

3. Les formules analytiques :

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

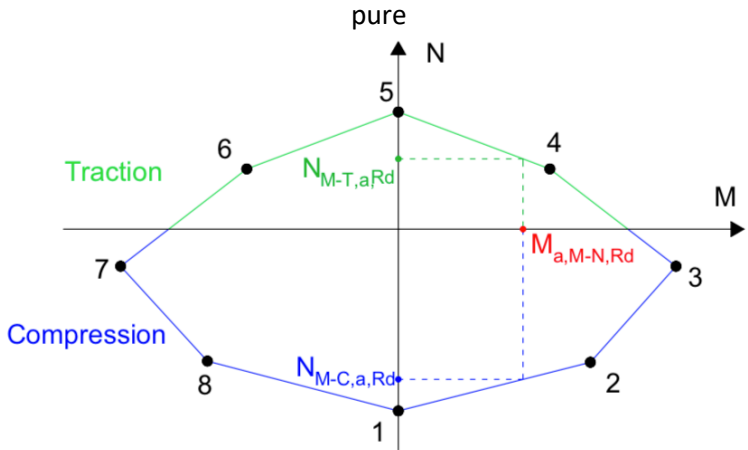
Cas de répartition des efforts	Moment résistant $M_{a,M-N,Rd}$
Côté gauche tendu Côté droit comprimé	$N_{Ed} > 0$ et $e > z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e \leq -z_C$ $M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$
Côté gauche tendu Côté droit tendu	$N_{Ed} > 0$ et $0 < e < z_T$ ou $N_{Ed} > 0$ et $-z_T < e \leq 0$ $M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_T}{e} - 1}\right)$
Côté gauche comprimé Côté droit tendu	$N_{Ed} > 0$ et $e \leq -z_T$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $e > -z_C$ $M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_T}{e} + 1}; \frac{M_{T,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$
Côté gauche comprimé Côté droit comprimé	$N_{Ed} \leq 0$ et $0 < e < z_C$ ou $N_{Ed} \leq 0$ et $-z_C < e \leq 0$ $M_{a,M-N,Rd} = \min\left(\frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} + 1}; \frac{-M_{C,Rd}}{\frac{z_C}{e} - 1}\right)$

$$N_{M-T,a,Rd} \text{ ou } N_{M-C,a,Rd} = \frac{M_{a,M-N,Rd}}{e}$$

4. Le diagramme d'interaction M-N :

On construit le diagramme d'interaction M-N à partir de 8 points :

9. $(N_{C,a,Rd}; 0)$
10. $\left(\frac{N_{C,a,Rd}}{2}; -\frac{N_{C,a,Rd}}{2} \cdot z_C\right)$
11. $\left(\frac{N_{T,a,Rd} + N_{C,a,Rd}}{2}; N_{T,a,Rd} \cdot \frac{z_T}{2} - N_{C,a,Rd} \cdot z_C\right)$
12. $\left(\frac{N_{T,a,Rd}}{2}; \frac{N_{T,a,Rd}}{2} \cdot z_C\right)$
13. $(N_{T,a,Rd}; 0)$
14. $\left(\frac{N_{T,a,Rd}}{2}; -\frac{N_{T,a,Rd}}{2} \cdot z_C\right)$

	$15 \left(\frac{N_{T,a,Rd} + N_{C,a,Rd}}{2}; -N_{T,a,Rd} \cdot \frac{z_T}{2} + N_{C,a,Rd} \cdot z_C \right)$ $16 \left(\frac{N_{C,a,Rd}}{2}; \frac{N_{C,a,Rd}}{2} \cdot z_C \right)$ <p> $N_{T,a,Rd}$ = la résistance de l'assemblage boulonné à la traction pure $N_{C,a,Rd}$ = la résistance de l'assemblage boulonné à la compression pure </p> 	
6. Évaluation de l'effort de flexion maximal transmissible par les soudures $M_{w,Rd}$		
Soudure entre la platine et la colonne	<p>Flexion seule : $M_{w,Rd} = M_{w,c,Rd}$ Flexion combinée à un effort axial : $M_{w,Rd} = \min(M_{w,c,Rd}; M_{w,M-N,Rd})$ Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.</p> <p>Flexion seule : Hypothèse : les soudures au niveau des semelles résistent seules à l'effort de flexion. Moment autour de l'axe fort : $M_{w,c,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \cdot (h_{fc} - t_{fc})$ Moment autour de l'axe faible : $M_{w,c,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \cdot 0,5 \cdot b_{fc}$</p> <p>Interaction M-N : Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures : Hypothèses : - Les soudures au niveau des semelles résistent seules à l'effort de flexion et les soudures entre les raidisseurs et la platine sont négligées. - L'effort axial peut être réparti comme ci-dessous entre l'âme et les semelles si : <ul style="list-style-type: none"> • Si la rigidité de la platine est suffisante pour que celle-ci ne se déforme pas et que toutes les soudures travaillent de la même façon ; • Les gorges de soudures sont respectivement proportionnelles à l'épaisseur de l'âme et de la platine. </p> <p>Soudure entre l'âme et la platine : $N_{w,wc,Rd} = a_{wc} \cdot l_{wc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq N_{Ed} \cdot \frac{A_{fc} - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}}$</p> <p>Soudures entre les semelles et la platine : Moment autour de l'axe fort : $N_{w,fc,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} + \frac{M_{Ed,y}}{h_{fc} - t_{fc}}$ Moment autour de l'axe faible : $N_{w,fc,Rd} = a_{fc} \cdot l_{fc} \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} + \frac{M_{Ed,z}}{0,5 \cdot b_{fc}}$</p>	

<p>Soudures entre les rondelles et la platine</p>	<p>Flexion seule :</p> $M_{w,r,Rd} = a_r \cdot l_r \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \cdot Z_T \leq \frac{M_{w,Rd}}{4}$ <p>Interaction M-N avec N est traction :</p> <p>Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> $N_{wr,Rd} = a_r \cdot l_r \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w} \leq \frac{N_{Ed}}{8} + \frac{M_{Ed,y}}{4 \cdot Z_T}$	
---	--	--

Effort maximal transmissible en cisaillement

L'assemblage est composé de trois parties distinctes : la colonne, l'assemblage boulonné et les soudures. L'effort de cisaillement maximal pouvant être transmis en pied de poteau est relatif à la plus faible de ces trois parties :

- Effort dans la direction de l'axe x : $V_{Ed,x}$ avec $V_{Rd,x} = \min (V_{fc,x,Rd}; V_{a,x,Rd}; V_{w,x,Rd})$;
- Effort dans la direction y : $V_{Ed,y}$ avec $V_{Rd,y} = \min (V_{fc,y,Rd}; V_{a,y,Rd}; V_{w,y,Rd})$.

Il ne devrait jamais être relatif à la résistance des soudures, celles-ci présentant un mode de ruine fragile.

L'évaluation de l'effort maximal transmissible est définie en tenant compte d'une éventuelle interaction N-V, M-V ou M-N-V.

10. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par la colonne

$$V_{fc,x,Rd}, V_{fc,y,Rd} \text{ ou } V_{fc,Rd}$$

Âme de la colonne	<p style="text-align: center;">Résistance en section :</p> <p style="text-align: center;"><i>Hypothèse : On considère la résistance en section de la colonne au droit de la section située juste au-dessus des raidisseurs. Leur contribution est donc négligée.</i></p> <p style="text-align: center;">Sans interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,x,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_{vc,y} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,x,Rd} = V_{el,Rd} = \frac{I_y \cdot t_{wc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$</p> $S_y = b_{fc} \cdot t_{fc} \cdot \left(\frac{h_{fc} - t_{fc}}{2} \right) + t_{wc} \cdot \frac{\left(\frac{h_{fc}}{2} - t_{fc} \right)^2}{2}$ <p style="text-align: center;">Avec interaction N-V, M-V ou M-N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,x,Rd} = \frac{V_{pl,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,x,Rd} = \frac{V_{el,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">En considérant ces valeurs d'effort de cisaillement maximal transmissible, le cisaillement n'influence pas les efforts maximaux transmissibles en traction, compression et flexion.</p>	Eurocode 3 partie 1-1
Semelles de la colonne	<p style="text-align: center;">Résistance en section :</p> <p style="text-align: center;">Sans interaction N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,y,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_{vc,x} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,y,Rd} = V_{el,Rd} = \frac{2 \cdot I_x \cdot t_{fc} \cdot f_{yc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$</p> $S_x = t_{fc} \cdot \frac{(b_{fc} - t_{wc})^2}{4} + h_{fc} \cdot \frac{t_{wc}^2}{8}$ <p style="text-align: center;">Avec interaction N-V, M-V ou M-N-V :</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 1 ou 2 : $V_{fc,y,Rd} = \frac{V_{pl,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">Section de classe 3 ou 4 : $V_{fc,y,Rd} = \frac{V_{el,Rd}}{2}$</p> <p style="text-align: center;">En considérant ces valeurs d'effort de cisaillement maximal transmissible, le cisaillement n'influence pas les efforts maximaux transmissibles en traction, compression et flexion.</p>	Eurocode 3 partie 1-1

11. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmissible par l'assemblage boulonné

$$V_{a,x,Rd}, V_{a,y,Rd} \text{ ou } V_{a,Rd}$$

Les composantes actives de l'assemblage boulonné sont :

- Si l'effort axial est nul ou de traction :
 - Pour la solution de base et la variante 3 : colonne, platine d'extrémité, rondelles, tiges, béton ;
 - Variante 1 : colonne, platine d'extrémité, tiges, béton ;
 - Variante 2 : colonne, platine d'extrémité, bêche, béton ;
- Effort axial de compression : Si les effets de frottement ne permettent pas de reprendre l'entièreté de l'effort de cisaillement, avec la solution de base et la variante 3, il faudra utiliser une bêche pour reprendre le reliquat d'effort et pour la variante 1, les tiges le reprendront.
 - Effets de frottement suffisants : la colonne, la platine, le béton ;
 - Effets de frottement insuffisants :
Pour la solution de base et les variantes 2 et 3 : colonne, platine d'extrémité, bêche, béton ;
Variante 1 : colonne, platine d'extrémité, tiges, béton.

Si l'effort axial est un effort de compression, l'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné vaut :

- Effort selon x :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd}$;
 - Frottement + bêche (variante 2, solution de base avec bêche et variante 3 avec bêche) :
 $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} + V_{Rd,x,n}$;
 - Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} + 8.V_{b,Rd}$;
- Effort selon y :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd}$;
 - Frottement + bêche (variante 2, solution de base avec bêche et variante 3 avec bêche) :
 $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} + V_{Rd,y,n}$;
- Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) : $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} + 8.V_{b,Rd}$ Effort selon x et y :
 - Frottement seul : $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$ et $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$;
 - Frottement + bêche (variante 2 ou solution de base et variante 3, utilisée avec une bêche) :
 $V_{a,Rd,x} = V_{f,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) + V_{Rd,x,n}$ et $V_{a,Rd,y} = V_{f,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) + V_{Rd,y,n}$;
 - Frottement + cisaillement des tiges (variante 1) :
 $V_{a,Rd,x} = (V_{f,Rd} + 8.V_{b,Rd}) \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$ et $V_{a,Rd,y} = (V_{f,Rd} + 8.V_{b,Rd}) \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right)$.

Si l'effort axial est nul ou un effort de traction, l'effort maximal transmis par l'assemblage boulonné vaut :

- Effort selon x :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,x} = V_{Rd,x,n}$;
 - Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1 et 3) : $V_{a,Rd,x} = 8.V_{b,Rd}$;
- Effort selon y :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,y} = V_{Rd,y,n}$;
 - Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1 et 3) : $V_{a,Rd,y} = 8.V_{b,Rd}$;
- Effort selon x et y :
 - Bêche (variante 2) : $V_{a,Rd,x} = V_{Rd,x,n}$ et $V_{a,Rd,y} = V_{Rd,y,n}$;
 - Cisaillement des tiges (solution de base et variantes 1 et 3) :

$$V_{a,Rd,x} = 8 \cdot V_{b,Rd} \cdot \cos\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \text{ et } V_{a,Rd,y} = V_{b,Rd} \cdot \sin\left(\tan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right).$$

Remarque : la détermination de l'effort maximal transmissible ne tient pas compte de la résistance à la pression diamétrale des rondelles ou de la platine d'extrémité. Les dimensions données aux éléments sont suffisantes afin que ce mode de ruine ne soit jamais critique.

g. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par frottement $V_{f,Rd}$

Béton - Platine	Résistance par frottement : $V_{f,Rd} = C_{fd} \cdot N_{Ed} $ avec $C_{fd} = 0,2$	Eurocode 3 partie 1-8
--------------------	---	--------------------------

h. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par la bêche $V_{n,Rd}$

Le critère suivant d'interaction doit être satisfait :

$$\frac{V_{Ed,x,n}}{V_{Rd,x,n}} + \frac{V_{Ed,y,n}}{V_{Rd,y,n}} \leq 1 \text{ avec}$$

Si l'effort axial est nul ou de traction

$$V_{Ed,x,n} = V_{Ed,x}$$

$$V_{Ed,y,n} = V_{Ed,y}$$

Si l'effort axial est de compression :

$$V_{Ed,x,n} = \sin\left(\arctan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$$

$$V_{Ed,y,n} = \cos\left(\arctan\left(\frac{V_{Ed,y}}{V_{Ed,x}}\right)\right) \cdot (V_{Ed} - V_{f,Rd})$$

$$V_{Ed} = \sqrt{V_{Ed,x}^2 + V_{Ed,y}^2}$$

L'effort maximal transmissible par la bêche est donné par :

$$V_{Rd,x,n} = \min(V_{cn,x,Rd}; V_{wn,x,Rd})$$

$$V_{Rd,y,n} = \min(V_{cn,y,Rd}; V_{fn,y,Rd})$$

Remarque : le moment créé par la pression du béton est négligé.

Le livre du CTICM recommande des dimensions minimales pour la bêche :

$$60\text{mm} \leq L_{eff,n} \leq 1,5 \cdot h_n$$

$$L_{eff,n} = L_n - e_m$$

$$h_{n,max} = 0,4 \cdot h_{fc}$$

$$b_{n,max} = 20 \cdot t_{fn}$$

Âme de la bêche	Résistance au cisaillement : Section de classe 1 ou 2 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{A_{vn,y} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$ Section de classe 3 ou 4 : $V_{wn,x,Rd} = \frac{I_{yn} \cdot t_{wn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_y}$ $S_y = b_n \cdot t_{fn} \cdot \left(\frac{h_n - t_{fn}}{2}\right) + t_{wn} \cdot \frac{(\frac{h_n}{2} - t_{fn})^2}{2}$	Livre du CTICM
Semelles de la bêche	Résistance au cisaillement : Section de classe 1 ou 2 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{A_{vn,x} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$ Section de classe 3 ou 4 : $V_{fn,y,Rd} = \frac{2 \cdot I_{xn} \cdot t_{fn} \cdot f_{yn}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0} \cdot S_x}$ $S_x = t_{fn} \cdot \frac{(b_n - t_{wn})^2}{4} + h_n \cdot \frac{t_{wn}^2}{8}$	Livre du CTICM
Béton	Résistance à la pression localisée due aux semelles de la bêche : $V_{cn,x,Rd} = f_{cd} \cdot b_n \cdot L_{eff,n}$ $V_{cn,y,Rd} = \frac{1}{2} \cdot f_{cd} \cdot (h_n - 2 \cdot t_{fc}) \cdot L_{eff,n}$	Livre du CTICM

i. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par les tiges $V_{b,Rd}$		
	$V_{b,Rd} = \min (V_{b,v,Rd}; V_{b,l,Rd})$	
Tiges	Résistance au cisaillement : $V_{b,v,Rd} = \min (V_{b1,v,Rd}; V_{b,v2,Rd})$ $V_{b1,v,Rd} = 8 \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_v = 0,6$ $V_{b,v2,Rd} = 8 \cdot \frac{\alpha_b \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ $\alpha_b = 0,44 - 0,0003 \cdot f_{yb}$	
	<i>Remarque : les formules ci-après sont identiques dans le cas d'un moment de flexion appliqué autour de l'axe faible.</i>	
	Interaction N-V, avec N en traction : $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed}}{1,4 \cdot 8 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$	
	Interaction M-V : $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{\frac{M_{Ed,y}}{z_T}}{1,4 \cdot 4 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$	
	Interaction M-N-V : Assemblage complètement tendu : $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{\frac{N_{Ed} + \frac{M_{Ed,y}}{z_T}}{2}}{1,4 \cdot 8 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$	
	Assemblage partiellement tendu : $V_{b,l,Rd} = \left(1 - \frac{N_{Ed} + \frac{M_{Ed,y}}{z_T}}{1,4 \cdot 4 \cdot F_{t,Rd}} \right) \cdot V_{b,v,Rd}$	
Rondelles	Solution de base et variantes 2 et 3 : Résistance à la pression diamétrale : $V_{r,Rd} = 8 \cdot \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_{ur} \cdot d_b \cdot t_r}{\gamma_{M2}} \leq V$ $V = \begin{cases} V_{a,Rd,x} \\ V_{a,Rd,y} \\ \sqrt{V_{a,Rd,x}^2 + V_{a,Rd,y}^2} \end{cases}$ $k_1 = \min (2,5; 1,4 \cdot \frac{e_d}{d_{b,r}} - 1,7)$ $\alpha_b = \min \left(\frac{f_{ub}}{f_{ur}}; 1 \right)$	
Platine	Variante 1 : Les mêmes formules que pour les rondelles sont utilisées, en prenant les caractéristiques de la platine pour $V_{r,Rd}$.	

12. Évaluation de l'effort de cisaillement maximal transmis par les soudures $V_{w,x,Rd}$ et/ou

$$V_{w,y,Rd}$$

Frottement seul ou frottement + cisaillement des tiges :

$$V_{w,x,Rd} = V_{w,wc,Rd}$$

$$V_{w,y,Rd} = V_{w,fc,Rd}$$

Frottement + bête :

$$V_{w,x,Rd} = \min (V_{w,wc,Rd}; V_{w,wn,Rd})$$

$$V_{w,y,Rd} = \min (V_{w,fc,Rd}; V_{w,fn,Rd})$$

Hypothèse : les soudures entre la platine et les raidisseurs sont négligées.

Cisaillement seul :

$V_{w,wc,Rd}$ = la résistance des soudures entre l'âme de la colonne et la platine d'extrémité

$V_{w,fc,Rd}$ = la résistance des soudures entre les semelles de la colonne et la platine d'extrémité

La résistance des soudures est donnée par :

$$V_{w,Rd} = a \cdot l \cdot \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M2} \cdot \beta_w}$$

On prendra la plus petite valeur f_y des éléments à assembler

β_w = facteur de corrélation pour les soudures d'angle

f_u = résistance à la traction des aciers laminés à chaud
(Eurocode 3 partie 1-1)

Interaction N-V :

Hypothèse : la contribution des soudures entre les raidisseurs et la platine sont négligées.

Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :

Soudures entre la platine et l'âme du poteau :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{wc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{A_{fc} - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{wc}}$$

$$\tau_{//} = \frac{V_{Ed,x}}{l_{wc}}$$

Soudures entre la platine et les semelles du poteau :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{fc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{fc}}$$

$$\tau_{//} = \frac{V_{Ed,y}}{l_{fc}}$$

Interaction M-N-V, si nécessaire :

Hypothèse : les soudures sous les semelles résistent seules à l'effort de flexion et les soudures entre les raidisseurs et la platine sont négligées.

Les formules ci-dessous sont similaires si le moment est appliqué autour de l'axe faible.

Soudures
entre la
platine
d'extrémité
et la colonne

Eurocode 3
partie 1-8

Eurocode 3
partie 1-8

	<p>Si les critères suivants sont vérifiés, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p>Soudures entre la platine et l'âme du poteau :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{wc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot N_{Ed} \cdot \frac{A_{fc} - 2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} \cdot \frac{1}{l_{wc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,x}}{l_{wc}}$ <p>Soudures entre la platine et les semelles du poteau :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_{fc} \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot (N_{Ed} \cdot \frac{2 \cdot b_{fc} \cdot t_{fc}}{A_{fc}} + \frac{M_{Ed,y}}{h_{fc} - t_{fc}}) \cdot \frac{1}{l_{fc}}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed,y}}{l_{fc}}$	
<p>Soudures entre la platine d'extrémité et la bêche</p>	<p>$V_{w,wn,Rd}$ = la résistance des soudures entre l'âme de la bêche et la platine d'extrémité</p> <p>$V_{w,fn,Rd}$ = la résistance des soudures entre les semelles de la bêche et la platine d'extrémité</p>	
<p>Soudures entre la platine d'extrémité et les rondelles</p>	<p>Cisaillement seul :</p> $V_{w,r,Rd} \leq \frac{V}{8}$ $V = \begin{cases} V_{w,x,Rd} \\ V_{w,y,Rd} \\ \sqrt{V_{w,x,Rd}^2 + V_{w,y,Rd}^2} \end{cases}$ <p>$V_{w,r,Rd}$, la résistance des soudures entre les rondelles et la platine d'extrémité</p> <p>Interaction N-V avec N en traction :</p> <p>Si le critère suivant est vérifié, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_r \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{N_{Ed}}{8} \cdot \frac{1}{l_r}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed}}{8 \cdot l_r}$ <p>Interaction M-N-V avec N en traction :</p> <p>Si le critère suivant est vérifié, les efforts appliqués sont admissibles par les soudures :</p> <p>Solution de base et variantes 2 et 3 :</p> $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{//}^2)} \leq \frac{a_r \cdot f_u}{\gamma_{M2} \cdot \beta_w}$ $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \left(\frac{N_{Ed}}{8} + \frac{M_{Ed,y}}{4 \cdot z_T} \right) \cdot \frac{1}{l_r}$ $\tau_{//} = \frac{V_{Ed}}{8 \cdot l_r}$	<p>Eurocode 3 partie 1-8</p>