



ÉLABORATION D'OUTIL DE CALCUL DES TREILLIS EN DOUBLE CORNIÈRE BOULONNÉE

MÉMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGÉNIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER 2 GENIE CIVIL BÂTIMENT ET TRAVAUX PUBLICS
SPÉCIALITÉ : TRANSPORT

Présenté et soutenu publiquement le 19 juillet 2022 par

Ceaca Guy-Bonaventure ZOH (20190093)

Encadrant 2iE : Moussa LO, Enseignant-chercheur à l'Institut 2iE

Tuteur INSA : Younes AOUES, Enseignant-chercheur à INSA Rouen Normandie

**Maître de stage : Antoine PABOIS, Ingénieur chargé d'affaires chez HEMERY-
HERVIEUX**

Structure d'accueil du stage : HEMERY-HERVIEUX, Saint-Nicolas de Redon

Jury d'évaluation du stage :

Président : *Pr Amadou KEITA*

Membres et correcteurs : *M Koffi KOKOLE*
M Iliassou NOUHOUN SALOU

Promotion [2021/2022]

DÉDICACES

À
ma mère et mon père pour leur amour inconditionnel et les efforts consentis pour me permettre
d'atteindre mes objectifs. Que le tout puissant qui permet tout vous accorde la grâce de profiter
des fruits de vos efforts.
Mes frères et ma sœur pour leurs conseils et leurs soutiens tout au long de mon cursus qui m'ont
toujours poussé à donner le meilleur de moi peu importe les situations

CITATIONS

« *Tout est grâce !* »

Sainte Thérèse de Lisieux

De son nom de naissance Marie-Françoise Thérèse Martin, sainte Thérèse de Lisieux est une sœur religieuse de la communauté des Carmes déchaux. Elle est née à Alençon, dans l'Orne, le 2 janvier 1873 et morte à l'âge de 24 ans, victime de la tuberculose, à Lisieux, dans le Calvados, le 30 septembre 1897.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'endroit de :

- L'administration et au corps professoral de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), pour ces années d'apprentissage et de formation dans le domaine du génie civil ;
- L'administration, la direction des relations internationales et à l'ensemble des enseignants de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Rouen Normandie, pour m'avoir accepté en mobilité internationale et permis de compléter ma formation d'ingénieur ;
- M Moussa LO, mon encadreur interne, pour sa disponibilité et son encadrement pédagogique et son soutien tout au long du stage ;
- M Younes AOUES, mon second encadreur pédagogique pour ce stage de fin d'études ;
- HEMERY-HERVIEUX pour l'opportunité et la confiance accordée tout au long de ce stage de fin d'études ;
- M Antoine BERNEAU, responsable du pôle calcul pour avoir bien voulu m'accepter comme stagiaire pour cette première expérience professionnelle dans le domaine de la charpente métallique ;
- M Antoine PABOIS, mon maitre de stage, pour sa disponibilité, ses explications, ses conseils et aussi pour m'avoir transmis sa passion pour le calcul ;
- M Julien GUYADER, directeur technique du pôle calcul pour ses conseils avisés et sa confiance dans les tâches confiées qui était de plus en plus grande au cours du stage ;
- Mme Eve-Anne GAUDIN, la touche féminine du pôle calcul, pour ses explications, conseil et documentation mise à ma disposition pour mener à bien ce projet de fin d'études ;
- Mme Gisèle BIHINA, pour les réponses et les orientations conseillées lors de mes recherches ;
- L'ensemble des collaborateurs de HEMERY-HERVIEUX pour le partenariat et les échanges fructueux sur les affaires et projets vu ensemble.

RÉSUMÉ

Ce présent mémoire de fin d'étude d'ingénieur intitulé « élaboration d'outil de calcul des treillis en double cornière boulonnée » traite des vérifications à faire sur les montants et les diagonales de treillis pour assurer la stabilité de la structure vis-à-vis des charges qui lui sont appliquées.

Il s'agit en effet de faire des vérifications de chaque élément pris individuellement (boulons, cornière et gousset) puis collectivement. Elles sont faites en situation normale et en situation d'incendie. Ce sont notamment la vérification des sections brutes, les résistances aux cisaillements, les résistances à la compression et les pressions diamétrales dans chaque assemblage.

La résistance à la compression des doubles cornières est déterminée par un facteur très important pour les barres composées qui est le nombre d'entretoises sur la longueur de flambement. Ce nombre d'entretoises qui est lié au rayon de giration de la section s'est vu diminué de 50 fois (CM66) à 15 fois le rayon de giration (Eurocode). La méthode de calcul utilisée dans ce document est une méthode simplifiée mise en place par le CTICM qui permet de limiter le nombre à 5 sur toute la longueur de la barre composée.

Le calcul de l'échauffement quant à lui se fait avec des émissivités différentes compte tenu de la galvanisation à chaud des charpentes qui les rendent plus résistantes au feu que d'ordinaire.

Grâce à ces vérifications, un outil de calcul a été créé et validé par comparaison avec des exemples du logiciel Robot Structural Analysis, note de calcul de projets déjà exécutés et des publications du CTICM. Cet outil a permis de réduire de plus de la moitié le temps de calcul des barres de treillis et leurs attaches.

Mots Clés :

-
- 1 – Acier
 - 2 – Assemblages boulonnés
 - 3 – Charpente métallique
 - 4 – Cornières jumelées
 - 5 - Matériaux de construction
 - 6 – Résistance au feu
 - 7 – Treillis boulonné

ABSTRACT

This present end-of-study engineering thesis entitled ‘development of calculation tool for bolted twin angles trusses’ deals with the checks of uprights and diagonals of trusses to ensure the stability of the structure facing loads applied to it.

It is indeed a question of making checks of each element taken individually (bolts, twin angles, and gusset) then collectively. They are made in normal situations and in fire situation. These include checking gross sections, shear strengths, compressive strengths and bearing pressures in each joint.

The compressive strength of twin angles is determined by a very important factor for composite bars which is the number of spacers over the buckling length. This number of spacers, which is linked to the radius of gyration of the section, has been reduced from 50 times (CM66) to 15 times the radius of gyration (Eurocode). The calculation method used in this document is a simplified method established by the CTICM which allows the number to be limited to five (for twin angles) over the entire length of the composite bar.

The calculation of the heating is done with different emissivity that takes account of hot-dip galvanizing of the structures which make them more resistant to fire than usual.

Thanks to these verifications, a calculation tool was created and validated by comparison with examples of the Robot Structural Analysis software, calculation note of projects already executed and CTICM publications. This tool has permitted to reduce the time of calculation of truss elements.

Key words:

-
- 1 – Bolted connection**
 - 2 - Construction materials**
 - 3 - Fire resistance**
 - 4 - Metal frame**
 - 5 – Steel**
 - 6 - Truss**
 - 7 – Twin angles**

SOMMAIRE

DÉDICACES.....	I
CITATIONS.....	II
REMERCIEMENTS.....	III
ABSTRACT.....	V
SOMMAIRE	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS	IX
LISTE DES FIGURES	X
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL ET DU PROJET	2
I. Présentation de la structure d'accueil.....	2
1. Historique et statut.....	2
2. Structure de l'entreprise	2
3. Missions	4
II. Présentation du projet	4
1. Contexte et problématique.....	4
2. Objectifs de l'étude	4
CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LES TREILLIS	5
I. Définition	5
II. Les différents types de treillis	5
1. Les treillis Pratt	7
2. Les treillis Howe	7
3. Les treillis Warren	7
4. Treillis en X.....	7
CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES.....	8
I. Résistance à la traction.....	8
1. Résistance des cornières	8
2. Résistance du gousset.....	11
3. Résistance de calcul des boulons.....	12

4.	Résistance de l'assemblage à la pression diamétrale.....	13
II.	Résistance à la compression	14
1.	Résistance des doubles cornières à la compression	14
3.	Résistance de l'assemblage à la compression.....	17
III.	Résistance au feu.....	17
1.	Résistance au feu des cornières	17
2.	Résistance au feu de l'assemblage.....	21
IV.	Mise en place de l'utilitaire de calcul	21
CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION		26
I.	Résultats.....	26
1.	Comparaison assemblage Robot et utilitaire	26
2.	Exemple du bâtiment H de Bal à montoir de Bretagne	27
3.	Exemple du bâtiment DLB traiteur à Pleumeleuc	33
II.	Discussion.....	42
CONCLUSION GÉNÉRALE		43
BIBLIOGRAPHIE		44
ANNEXES		45
Annexe 1 : méthode complète de calcul de cornières jumelées dos à dos en compression		46
Annexe 2 : Standard Hemery-Hervieux		49
Annexe 3 : Note de calcul Robot assemblage cornière de 120 avec 3 boulons 8.8 M24.....		50
Annexe 4 : Exemple de sortie de la feuille de calcul		57
Annexe 5 : Quelques plans d'exécution des bâtiments cités		59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Fiche signalétique de l'entreprise Hemery-Hervieux	2
Tableau 2 : Coefficients réducteurs β	10
Tableau 3 : Tableau 3.1 de l'EN1993-1-2, coefficient de réduction des propriétés de l'acier en fonction de sa température	20
Tableau 4 : Résultats des calculs d'assemblage sur Robot et sur l'utilitaire.....	26
Tableau 5 : Tableau des efforts de traction et de compression dans les barres du treillis bâtiment H	29
Tableau 6 : Résultat du dimensionnement des barres en traction	31
Tableau 7 : Résultat du dimensionnement des barres en compression	32
Tableau 8 : Résultat de la note de calcul du projet.....	33
Tableau 9 : efforts dans les barres (famille 3)	35
Tableau 10 : Dimensionnement des sections de barres en traction (portique famille 3).....	38
Tableau 11 : vérification au feu des sections de barres en traction (portique famille 3).....	39
Tableau 12 : dimensionnement à froid des montants du treillis 3.....	40
Tableau 13 : vérification au feu des montants du treillis 3	41

LISTE DES ABRÉVIATIONS

CTICM : Centre Technique Industriel de la Construction Métallique

OTUA : Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier

CNC2M : Commission de Normalisation de la Construction Métallique et Mixte

NF EN : Norme Française Norme Européenne

EC3 : Eurocode 3

CAE : Cornière à ailes égales

R15 : Résistance au feu 15 minutes

MPa : Méga pascal

Lg : Largeur du gousset

2IE : Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'Environnement

INSA : Institut National des Sciences Appliquées

BNCM : Bureau de Normalisation de la Construction Métallique

Robot : Robot Structural Analysis

CM66 : Règles de calcul des constructions en acier

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Organigramme du groupe Hemery-Hervieux	3
Figure 2 : Exemple de ferme de pont en treillis	6
Figure 3 : Exemple de ferme de toiture en treillis	6
Figure 4 : Exemple de grue en treillis	6
Figure 5 : poutre treillis type N ou Pratt.....	7
Figure 6 : poutre treillis type Howe.....	7
Figure 7 : poutre treillis du type Warren	7
Figure 8 : poutre treillis type X	8
Figure 9 : a) Cornière à ailes inégales b) Cornière à ailes égales.....	9
Figure 10 : aire nette, pinces et entraxe d'une section de cornière	10
Figure 11 : représentation des aires nettes de cisaillement et de traction pour une cornière	10
Figure 12 : représentation des aires nettes de cisaillement et de traction pour un élément plat.....	12
Figure 13 : présentation des axes principaux d'une barre composée de cornière à ailes égale	15
Figure 14 : schéma de principe du module.....	22
Figure 15 : zone de l'utilitaire recevant le numéro de barre et les efforts	22
Figure 16 : menu déroulant pour choix des cornières et épaisseur des goussets.....	23
Figure 17 : section recevant les valeurs de pinces et entraxe	23
Figure 18 : menu déroulant pour choix du diamètre des boulons	24
Figure 19 : cellule permettant d'activer l'option de galvanisation à chaud.....	24
Figure 20 : fonctionnement technique du module de calcul de résistance à la traction	24
Figure 21 : exemple de synthèse de calcul à froid des diagonales en traction	25
Figure 22 : Assemblage de double cornière sur gousset	26
Figure 23 : Portique Bâtiment H	28
Figure 24 : charge permanente	28
Figure 25 : Charges d'exploitation	29
Figure 26 : Liste des barres en tractions.....	31
Figure 27 : Liste des barres en Compression	32
Figure 28 : Résultat du dimensionnement des barres sur Robot	37
Figure 29 : Résultat du dimensionnement des barres en compression sur Robot	40
Figure 30 : Calcul de la résistance au feu.....	57
Figure 31 : Synthèse de résultats du Calcul de la résistance à la compression en situation d'incendie	

.....	58
Figure 32 : Synthèse de résultats du Calcul de la résistance à la traction en situation d'incendie..	58
Figure 33 : élévation du bâtiment H à Montoir de Bretagne.....	59
Figure 34 : coupe de la troisième famille de portique sans extension.....	60

INTRODUCTION

Depuis son apparition dans le domaine de la construction au XVII^e siècle, le métal a su traverser les âges en passant de matériau d'ornement à élément de construction. Cette dernière utilisation a bouleversé les méthodes de conception et de construction des ouvrages. En effet, on a su au fil des siècles desceller les avantages et les inconvénients de ce matériau parmi lesquels sa facilité à atteindre de très grandes portées tout en restant rigide. Ces dernières ont permis de lui accorder une attention particulière de sorte que ce matériau soit présent partout : du bâtiment à simple rez-de-chaussée au bâtiment multi étagé, du bâtiment à usage d'habitation au bâtiment industriel, des ponts aux stations pétrolières. Aujourd'hui, par l'amélioration de ses propriétés et le perfectionnement des moyens de calcul, le métal est l'un des matériaux les plus compétitifs sur le marché de la construction qui se veut avant tout respectueuse de l'environnement.

Malgré tous les progrès déjà réalisés sur ce matériau, il n'en reste pas moins que certaines méthodes de calcul de ce matériau doivent être optimisées notamment celle du calcul des poutres treillis. En effet, les poutres treillis qui sont généralement constituées de membrure principale (élément en T, I, etc.), de diagonales et de montants en cornière nécessitent des temps de calcul très long et fastidieux pour leurs attaches. L'objectif de ce présent projet de fin d'études est de mettre au point un utilitaire de calcul pour les attaches des treillis en double cornière boulonnée et la vérification au feu des dits éléments.

Pour mener à bien cette étude et satisfaire à l'objectif général, il sera question de vérifier la résistance au flambement et à la traction des barres à partir des normes et recommandation en vigueur dans le domaine de la charpente métallique, dimensionner les attaches et terminer par une vérification des résistances des attaches et des barres en situation d'incendie selon les dernières évolutions dans le calcul des charpentes au feu.

Les parties de ce mémoire sont organisées de la façon suivante :

- Chapitre 1 : présentation de la structure d'accueil et du projet
- Chapitre 2 : Généralité sur les treillis
- Chapitre 3 : Matériels et méthodes
- Chapitre 4 : Résultats et discussion

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL ET DU PROJET

I. Présentation de la structure d'accueil

1. Historique et statut

La société Hemery-Hervieux est une entreprise née de la fusion intervenue en avril 2012 de deux entreprises que sont Louis HEMERY (créée en 1962) et Onésime HERVIEUX (créée en 1956). Cette entreprise dont le siège est situé à Saint-Nicolas de Redon possède son site d'exploitation et de production à Saint-Nicolas de Redon. Elle intervient sur tout le territoire français selon la taille et la complexité des projets.

Tableau 1 : Fiche signalétique de l'entreprise Hemery-Hervieux

Siège social :	16 Rue des chênes, Saint-Nicolas de Redon (44460)
Site web :	hemery-hervieux.fr
Email :	contact@hemery-hervieux.fr
Téléphone :	+33 (0) 299 710 313
Dirigeant :	Rémi BERNEAU

2. Structure de l'entreprise

Le groupe Hemery-Hervieux comporte en son sein plusieurs activités. Ces activités qui sont toutes en rapport avec le bâtiment et les réservoirs lui confèrent une structure assez particulière qui se présente selon l'organigramme ci-dessous.

Organigramme HEMERY-HERVIEUX

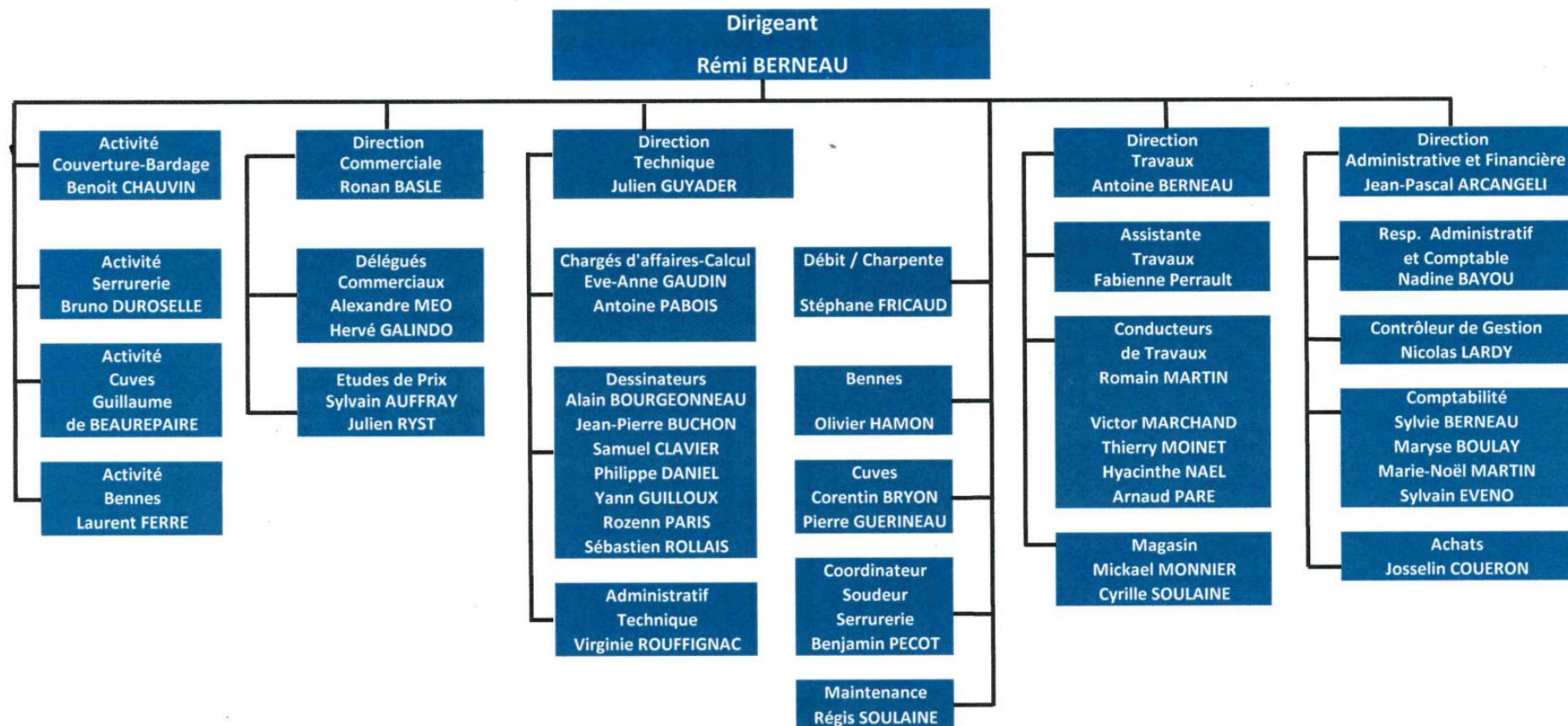


Figure 1 : Organigramme du groupe Hemery-Hervieux

Nous avons été accueillis à la direction technique sous la tutelle des calculateurs chargés d'affaires.

3. Missions

Les activités du groupe HEMERY – HERVIEUX s'articulent autour de 2 pôles :

- ❖ La fabrication d'équipements métalliques de stockage et de transport :
 - Cuves, réservoirs, bacs de rétention, silos ...
 - Bennes, caissons, compaction ...
- ❖ L'étude, la construction et la rénovation de bâtiment professionnel
 - Structures et charpente métalliques
 - Métallerie et serrurerie
 - Couverture et étanchéité
 - Façade en bardage métallique, aluminium, bois et matériaux composites

II. Présentation du projet

1. Contexte et problématique

Ce projet s'inscrit dans une démarche d'amélioration des techniques et méthodes de calcul des poutres en treillis à double cornière boulonnée.

En effet, l'ouest de la France en particulier la région Bretonne qui est réputée pour leur activité agricole, agroalimentaire et industrielle a vu naître une forte demande de bâtiments adaptés à ces activités précitées. Ces activités nécessitent généralement de grands locaux capables d'accueillir les différents équipements nécessaires à leurs exploitations. L'acier étant réputé pour ses propriétés et les treillis pour le franchissement de grande portée, le groupe Hemery-Hervieux s'est vu ces dernières années travailler (en études et en exécution) sur ce type de structure. Ayant constaté que l'étude de ses structures nécessite des temps de calcul très longs pour ce qui est de la résistance à la traction et à la compression des diagonales et des montants, il nous a été confié la mission de créer un utilitaire de calcul visant à optimiser le temps de calcul de ces éléments. Cet utilitaire est donc basé sur les standards du groupe Hemery-Hervieux, mais peut aussi servir pour le calcul d'autres types de combinaisons hors de ces standards. Il permettra de réduire le temps de calcul des barres de treillis en double cornière boulonnée et leurs attaches.

2. Objectifs de l'étude

L'objectif principal de ce projet est de développer un utilitaire de calcul Excel qui permettra d'optimiser le temps de calcul des diagonales et des montants de treillis en double cornière boulonnée et de faciliter leur calcul.

L'atteinte de cet objectif passe étroitement par :

- La détermination des efforts internes via Robot ;
- La vérification de la résistance au flambement des barres ;
- La vérification à la traction des barres ;
- La vérification des attaches à la traction et à la compression ;
- Le calcul de la résistance au feu des barres et des attaches.

CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LES TREILLIS

Actuellement, dans le domaine de la construction métallique, plusieurs recherches sont faites notamment dans le but d'optimiser la conception des ouvrages, leur poids et le coût global.

Dans le cas des treillis, compte tenue de la diversité des choix qui se présentent pour les barres qui le constituent, les pratiques diffèrent. Il existe des recommandations pour les calculs mais elles restent insuffisantes et donnent très peu d'information quant au dimensionnement des treillis avec des barres jumelées.

I. Définition

Qu'il s'agisse de structures faites en acier, en bois ou autres, les treillis sont très présents dans le domaine de la construction. Un treillis est un système triangulé constitué d'éléments structuraux rectilignes interconnectés. La forme triangulaire a été choisie comme base pour sa résistance aux déformations. On utilise les treillis pour alléger une structure tout lui assurant une plus grande stabilité. Un treillis est constitué de plusieurs barres élémentaires qui sont attachées à des nœuds. Ces nœuds sont généralement supposés articulés et reçoivent les charges appliquées et les réactions d'appuis.

II. Les différents types de treillis

Les treillis peuvent être classés en plusieurs catégories à savoir :

- Les fermes de pont

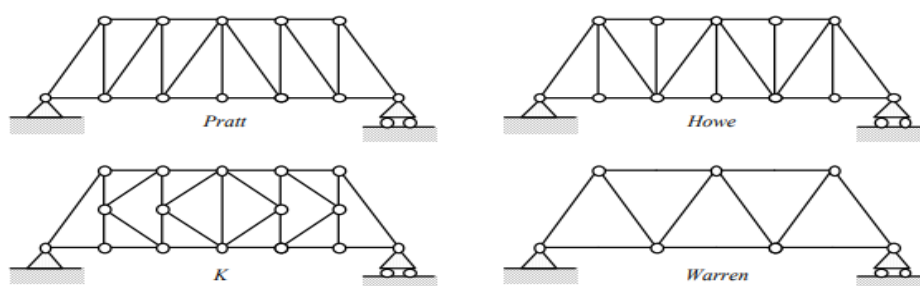


Figure 2 : Exemple de ferme de pont en treillis

- Les fermes de toiture

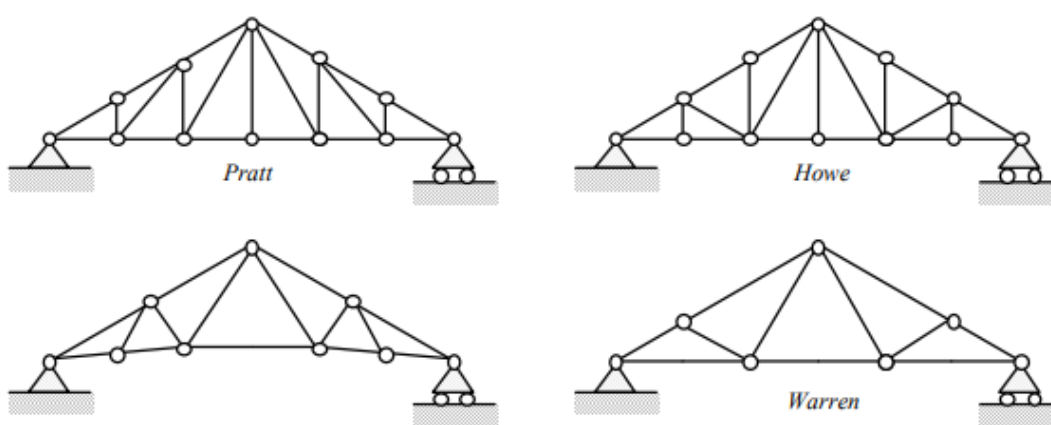


Figure 3 : Exemple de ferme de toiture en treillis

- Les grues.

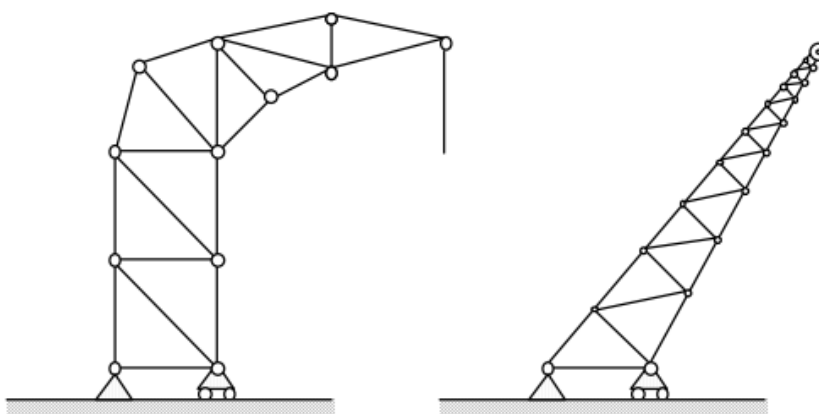


Figure 4 : Exemple de grue en treillis

Pour ce qui nous concerne, nous détaillerons plus les treillis des fermes de toiture qui existe en six types principaux.

1. Les treillis Pratt

Ils sont aussi appelés treillis en N. Ils sont constitués de deux membrures (une membrure haute et une membrure basse) de diagonales et de montants. Dans ces treillis, les diagonales sont en traction sous l'action des charges gravitaires. Ils sont donc préconisés pour les actions descendantes prédominantes.

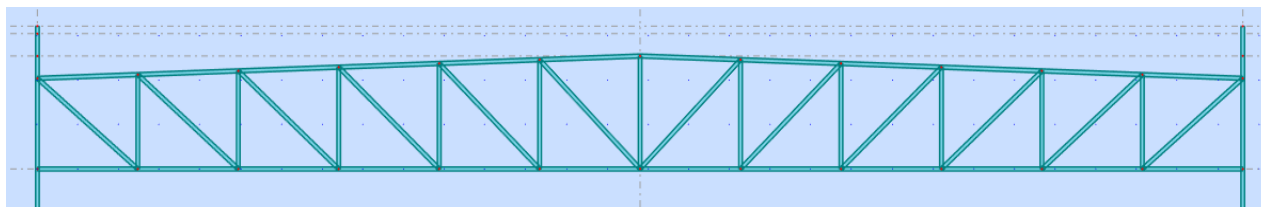


Figure 5 : poutre treillis type N ou Pratt

2. Les treillis Howe

Dans ce type de treillis, les diagonales sont tendues sous l'action des charges ascendantes. Ils sont donc recommandés pour les bâtiments avec des charges ascendantes prédominantes (bâtiments ouverts).

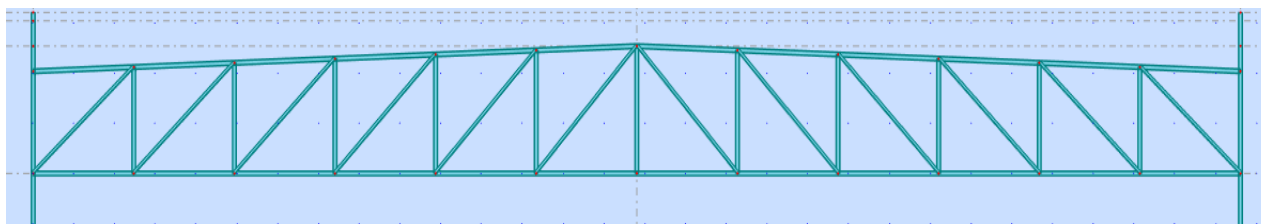


Figure 6 : poutre treillis type Howe

3. Les treillis Warren

Les treillis de cette configuration ont leurs diagonales qui sont soit tendues, soit comprimées.

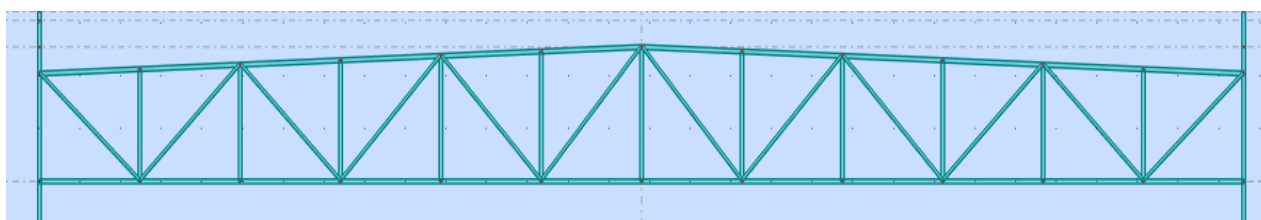


Figure 7 : poutre treillis du type Warren

4. Treillis en X

Ce treillis a deux types de fonctionnements :

- Soit les diagonales travaillent en compression (dans ce cas, il est l'équivalent de deux treillis Warren superposés) ;

- Soit les diagonales en compression sont ignorées et son comportement est donc semblable à celui d'un treillis Pratt.

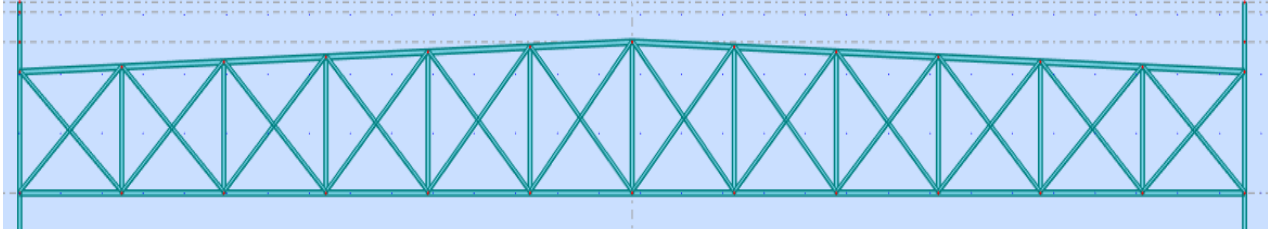


Figure 8 : poutre treillis type X

III. Hypothèses de calcul pour les treillis

- Le matériau est supposé élastique
- Tous les nœuds sont supposés articulés
- Les forces extérieures sont appliquées aux nœuds

CHAPITRE III : MATERIEL ET METHODES

Dans cette section, il sera question de présenter les normes, règles de calcul utilisées pour l'élaboration de l'outil de calcul, mais aussi sa forme et son mode de fonctionnement.

Le matériel utilisé a été :

- Le logiciel Robot structural Analysis
- Le logiciel Microsoft Excel
- Le logiciel R15

I. Résistance à la traction

1. Résistance des cornières

Les cornières font partie de la famille des produits longs. Elles sont constituées de deux ailes reliées formant un angle (Figure 9). Il en existe deux modèles : les cornières à ailes égales et celle à ailes inégales. Les vérifications sont valables pour les deux types de cornières.

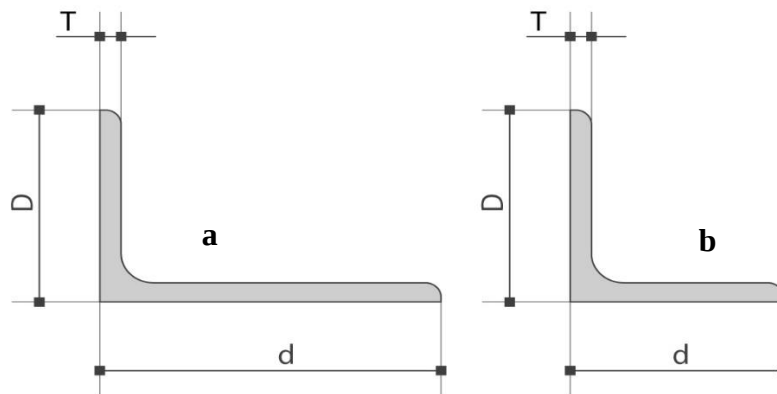


Figure 9 : a) Cornière à ailes inégales b) Cornière à ailes égales

a) Résistance brute des sections

La résistance brute des sections est calculée en fonction de la nuance de l'acier, de l'aire des sections et d'un coefficient de sécurité partiel. Elle se calcule selon l'EN1993-1-1 6.2.3 partir de la formule suivante :

$$N_{pl,rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (1)$$

$N_{pl,rd}$: résistance brute des sections de cornière

A : aire des sections de cornière

f_y : Nuance d'acier des cornières (limite élastique)

γ_{M0} : coefficient partiel pour la résistance des sections transversales pris égal à 1,0

b) Résistance ultime de calcul de la section nette

Elle est calculée en fonction du §3.10.3 de la NF EN 1993-1-8 et des recommandations CNC2M pour le dimensionnement des assemblages selon la NF EN 1993-1-8.

Cette résistance est fonction du nombre de rangée de boulon. Dans nos cas de figure, nous n'en aurons qu'une seule rangée. La résistance sera donc calculée à partir de la clause 2 du paragraphe susmentionné.

$$N_{u,rd} = \frac{\beta \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (2)$$

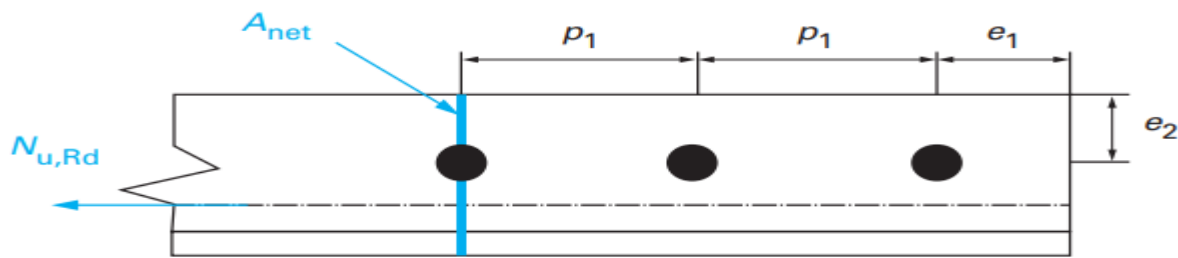


Figure 10 : aire nette, pinces et entraxe d'une section de cornière

γ_{M2} : coefficient partiel pour la résistance à la rupture des sections transversales en traction = 1,25

A_{net} : aire nette des sections. Pour une cornière à ailes inégales attachée par sa petite aile, il convient de prendre A_{net} égale à l'aire nette d'une cornière équivalente à ailes égales de mêmes dimensions que la petite aile.

f_u : résistance à la traction

β : coefficient minorateur dépendant de l'entraxe p_1 comme indiqué dans le tableau 3.8. de la NF EN 1993-1-8

Tableau 2 : Coefficients réducteurs β

Entraxe	P_1	$\leq 2,5d_0$	$\geq 5d_0$
2 boulons	β	0,4	0,7
3 boulons ou plus	β	0,5	0,7

c) Résistance au cisaillement du bloc

Elle est calculée selon §3.10.2 de la NF EN 1993-1-8. Dans notre cas de figure, les éléments à calculer le seront selon la clause (3) de ce paragraphe.

$$V_{eff,rd} = \frac{0,5 \times A_{nt} \times f_u}{\gamma_{M2}} + N_{u,rd} = \frac{A_{nv} \times f_y}{\sqrt{3} \times \gamma_{M0}} \quad (3)$$

$$A_{nv} = t_c((n_b - 1)p_1 + e_1 - (n_b - 0,5)d_0) \quad (4)$$

$$A_{nt} = t_c(e_2 - 0,5d_0) \quad (5)$$

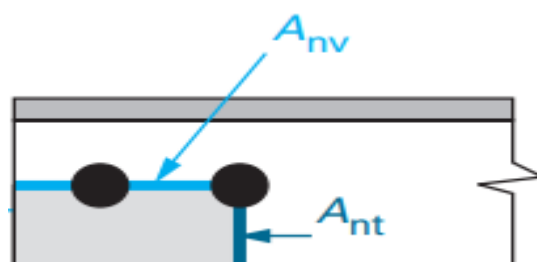


Figure 11 : représentation des aires nettes de cisaillement et de traction pour une cornière

A_{nv} : aire nette soumise au cisaillement

A_{nt} : aire nette soumise à la traction

t_c : épaisseur de la cornière

$p1$: entraxe longitudinale des boulons

$e1$: pince longitudinale des boulons

d_0 : diamètre de perçage

n_b : nombre de boulons

f_y : Nuance d'acier des cornières (limite élastique)

f_u : résistance à la traction

2. Résistance du gousset

Un gousset est un élément plat soudé sur un support sur lequel l'on vient boulonner les cornières. Tout comme les cornières, le gousset doit faire l'objet des mêmes vérifications sur sa section brute, sa section nette et sa résistance au cisaillement de bloc.

a) Résistance brute de la section

$$N_{pl,rd} = \frac{A \times f_y}{\gamma_{M0}}$$

$N_{pl,rd}$: résistance brute des sections de cornière

A : aire des sections de cornière

f_y : Nuance d'acier des cornières (limite élastique)

γ_{M0} : coefficient partiel pour la résistance des sections transversales

b) Résistance de la section nette du gousset au droit des trous de fixation

Elle est calculée selon la formule (6.7) l'EN1993-1-1 §6-2-3.

$$N_{u,rd} = \frac{0,9 \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6)$$

γ_{M2} : coefficient partiel pour la résistance à la rupture des sections transversales en traction = 1.25

A_{net} : aire nette des sections. Pour une cornière à ailes inégales attachée par sa petite aile, il convient de prendre A_{net} égale à l'aire nette d'une cornière équivalente à ailes égales de mêmes dimensions que la petite aile.

f_u : résistance à la traction

c) Résistance de calcul du gousset au cisaillement de bloc

Elle représente la résistance à la ruine par cisaillement au niveau d'une rangée de boulons. Elle est calculée selon §3.10.2 de la NF EN 1993-1-8.

$$V_{eff,rd} = \frac{A_{nt} \times f_u}{\gamma_{M2}} + N_{u,rd} = \frac{A_{nv} \times f_y}{\sqrt{3} \times \gamma_{M0}} \quad (7)$$

$$A_{nv} = t_g \left((n_b - 1)p_1 + e_{1g} - (n_b - 0,5)d_0 \right) \quad (8)$$

$$A_{nt} = t_g (e_{2g} - 0,5d_0) \quad (9)$$

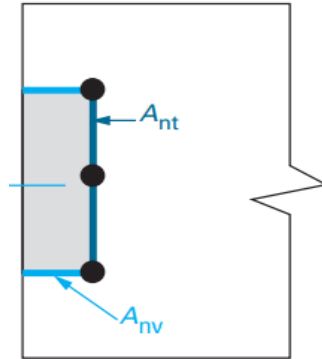


Figure 12 : représentation des aires nettes de cisaillement et de traction pour un élément plat

A_{nv} : aire nette soumise au cisaillement

A_{nt} : aire nette soumise à la traction

t_g : épaisseur du gousset

p_1 : entraxe longitudinale des boulons

e_{1g} : pince longitudinale des boulons par rapport au gousset

e_{2g} : pince transversale des boulons par rapport au gousset

d_0 : diamètre de perçage

n_b : nombre de boulons

f_y : Nuance d'acier du gousset (limite élastique)

f_u : résistance à la traction

3. Résistance de calcul des boulons

a) Cisaillement

Calculée selon le tableau 3.4 de l'EN 1993-1-8, elle représente la capacité des boulons à s'opposer au glissement des deux pièces dans des sens opposés. Sa formule est la suivante :

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times A_s \times f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (10)$$

- Pour les classes 4.6, 5.6, 8.8 : $\alpha_v = 0,6$
- Pour les classes 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 : $\alpha_v = 0,5$

A_s : aire de la section résistante du boulon

f_{ub} : Résistance à la traction du boulon

γ_{M2} : coefficient partiel pour la résistance des boulons = 1,25

La résistance au cisaillement est réduite par un coefficient β_{LF} si la longueur de l'attache (longueur entre les centres des éléments d'attaches située aux extrémités) est supérieure à 15 fois le diamètre des boulons utilisé

$$\beta_{LF} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \quad (11)$$

L_j : longueur entre les centres des éléments d'attaches situées aux extrémités

d : diamètre des attaches (boulons)

avec $0,75 \leq \beta_{LF} \leq 1$

b) Résistance au poinçonnement

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6\pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} \quad (12)$$

d_m : diamètre moyen du sur angle et du surplat qui peut être pris égal à $1,8d$

t_p : épaisseur du plat attaché

f_u : résistance ultime en traction du plat attaché

4. Résistance de l'assemblage à la pression diamétrale

La pression diamétrale est une pression de contact entre les boulons et les différents éléments auxquels ils sont assemblés. Il convient de la vérifier pour les assemblages, car elle peut entraîner la ruine de tout le dispositif. Elles sont calculées suivant l'EN1993-1-8 tableau 3.4

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}} \quad (13)$$

- Pour les boulons de rive

$$\begin{cases} \alpha_b = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) \\ k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right) \end{cases}$$

- Pour les boulons intérieurs

$$\begin{cases} \alpha_b = \min \left(\frac{p1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right) \\ k_1 = \min \left(1,4 \frac{P2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right) \end{cases}$$

II. Résistance à la compression

1. Résistance des doubles cornières à la compression

Elle se base sur la méthode simplifiée mise en place par le CTICM dans la revue Construction métallique n°4-2010. Cette méthode s'applique dans des conditions particulières. En effet, par rapport à la méthode complète de calcul des barres composées en compression décrite dans la norme NF EN 1993-1-1 qui permet de vérifier les barres composées de toute les nuances et toutes les sections, cette méthode simplifiée s'applique à deux types de nuance à savoir les nuances S235 et S355. Elle ne s'applique également qu'à :

- Des cornières à ailes égales dont l'épaisseur est égale au dixième de leur largeur ;
- Des cornières dont la largeur b est comprise entre 50mm et 200mm ;
- Des cornières assemblées dos à dos sans glissement et en compression.

2. Justification du choix de la méthode

Les doubles cornières assemblées dos à dos par des entretoises ou barrette de liaison sont des barres qui rentrent dans la catégorie des barres composées uniformes. La méthode de calcul de ces barres en compression est décrite dans la NF EN 1993-1-1 §6.4. Cette méthode de calcul étant réputée pour être très fastidieuse et contraignante quant à l'espacement des entretoises ou barrettes de liaison (quinze fois le rayon de giration de la section d'une cornière), nombreux sont les entreprises ou bureaux d'étude qui cherchent une solution alternative afin de pouvoir augmenter cet espacement. La méthode simplifiée mise en place par le CTICM se veut donc une optimisation de cet espacement, car les coûts de fabrication et de mise en œuvre ne sont pas négligeables, mais aussi une simplification de la méthode complète.

Les entretoises ou barrettes de liaison sont des éléments de la famille des produits plats. Ils sont d'une importance capitale dans la rigidité des barres composées uniforme. En effet, ces éléments assurent la liaison entre les deux membrures de la barre composée afin de leur conférer une même rigidité et empêchent le glissement relatif d'un constituant par rapport à l'autre.

a) Calcul de l'inertie de flexion par rapport à l'axe $z'z'$

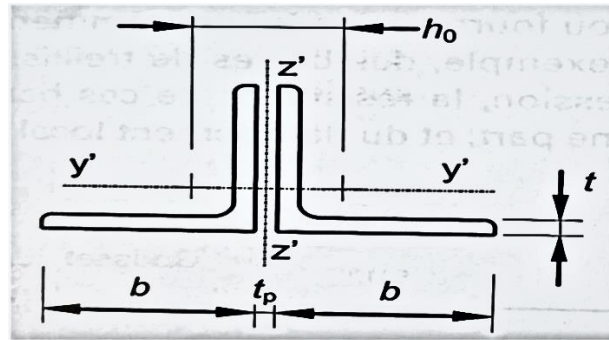


Figure 13 : présentation des axes principaux d'une barre composée de cornière à ailes égale

$$I_{z'} = 0,5 \times h_0^2 \times A_{ch} + 2 \times I_{ch} \quad (14)$$

$I_{z'}$: moment d'inertie de flexion de la section composée par rapport à l'axe $z'z'$

h_0 : Distance entre centres de gravité des cornières

A_{ch} : Aire de la section d'une cornière

I_{ch} : moment d'inertie de flexion d'une cornière par rapport à un axe passant par son centre de gravité et parallèle à l'une des ailes ($I_{ch} = I_y = I_z$ pour les cornières à ailes égales)

b) Effort normal critique de la barre composée suivant l'axe $z'z'$

$$N_{cr,z'} = \frac{\pi^2 E I_{z'}}{L^2} \quad (15)$$

N_{cr} : Effort normal critique

E : Module d'élasticité longitudinale

L : longueur de la barre composée

$I_{z'}$: moment d'inertie de flexion de la section composée par rapport à l'axe $z'z'$

c) Élancement réduit pour le flambement $z'z'$

$$\bar{\lambda}_{z'} = \sqrt{\frac{2 A_{ch} f_y}{N_{cr,z'}}} \quad (16)$$

Avec $\bar{\lambda}_{z'} \leq 1,8$

$\bar{\lambda}_{z'}$: élancement réduit de la section composée par rapport à l'axe $z'z'$

A_{ch} : Aire de la section d'une cornière

N_{cr} : Effort normal critique

f_y : Nuance d'acier du gousset (limite élastique)

d) Calcul de l'élancement réduit effectif

Nombre d'entretoises	Nuance S235	Nuance S355
2	$0,18\bar{\lambda}_{z'}^2 + 0,77\bar{\lambda}_{z'} + 0,39$	$0,86\bar{\lambda}_{z'}^2 - 0,18\bar{\lambda}_{z'} + 0,66$
3	$0,32\bar{\lambda}_{z'}^2 + 0,52\bar{\lambda}_{z'} + 0,41$	$0,66\bar{\lambda}_{z'}^2 - 0,16\bar{\lambda}_{z'} + 0,66$
4	$0,56\bar{\lambda}_{z'}^2 + 0,17\bar{\lambda}_{z'} + 0,48$	$0,65\bar{\lambda}_{z'}^2 - 0,21\bar{\lambda}_{z'} + 0,67$
5	$0,69\bar{\lambda}_{z'}^2 + 0,05\bar{\lambda}_{z'} + 0,53$	$0,69\bar{\lambda}_{z'}^2 - 0,31\bar{\lambda}_{z'} + 0,70$

e) Moment d'inertie suivant l'axe y'y'

$$I_{y'} = 2 \times I_{ch} \quad (17)$$

$I_{y'}$: moment d'inertie de flexion de la section composée par rapport à l'axe y'y'

I_{ch} : moment d'inertie de flexion d'une cornière par rapport à un axe passant par son centre de gravité et parallèle à l'une des ailes ($I_{ch} = I_y = I_z$ pour les cornières à ailes égales)

f) Effort normal critique suivant l'axe y'y'

$$N_{cr,y'} = \frac{\pi^2 E I_{y'}}{L_{cr,y'}^2} \quad (18)$$

N_{cr} : Effort normal critique

E : Module d'élasticité longitudinale

$L_{cr,y'}$: longueur de flambement de la barre composée

$I_{y'}$: moment d'inertie de flexion de la section composée par rapport à l'axe y'y'

g) Élancement réduit suivant l'axe y'y'

$$\bar{\lambda}_{y'} = \sqrt{\frac{2A_{ch}f_y}{N_{cr,y'}}} \quad (19)$$

$\bar{\lambda}_{y'}$: élancement réduit de la section composée par rapport à l'axe y'y'

A_{ch} : Aire de la section d'une cornière

N_{cr} : Effort normal critique de la barre par rapport à y'y'

f_y : Nuance d'acier du gousset (limite élastique)

h) Élancement maximal et coefficient de réduction

$$\bar{\lambda}_{max} = \text{Max}(\bar{\lambda}_{y'}; \bar{\lambda}_{eff})$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi - \bar{\lambda}_{max}^2}} \quad (20)$$

χ : coefficient de réduction

Φ : valeur pour déterminer le coefficient de réduction χ

$\bar{\lambda}_{max}$: élancement réduit équivalent pour la barre composée

$$\Phi = 0,5 \times (1 + \alpha(\bar{\lambda}_{max} - 0,2) + \bar{\lambda}_{max}^2) \quad (21)$$

Avec $\alpha = 0,34$

i) Résistance au flambement de la barre composée

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times 2 \times A_{ch} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (22)$$

$N_{b,Rd}$: résistance au flambement de la barre composée

A_{ch} : Aire de la section d'une cornière

f_y : Nuance d'acier du gousset (limite élastique)

γ_{M1} : coefficient partiel pour la résistance des cornières = 1

3. Résistance de l'assemblage à la compression

Elle suit la même méthode que la vérification à la traction.

III. Résistance au feu

1. Résistance au feu des cornières

Elle suit le principe de l'EC3 partie 1-2. Elle est basée sur le principe de calcul de modèles simplifiés qui se présente comme suit :

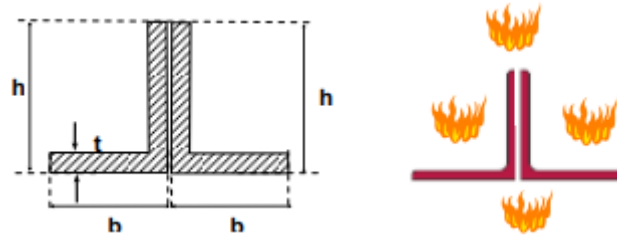
- Calcul de l'échauffement ;
- Vérification de la résistance.

a) Calcul de l'échauffement

- Calcul du facteur de massiveté enveloppe :

Il est défini comme le rapport entre la surface exposée d'une enveloppe théorique entourant le profilé, telle qu'un rectangle théorique entourant un profilé et le volume d'acier. Il est calculé selon la méthode décrite par le CTICM dans « méthode de justification d'une stabilité au feu de ¼ heure

(R15) »



$$\left(\frac{A_m}{V}\right)_b = \frac{b + 2t + \sqrt{(h-t)^2 + (b-t)^2}}{(b+h-t)t} \quad (23)$$

$$\frac{A_m}{V} = \frac{2 \times (2 \times b + h)}{2 \times (b+h-t)t} \quad (24)$$

- Calcul du facteur de correction pour l'effet d'ombre EN1993-1-2 §4.2.5.1

$$K_{sh} = \frac{\left(\frac{A_m}{V}\right)_b}{\left(\frac{A_m}{V}\right)} \quad (25)$$

- Calcul de la chaleur spécifique

La chaleur spécifique de l'acier correspond physiquement à la capacité que possède l'acier pour accumuler de la chaleur. Cette grandeur varie en fonction de sa température, selon l'EN1993-1-2 §4.3.1.2 plusieurs expressions permettent de calculer la valeur de la chaleur spécifique selon un certain intervalle de température :

- Pour $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600^\circ\text{C}$:

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \times \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \times \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \times \theta_a^3 \text{ (J/kgK)} \quad (26)$$

- Pour $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$:

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ (J/kgK)} \quad (27)$$

- Pour $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$:

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 738} \text{ (J/kgK)} \quad (28)$$

- Pour $900^\circ\text{C} \leq \theta_a$:

$$c_a = 650 \text{ (J/kgK)}$$

- Calcul itératif

En prenant un de temps $\Delta t = 3$ secondes, on itère de la température $\theta_{a,t0} = 20^\circ\text{C}$ jusqu'à atteindre

15minutes et on identifie la température et les coefficients de réduction.

$$\theta_g = 20 + 345 \times \log \left(\frac{8t}{60} + 1 \right) \quad (29)$$

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (30)$$

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c * (\theta_g - \theta_m) \quad (31)$$

Avec :

- α_c Le coefficient de transfert thermique par convection pris égale à 25W/m²K pour le feu normalisé.
- θ_g , la température des gaz entourant l'élément.
- θ_m , la température à la surface de l'élément.

Calcul du transfert thermique par rayonnement $\dot{h}_{net,r}$ (EN1994-1-2 §4.3.4.2.2) :

$$\dot{h}_{net,r} = \varepsilon_m \times \varepsilon_f \times (5,67 \times 10^{-8}) \times \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (32)$$

Avec :

- ε_m , l'émissivité du matériau (0,35 si la température est inférieure à 500°C et 0,7 quand la température est supérieure à 500°C)
- ε_f , l'émissivité du feu considérée égale à 1 (EN1991-1-2 §3.1-6)
- θ_g , la température des gaz entourant l'élément.
- θ_m , la température à la surface de l'élément.

b) Calcul de la résistance

Il est important de définir un objectif de durée de stabilité au feu voulu. Dans notre cas, la durée préalablement définie est de 15 minutes. En se basant sur la température obtenue à partir du calcul de l'échauffement, on détermine le facteur de réduction à partir du tableau 3.1 de l'EN1993

Tableau 3 : Tableau 3.1 de l'EN1993-1-2, coefficient de réduction des propriétés de l'acier en fonction de sa température

Température de l'acier θ_a	Facteurs de réduction à la température θ_a par rapport à la valeur de f_y ou E_a à 20 °C		
	Facteur de réduction (par rapport à f_y) pour la limite d'élasticité efficace $k_{y,\theta} = f_{y,\theta}/f_y$	Facteur de réduction (par rapport à f_y) pour la limite de proportionnalité $k_{p,\theta} = f_{p,\theta}/f_y$	Facteur de réduction (par rapport à E_a) pour la pente de domaine élastique linéaire $k_{E,\theta} = E_{a,\theta}/E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000
NOTE Pour des valeurs intermédiaires de la température de l'acier, une interpolation linéaire peut être utilisée.			

La résistance de l'élément de l'élément en fonction de la sollicitation qu'il subit devient alors :

- En traction l'EN 1993-1-2 §4.2.3.1

$$N_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \times N_{Rd} \times \left[\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad (33)$$

- En compression l'EN 1993-1-2 §4.2.3.2

$$N_{b,fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \times \chi_{fi} \times A \times \left[\frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \right] \quad (34)$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad (35)$$

$$\varphi_{\theta} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2] \quad (36)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (37)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[\frac{k_{y,\theta}}{k_{E,\theta}} \right]^{0,5} \quad (38)$$

2. Résistance au feu de l'assemblage

Cette résistance a été calculée suivant l'annexe D de l'EN 1993-1-2

$$F_{v,t,Rd} = F_{v,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (39)$$

$$F_{b,t,Rd} = F_{b,Rd} k_{b,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad (40)$$

IV. Mise en place de l'utilitaire de calcul

1. Principe de fonctionnement

L'utilitaire de calcul se présente sous la forme d'une feuille Excel sur laquelle l'on rentre les informations variables du projet telles que :

- La nuance de l'acier utilisée
- Les efforts sollicitant dans les barres (générés par Robot)
- La classe des boulons, etc.

Cette feuille effectue ensuite les calculs de différentes résistances selon les règles et normes décrites dans les sections 1 à 3 du même chapitre afin de déterminer la résistance minimale suivant la résistance des différentes sections et l'assemblage des différents éléments puis affiche un taux de travail en fonction de la valeur de l'effort entrée. Il faut savoir que cette feuille est essentiellement basée sur les habitudes du groupe Hemery-Hervieux. Cependant, elle pourrait aussi servir pour d'autres types de combinaisons dans le domaine des assemblages des doubles cornières boulonnées sur les goussets.

La feuille de calcul intègre comme base de données des sections en L les valeurs du catalogue de profilé OTUA et les différentes résistances des boulons selon leur classe. Toutes les vérifications qu'elle effectue se font selon l'Eurocode 3 et les annexes nationales françaises, les prescriptions du CTICM et du CNC2M. Son fonctionnement se récapitule à travers le schéma suivant.

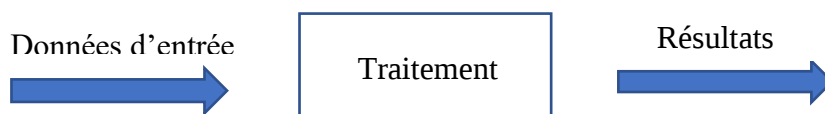


Figure 14 : schéma de principe du module

Nous reviendrons uniquement sur les parties de l'utilitaire que nous avons trouvé bon de détailler aux vues des choix faits.

1. Les numéros de barres et les efforts

Ils proviennent de la modélisation de la structure sur le logiciel Robot Structural Analysis ou de calcul manuel. Ils peuvent être copiés et coller directement dans l'utilitaire. Pour nos calculs, les valeurs qui nous intéressent sont celle à l'ELU+ qui représentent les efforts de compression dans les barres, les valeurs à l'ELU- qui elles sont les efforts de traction, les valeurs de FEU+ qui définissent les sollicitations en condition d'incendie des éléments comprimés et les valeurs de FEU- qui elles sont celles des éléments en compression.

N° de barre	Efforts
1/32/ELU-	-42403,17
1/30/ELU-	-42288,07
2/19/ELU-	-2971,69
2/30/ELU-	-2882,83
3/19/ELU-	-36678,51
3/29/ELU-	-36558,54

Figure 15 : zone de l'utilitaire recevant le numéro de barre et les efforts

2. Sections des cornières et épaisseur du gousset ou des entretoises

Ce sont des valeurs qui font référence aux sections commercialisées sur le marché. Elles se présentent dans un menu déroulant qui nous laisse la possibilité de faire varier en fonction de nos attentes de dimensionnement. Les sections de cornière sont celles du catalogue OTUA et les sections de gousset sont les épaisseurs de tôle couramment utilisées par Hemery.

N° de barre	Efforts	Section de cornière	épaisseur gousset	Efforts	Section de cornière	épaisseur gousset	e1
	11500	2 CAE 40x4	8 mm	11500	2 CAE 40x4	8 mm	35 mm
	11500	2 CAE 50x5	8 mm	11500	2 CAE 60x6	8 mm	35 mm
		2 CAE 60x6	10 mm		2 CAE 70x7	8 mm	35 mm
		2 CAE 70x7	10 mm		2 CAE 80x8	8 mm	35 mm
		2 CAE 80x8	10 mm		2 CAE 90x9	8 mm	35 mm
		2 CAE 90x9	10 mm		2 CAE 100x10	8 mm	35 mm
		2 CAE 100x10	10 mm		2 CAE 120x12	8 mm	35 mm
			10 mm			10 mm	30 mm
			10 mm			10 mm	30 mm
			10 mm			10 mm	30 mm
			10 mm			10 mm	30 mm

Figure 16 : menu déroulant pour choix des cornières et épaisseur des goussets

3. Les pinces et entraxes

Rentrées manuellement sauf celle de la pince transversale, ces données sont au choix du calculateur. Il lui revient de trouver les bonnes valeurs qui lui permettront d'optimiser le dimensionnement des attaches tout en tenant compte des dispositions constructives en fonction des sections de cornière et des boulons utilisés. Par défaut, l'entraxe longitudinale est prise égale au double de la pince longitudinale et les entraxes et pinces des goussets sont prises égales à celle des cornières. De façon générale, lors de la fabrication et du montage, les valeurs de pinces et entraxes de gousset sont supérieures aux valeurs théoriques calculées. Cette pratique permet en outre de garantir un minimum de marge de sécurité qui s'avère nécessaire pour un dimensionnement.

Section de cornière	épaisseur entretoise	nombre d'entretoise	e1	e2	p1
2 CAE 120x12	10 mm	2	35 mm	60 mm	70 mm
2 CAE 120x12	10 mm	2	35 mm	60 mm	70 mm
2 CAE 120x12	10 mm	2	35 mm	60 mm	70 mm
2 CAE 120x12	10 mm	2	35 mm	60 mm	70 mm
2 CAE 120x12	10 mm	2	30 mm	60 mm	60 mm
2 CAE 120x12	10 mm	2	35 mm	60 mm	70 mm

Figure 17 : section recevant les valeurs de pinces et entraxe

4. La classe de résistance des boulons et leurs diamètres

Tout comme les sections de cornières, ces données sont disponibles dans un menu déroulant. La classe des boulons dans la liste va de la 4.6 à la 10.9 et les diamètres quant à eux sont compris entre les diamètres 10mm et 30mm inclus.

p1	Classe	Diamètre (mm)	Nombre de boulon	e1g	e2g	p1
70 mm	8.8	12	2	35 mm	35 mm	70 mm
70 mm	10 mm	12	2	35 mm	35 mm	70 mm
70 mm	12 mm	14	3	35 mm	70 mm	70 mm
70 mm	14 mm	16	3	35 mm	70 mm	70 mm
70 mm	16 mm	18	3	35 mm	70 mm	70 mm
70 mm	18 mm	20	3	35 mm	70 mm	70 mm
70 mm	20 mm	22	3	35 mm	70 mm	70 mm
70 mm	22 mm	24	3	35 mm	70 mm	70 mm
60 mm	8.8	16	3	30 mm	30 mm	60 mm
60 mm	8.8	16	3	30 mm	70 mm	60 mm

Figure 18 : menu déroulant pour choix du diamètre des boulons

5. La résistance au feu

Elle est directement rattachée aux feuilles de calcul à la compression ou à la traction. Tous les paramètres variables d'une ligne de calcul sont liés à leur équivalent sur une feuille de calcul au feu (annexe 4). Les valeurs de l'émissivité sont contrôlées par un menu déroulant se trouvant sur les feuilles de traction ou de compression.

Cornières	Nuance	235	Gousset		Nuance	235	γ_{m2}	1,25
	Fu	360			Fu	360	γ_{m0}	1
	m (plan de cisaillement)	2	Galva ?	Oui	nombre cornière	2	γ_{mfi}	1
				Oui Non				

Figure 19 : cellule permettant d'activer l'option de galvanisation à chaud

6. Fonctionnement technique de la feuille de calcul des doubles cornières tendue avec leurs attaches

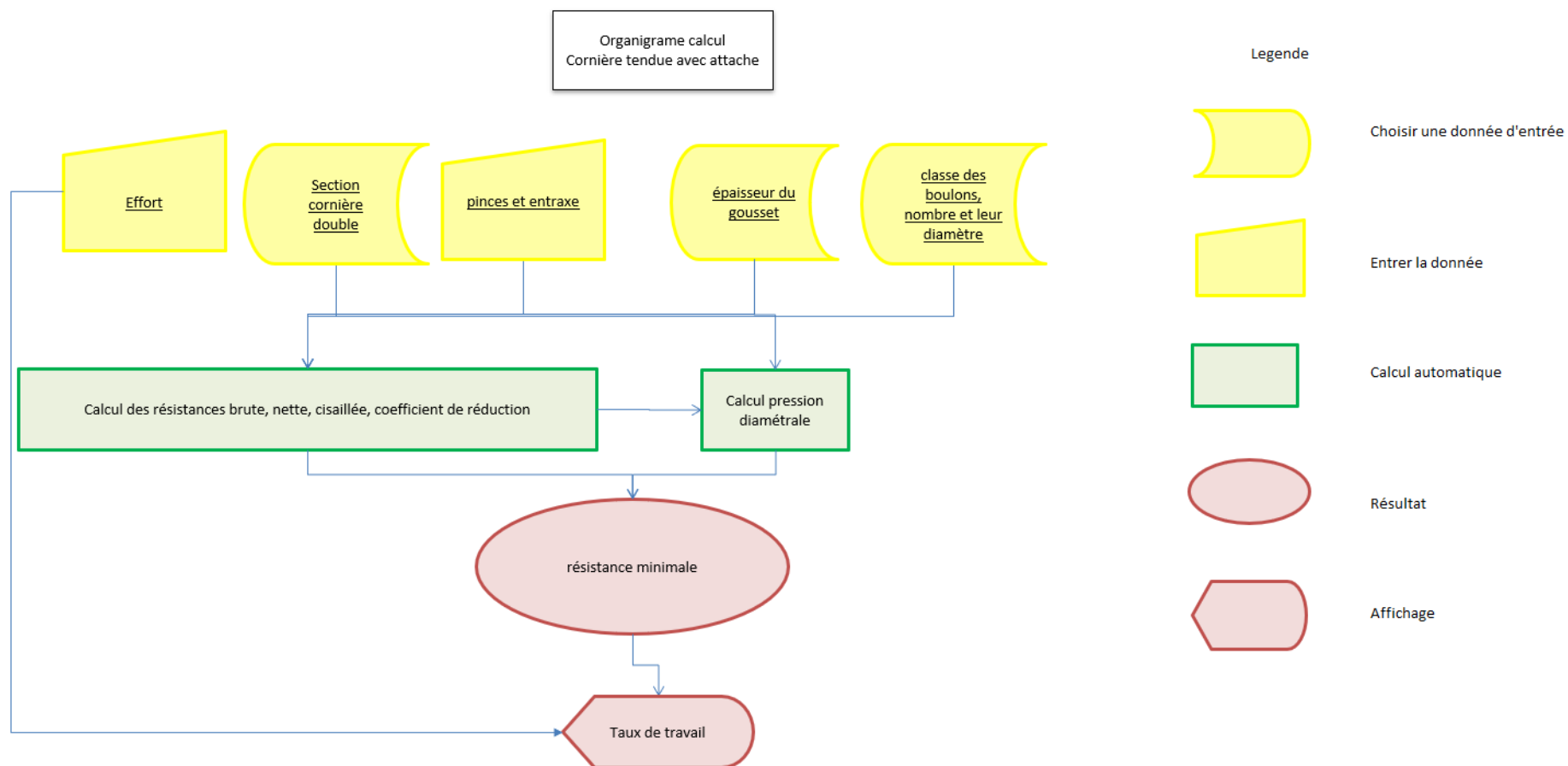


Figure 20 : fonctionnement technique du module de calcul de résistance à la traction

7. Exemple de synthèse de résultat

SYNTHÈSE DE RESULTAT ELU-																					

Figure 21 : exemple de synthèse de calcul à froid des diagonales en traction

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

I. Résultats

L'utilitaire a été mis à l'épreuve sur deux bâtiments : l'un en construction et l'autre encore à la phase des études. Les résultats ont été comparés à la fois à ceux de Robot, mais aussi à ceux d'une revue du CTICM puis validés par des calculateurs expérimentés du Bureau d'étude Hemery. Toutes ces étapes pour s'assurer de la fiabilité de l'outil.

1. Comparaison assemblage Robot et utilitaire

Des assemblages identiques à ceux de la figure ci-dessous ont été modélisés sur Robot et les résultats ont été comparés avec ceux de l'utilitaire. La note de calcul pour les cornières de 120 se trouve en annexe (Annexe 3)

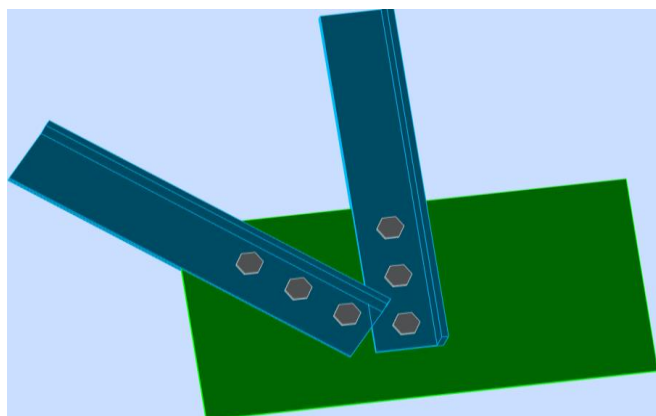


Figure 22 : Assemblage de double cornière sur gousset

Tableau 4 : Résultats des calculs d'assemblage sur Robot et sur l'utilitaire

Assemblage	Robot		Utilitaire			
	Pression diamétrale sur barre	Pression diamétrale sur gousset	Pression diamétrale sur barre	Pression diamétrale sur gousset	Écart (pression sur barre)	Écart (pression sur gousset)
2 CAE 100x10 +3bls 8.8 M20 (e=50, p=100)	22121 daN	14600 daN	21818 daN	14400 daN	0,69%	0,69%
2 CAE 120x12 +3bls 8.8 M24 (e=50, p=100)	26954 daN	17520 daN	26585 daN	17280 daN	0,69%	0,69%
2 CAE 60x6 +3bls 8.8 M16 (e=30, p=60)	7787 daN	10058 daN	7680 daN	9920 daN	0,69%	0,69%
2 CAE 40x4 +3bls 8.8 M12 (e=20, p=50)	3594 daN	8760 daN	3028 daN	8126 daN	8,54%	3,76%

En comparant les résultats de la modélisation de nos assemblages sur robot et ceux calculés par l'utilitaire élaboré, on constate que l'écart entre les valeurs est inférieur à 1% pour la majorité, mais avoisine les 10% pour l'assemblage des cornières de 40. Cette différence s'explique en partie par le fait que pour dans le calcul de ces résistances dans l'utilitaire, on tient compte du fait que les trous sont surdimensionnés ($d+2\text{mm}$ au lieu de $d+1\text{mm}$) par conséquent comme le préconise la *NF EN 1993-1-8 tableau 3.4 clause 1* la résistance doit être réduite de 20%. La différence de 1% est quant à elle lié aux coefficients α_b et k_1 . Aussi, il est important d'ajouter que les valeurs comparées dans ce tableau sont celles qui déterminent la résistance de l'assemblage pour un même chargement.

2. Exemple du bâtiment H de Bal à montoir de Bretagne

Ce bâtiment (Figure 33) est un bâtiment de 120m par 30m constitué de 12 travées de 10m. il a une hauteur sous membrure basse de 7m. Il est constitué de 11 portiques treillis en doubles cornières boulonnées de type N. Il ne fait l'objet d'aucune vérification à la stabilité au feu.

a) Hypothèses de calcul

✓ Conditions climatiques

- Neige	région A1
- Vent	région 3
- Site	Normal
- Bâtiment	fermé
- Zone de rugosité	IIIb

✓ Charges sismiques

- Zone sismique	3 - Modérée
- Catégorie d'importance..	II
- Classe de sol :	E (selon étude de sol reçue le 8/10)

✓ Charges permanentes

- Étanchéité bicouche	40 kg/m ² (150 mm d'isolant)
- Bardage	Double peau portant sur 5 m minimum
- Plancher	220 kg/m ² (selon épaisseur dalle 11 cm)

✓ Surcharges d'exploitation

- Surcharge d'entretien	suiivant normes
-------------------------------	-----------------

- Électricité, luminaire divers 5 kg/m²
- Plancher 350 kg/m²
- Panneaux solaires en toiture 20 kg/m²

Le dimensionnement des barres (montant et diagonale) de ce bâtiment à travers le logiciel de calcul Robot a donné les résultats suivants :

b) *Modélisation du portique et du chargement*

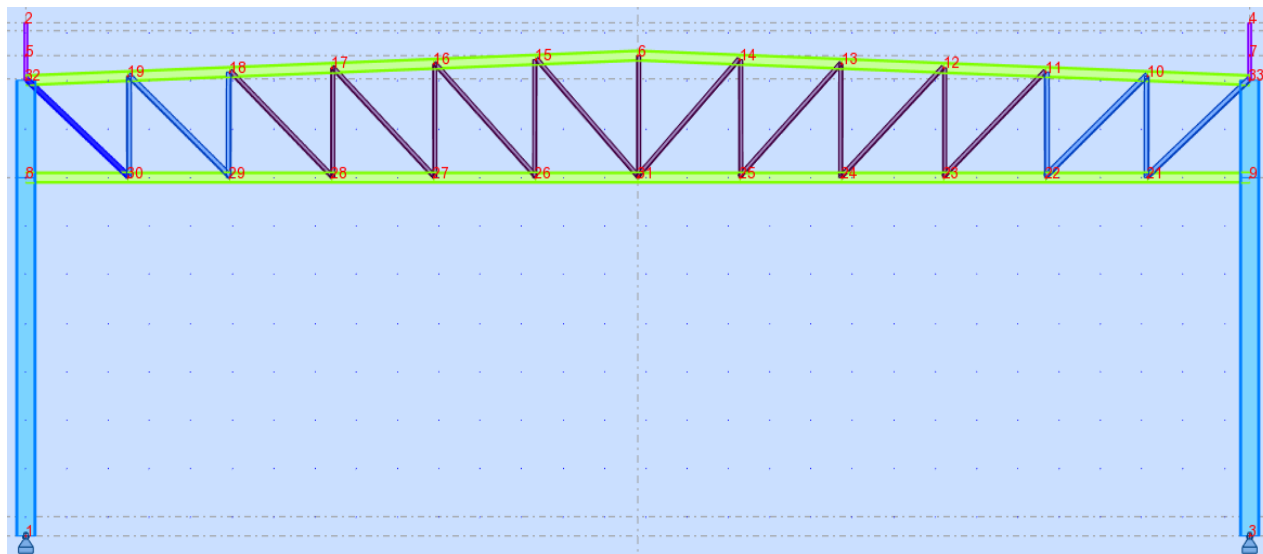


Figure 23 : Portique Bâtiment H

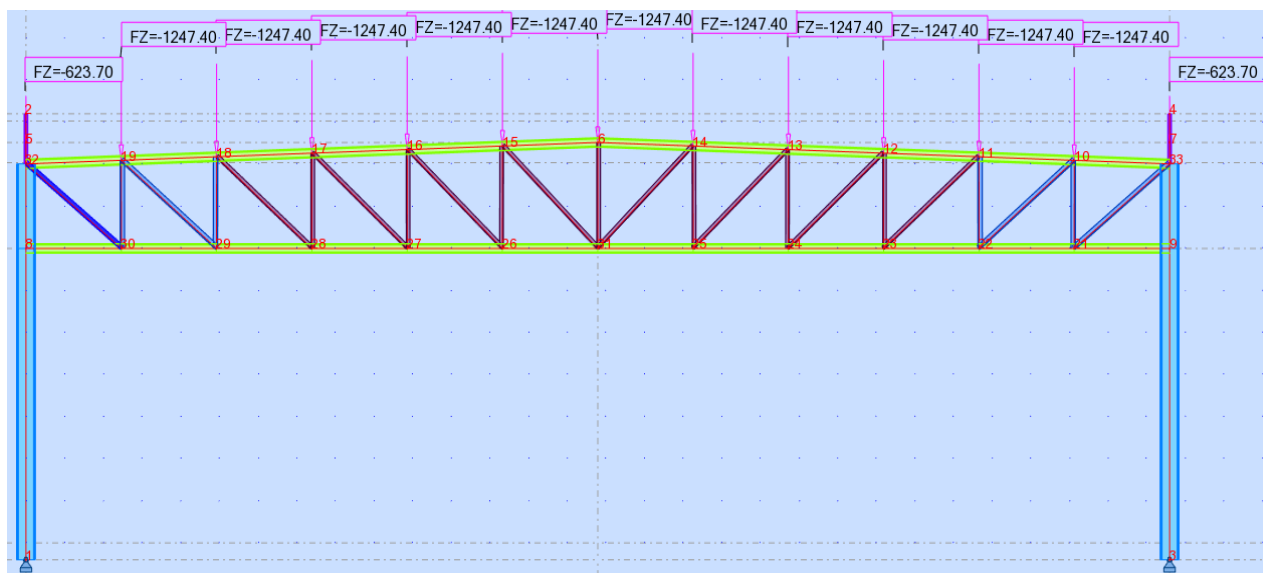


Figure 24 : charge permanente

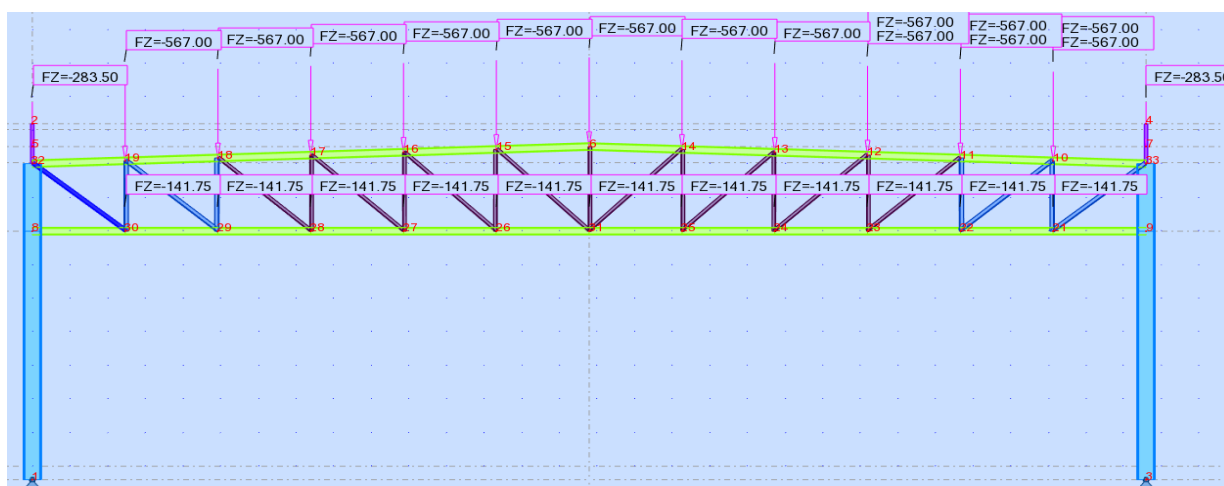


Figure 25 : Charges d'exploitation

Une fois les différentes charges appliquées à notre bâtiment et les efforts de neige et vent générés par robot, on affiche les différents efforts internes dans nos barres de treillis.

Tableau 5 : Tableau des efforts de traction et de compression dans les barres du treillis bâtiment H

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	Sections
1/ 32/ ELU-	-42403,17	2 CAE 70x7
1/ 30/ ELU-	-42288,07	2 CAE 70x7
3/ 19/ ELU-	-36678,51	2 CAE 70x7
3/ 29/ ELU-	-36558,54	2 CAE 70x7
5/ 18/ ELU-	-24870,02	2 CAE 70x7
5/ 28/ ELU-	-24783,22	2 CAE 70x7
7/ 17/ ELU-	-16659,74	2 CAE 70x7
7/ 27/ ELU-	-16569,55	2 CAE 70x7
9/ 16/ ELU-	-8234,22	2 CAE 70x7
9/ 26/ ELU-	-8140,65	2 CAE 70x7
11/ 15/ ELU-	-2141,71	2 CAE 70x7
11/ 31/ ELU-	-2045,81	2 CAE 70x7
13/ 31/ ELU-	-1670,35	2 CAE 70x7
13/ 14/ ELU-	-1766,25	2 CAE 70x7
15/ 25/ ELU-	-7256,75	2 CAE 70x7
15/ 13/ ELU-	-7350,32	2 CAE 70x7
17/ 24/ ELU-	-15664,76	2 CAE 70x7
17/ 12/ ELU-	-15754,95	2 CAE 70x7
19/ 23/ ELU-	-24665,53	2 CAE 70x7
19/ 11/ ELU-	-24752,33	2 CAE 70x7
21/ 22/ ELU-	-37395,97	2 CAE 70x7
21/ 10/ ELU-	-37515,94	2 CAE 70x7
23/ 21/ ELU-	-43930,14	2 CAE 70x7
23/ 33/ ELU-	-44045,24	2 CAE 70x7

Barre/Noeud/Cas	FX [daN]	Sections
2/19/ELU+	29471,4	2 CAE 70x7
2/30/ELU+	29591,37	2 CAE 70x7
4/18/ELU+	22330,17	2 CAE 70x7
4/29/ELU+	22455,01	2 CAE 70x7
6/17/ELU+	16202,58	2 CAE 70x7
6/28/ELU+	16292,76	2 CAE 70x7
8/16/ELU+	10711,64	2 CAE 70x7
8/27/ELU+	10805,21	2 CAE 70x7
10/15/ELU+	5227,3	2 CAE 70x7
10/26/ELU+	5324,26	2 CAE 70x7
12/6/ELU+	193,14	2 CAE 70x7
12/31/ELU+	267,46	2 CAE 70x7
14/14/ELU+	4616,01	2 CAE 70x7
14/25/ELU+	4712,97	2 CAE 70x7
16/13/ELU+	10091,98	2 CAE 70x7
16/24/ELU+	10185,56	2 CAE 70x7
18/12/ELU+	16140,21	2 CAE 70x7
18/23/ELU+	16230,4	2 CAE 70x7
20/11/ELU+	22864,16	2 CAE 70x7
20/22/ELU+	22988,99	2 CAE 70x7
22/10/ELU+	30559,29	2 CAE 70x7
22/21/ELU+	30679,25	2 CAE 70x7

c) Dimensionnement des cornières double à partir de l'utilitaire élaboré

Pour le dimensionnement sur l'utilitaire, il faut définir les paramètres d'entrée à savoir :

- S235 pour la nuance d'acier ;
- Tous les goussets seront en épaisseur 10mm ;
- La résistance à la traction sera prise à 360MPa.

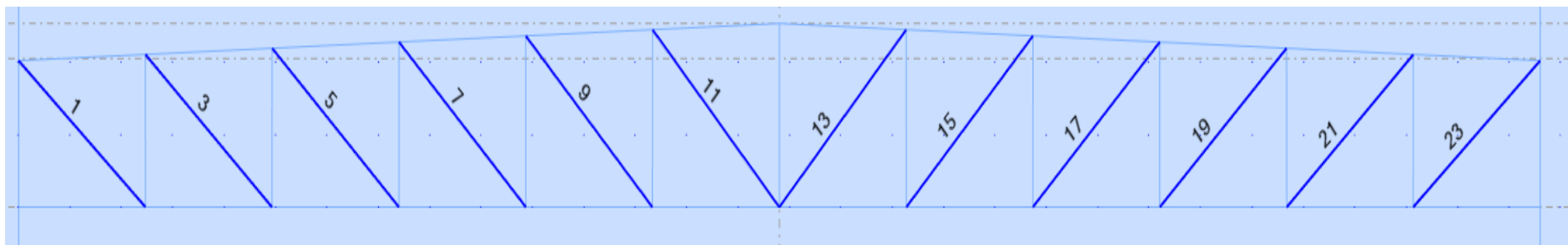


Figure 26 : Liste des barres en tractions

Tableau 6 : Résultat du dimensionnement des barres en traction

N° de barre	Efforts (daN)	Section de cornière	Épaisseur gousset	e1	e2	p1	Classe	Diamètre (mm)	Nombre de boulons	e2g	Résistance mini	Taux de travail
1/ 32/ ELU-	42403,17	2 CAE 90x9	10 mm	40 mm	45 mm	80 mm	8.8	20	4	70 mm	49630 daN	85%
3/ 19/ ELU-	36678,51	2 CAE 80x8	10 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	70 mm	38618 daN	95%
5/ 18/ ELU-	24870,02	2 CAE 70x7	10 mm	35 mm	35 mm	70 mm	8.8	20	3	70 mm	26341 daN	94%
7/ 17/ ELU-	16659,74	2 CAE 70x7	10 mm	35 mm	35 mm	70 mm	8.8	20	2	70 mm	18515 daN	90%
9/ 16/ ELU-	8234,22	2 CAE 70x7	10 mm	35 mm	35 mm	70 mm	8.8	20	2	70 mm	18515 daN	44%
11/ 15/ ELU-	2141,71	2 CAE 60x6	10 mm	35 mm	30 mm	70 mm	8.8	16	2	70 mm	16328,20 daN	13%
13/ 14/ ELU-	1766,25	2 CAE 60x6	10 mm	35 mm	30 mm	70 mm	8.8	16	2	30 mm	16328,20 daN	11%
15/ 13/ ELU-	7350,32	2 CAE 70x7	10 mm	35 mm	35 mm	70 mm	8.8	20	2	70 mm	18515 daN	40%
17/ 12/ ELU-	15754,95	2 CAE 70x7	10 mm	35 mm	35 mm	70 mm	8.8	20	2	70 mm	18514,67 daN	85%
19/ 11/ ELU-	24752,33	2 CAE 70x7	10 mm	35 mm	35 mm	70 mm	8.8	20	3	70 mm	26341 daN	94%
21/ 10/ ELU-	37515,94	2 CAE 80x8	10 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	70 mm	38618,18 daN	97%
23/ 33/ ELU-	44045,24	2 CAE 90x9	10 mm	40 mm	45 mm	80 mm	8.8	20	4	70 mm	49630,25 daN	89%

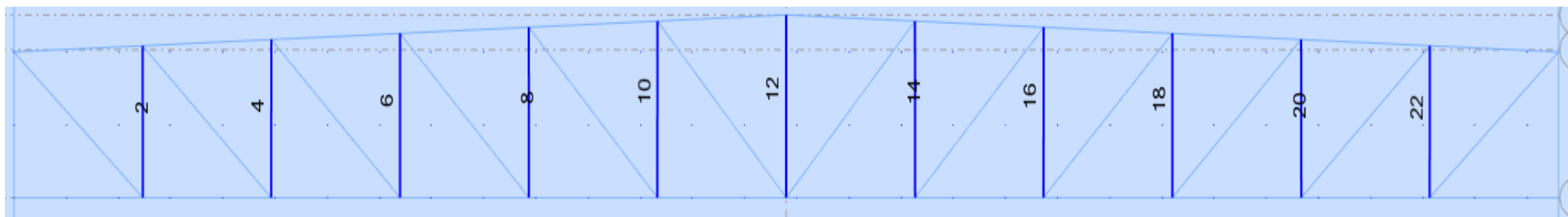


Figure 27 : Liste des barres en Compression

Tableau 7 : Résultat du dimensionnement des barres en compression

N° de barre	Efforts (daN)	Section de cornière	Épaisseur entretoise	Nombre d'entretoises	e1	e2	p1	Classe	Diamètre boulons	Nombre de boulons	e2g	Longueur	Taux de travail	Résistance mini
2/30/ELU+	29591,37	2 CAE 80x8	10 mm	2	40 mm	40 mm	80 mm	8.8	20	3	40 mm	2100 mm	81%	36436,36 daN
4/29/ELU+	22455,01	2 CAE 70x7	10 mm	2	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	20	3	30 mm	2180 mm	94%	23797,71 daN
6/28/ELU+	16292,76	2 CAE 70x7	10 mm	2	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	20	2	30 mm	2270 mm	77%	21248,93 daN
8/27/ELU+	10805,21	2 CAE 60x6	10 mm	2	40 mm	30 mm	80 mm	8.8	16	2	30 mm	2350 mm	85%	12704,53 daN
10/26/ELU+	5324,26	2 CAE 50x5	10 mm	2	40 mm	25 mm	80 mm	8.8	16	2	30 mm	2440 mm	87%	6152,68 daN
12/31/ELU+	267,46	2 CAE 40x4	10 mm	2	40 mm	20 mm	80 mm	8.8	12	2	30 mm	2520 mm	11%	2498,29 daN
14/25/ELU+	4712,97	2 CAE 60x6	10 mm	2	40 mm	30 mm	80 mm	8.8	16	2	30 mm	2440 mm	39%	11984,73 daN
16/24/ELU+	10185,56	2 CAE 60x6	10 mm	2	40 mm	30 mm	80 mm	8.8	16	2	30 mm	2350 mm	80%	12704,53 daN
18/23/ELU+	16230,4	2 CAE 70x7	10 mm	2	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	20	2	30 mm	2270 mm	76%	21248,93 daN
20/22/ELU+	22988,99	2 CAE 70x7	10 mm	2	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	20	3	30 mm	2180 mm	97%	23797,71 daN
22/21/ELU+	30679,25	2 CAE 80x8	10 mm	2	40 mm	40 mm	80 mm	8.8	20	3	35 mm	2100 mm	84%	36436,36 daN

Une fois les résultats obtenus, nous les avons comparés avec la note de calcul rédigée par un chargé d'affaires confirmé. Il en ressort de cette comparaison les points suivants :

Tableau 8 : Résultat de la note de calcul du projet

N° Barre	Cornières Projet	Cornières Utilitaire	Épaisseur gousset (mm)	e1 (mm)	e2 (mm)
1	2CAE 90x9	2 CAE 90x9	10	40	45
2	2CAE 80x8	2 CAE 80x8	10	40	40
3	2CAE 80x8	2 CAE 80x8	10	40	40
4	2CAE 70x7	2 CAE 70x7	10	40	35
5	2CAE 70x7	2 CAE 70x7	10	40	35
6	2CAE 70x7	2 CAE 70x7	10	40	35
7	2CAE 60x6	2 CAE 70x7	10	40	30
8	2CAE 60x6	2 CAE 60x6	10	40	30
9	2CAE 60x6	2 CAE 70x7	10	40	30
10	2CAE 60x6	2 CAE 50x5	10	40	30
11	2CAE 60x6	2 CAE 60x6	10	40	30
12	2CAE 70x7	2 CAE 40x4	10	40	35
13	2CAE 60x6	2 CAE 60x6	10	40	30
14	2CAE 60x6	2 CAE 60x6	10	40	30
15	2CAE 60x6	2 CAE 70x7	10	40	30
16	2CAE 60x6	2 CAE 60x6	10	40	30
17	2CAE 60x6	2 CAE 70x7	10	40	30
18	2CAE 70x7	2 CAE 70x7	10	40	35
19	2CAE 70x7	2 CAE 70x7	10	40	35
20	2CAE 70x7	2 CAE 70x7	10	40	35
21	2CAE 80x8	2 CAE 80x8	10	40	40
22	2CAE 80x8	2 CAE 80x8	10	40	40
23	2CAE 90x9	2 CAE 90x9	10	40	45

Les résultats obtenus lors de l'utilisation de l'utilitaire pour le dimensionnement des cornières et les valeurs retenues par le calculateur pour ce même projet, on constate des similitudes au niveau des sections, mais aussi quelques différences. Ces différences s'expliquent par le fait que pour les approvisionnements, le chargé d'affaires a opté pour quatre (4) sections. Cette décision vise aussi à uniformiser et à faciliter la mise en œuvre du treillis tout en assurant la sécurité et sa stabilité.

Les barres 11, 12 et 13 étant situées dans la partie centrale du treillis se retrouvent moins chargées que les autres elles ont été surdimensionnées.

3. Exemple du bâtiment DLB traiteur à Pleumeleuc

Il s'agit d'un bâtiment avec 4 familles de portique treillis en double cornière boulonnée qui fait aussi

l'objet d'une vérification à la stabilité au feu R15. Les barres de treillis de ce projet ont toutes été dimensionnées avec l'utilitaire de calcul élaboré, mais pour une bonne lisibilité nous présenterons que les calculs de la troisième famille de portique.

a) Hypothèses de calcul

Il s'agit de portique avec une échancrure de barres pour permettre le passage. Ils mesurent 5,90m sous la membrure basse et ont un plénum d'environ 2,70m de haut.

Les données du projet sont :

✓ Conditions climatiques

- Neige	région A1
- Vent.....	région 2
- Site	Normal
- Bâtiment.....	fermé
- Zone de rugosité.....	IIIb

✓ Charges sismiques

- Zone sismique	2
- Catégorie d'importance..	II
- Classe de sol :	A

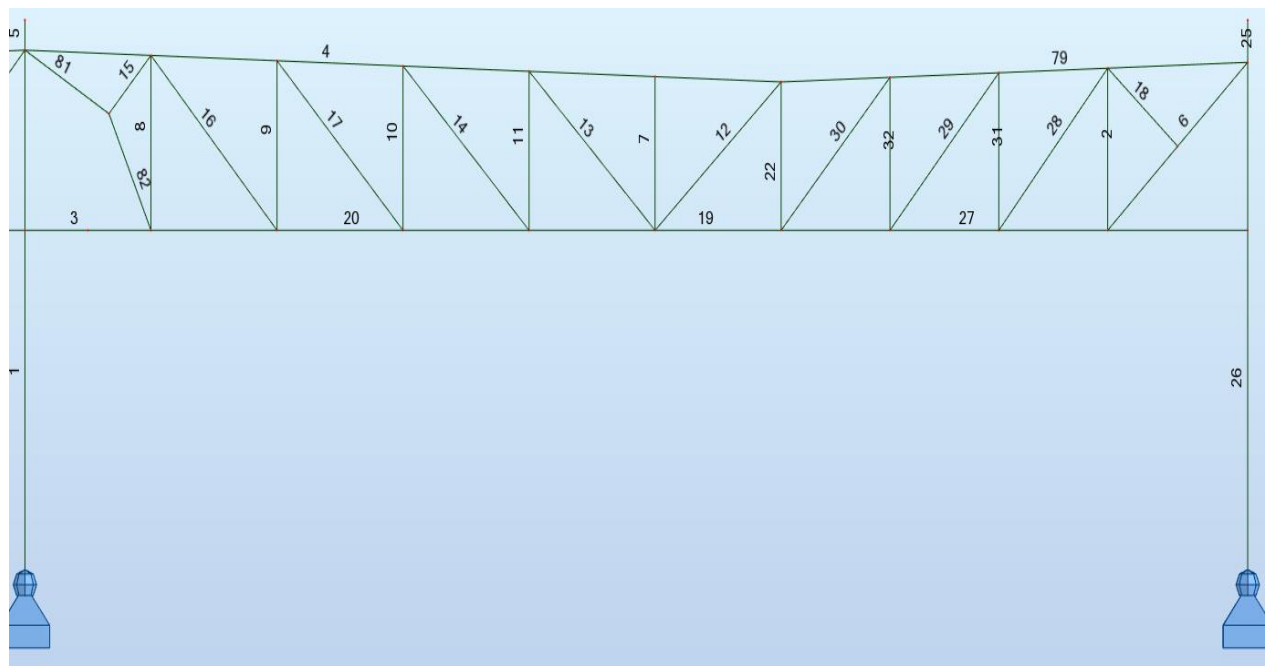
✓ Charges permanentes

- Étanchéité bicouche	28 kg/m ² (140 mm d'isolant)
- Bardage	Double peau portant sur 5 m minimum
- Plancher	210 kg/m ² (selon épaisseur dalle 11 cm)

✓ Surcharges d'exploitation

- Surcharge d'entretien	suivant normes
- Électricité, luminaire divers	5 kg/m ²
- Plancher	350 kg/m ²
- Panneaux solaires en toiture	20 kg/m ²

b) Efforts dans la troisième famille de portique



Une fois le portique modélisé (sur robot), les charges appliquées et les efforts de vent générés, on en ressort les efforts dans les différentes barres concernées (diagonales et montants).

Tableau 9 : efforts dans les barres (famille 3)

Barre/nœud/cas	Effort (daN)	Section
2/25/ELU+	16043,7	2 CAE 80x8
7/9/ELU+	2783,41	2 CAE 80x8
8/13/ELU+	47637,51	2 CAE 90x9
9/12/ELU+	19076,67	2 CAE 80x8
10/11/ELU+	13923,08	2 CAE 80x8
11/10/ELU+	8897,78	2 CAE 70x7
22/6/ELU+	4211,85	2 CAE 80x8
31/28/ELU+	12282,06	2 CAE 80x8
32/29/ELU+	8704,6	2 CAE 80x8

Barre/nœud/cas	Effort (daN)	Section
2/25/FEU+	7403,44	2 CAE 80x8
7/9/FEU+	1193,68	2 CAE 80x8
8/13/FEU+	21135,88	2 CAE 90x9
9/12/FEU+	8399,32	2 CAE 80x8
10/11/FEU+	6108,04	2 CAE 80x8
11/10/FEU+	3927,24	2 CAE 70x7
22/6/FEU+	1542,2	2 CAE 80x8
31/28/FEU+	5355,52	2 CAE 80x8
32/29/FEU+	3600,85	2 CAE 80x8

Barre/nœud/cas	Effort (daN)	Section
6/2/ELU-	28345,55	2 CAE 80x8
12/8/ELU-	882,32	2 CAE 70x7
13/15/ELU-	9366,8	2 CAE 80x8
14/16/ELU-	16820,05	2 CAE 80x8

Barre/nœud/cas	Effort (daN)	Section
6/2/FEU-	13163,38	2 CAE 80x8
12/9/FEU-	501,88	2 CAE 70x7
13/15/FEU-	4204,51	2 CAE 80x8
14/16/FEU-	7495,04	2 CAE 80x8

15/18/ELU-	32318,81	2 CAE 80x8
16/18/ELU-	29675,4	2 CAE 80x8
17/17/ELU-	22972,85	2 CAE 70x7
18/22/ELU-	76,55	2 CAE 80x8
28/22/ELU-	19019,6	2 CAE 70x7
29/26/ELU-	14767,27	2 CAE 70x7
30/27/ELU-	9043,46	2 CAE 70x7
81/7/ELU-	53698,25	2 CAE 80x8
82/77/ELU-	53698,25	2 CAE 80x8

15/18/FEU-	14422,79	2 CAE 80x8
16/18/FEU-	13216,5	2 CAE 80x8
17/17/FEU-	10230,17	2 CAE 70x7
18/22/FEU-	49,52	2 CAE 80x8
28/22/FEU-	8418,2	2 CAE 70x7
29/26/FEU-	6299,69	2 CAE 70x7
30/27/FEU-	3752,08	2 CAE 70x7
81/7/FEU-	23948,26	2 CAE 80x8
82/77/FEU-	25201,97	2 CAE 80x8

c) Dimensionnement des barres du portique sur l'utilitaire

Les données d'entrées pour ce projet sont les suivantes :

- Acier : S235 galvanisé à chaud ;
- Tous les goussets seront en épaisseur 12mm ;
- La résistance à la traction sera prise à 360MPa.

Une fois les efforts renseignés dans l'utilitaire de calcul, nous avons fait varier les paramètres de dimensionnement cités dans Mise en place de l'utilitaire de calcul et nous avons obtenus les résultats suivants :

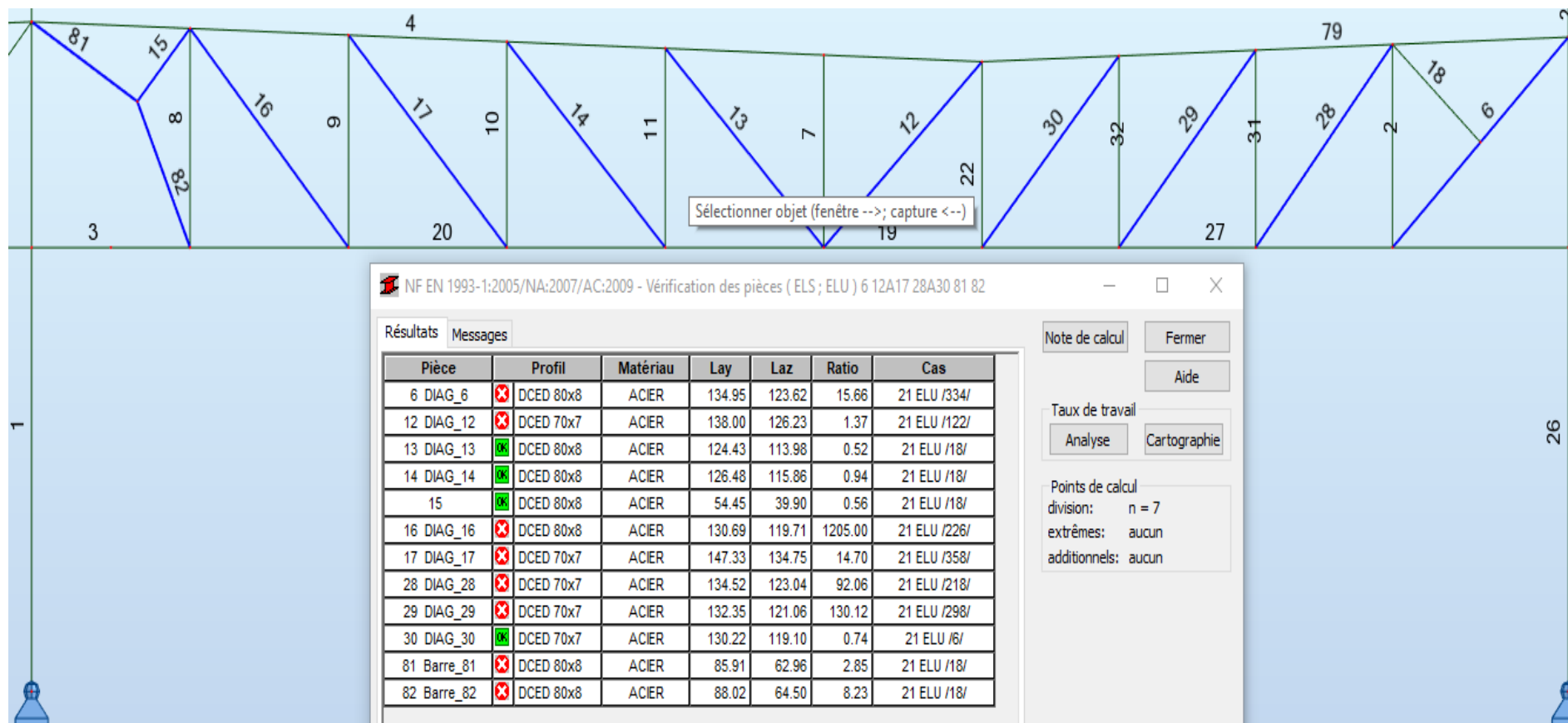


Figure 28 : Résultat du dimensionnement des barres sur Robot

Tableau 10 : Dimensionnement des sections de barres en traction (portique famille 3)

N° de barre	Efforts	Section de cornière	Épaisseur gousset	e1	e2	Lg	p1	Classe	Diamètre (mm)	Nombre de boulons	e2g	Résistance mini	Taux de travail
6	28346	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	41826 daN	68%
12	883	2 CAE 50x5	12 mm	35 mm	25 mm	400 mm	70 mm	8.8	16	3	35 mm	14976 daN	6%
13	9367	2 CAE 60x6	12 mm	35 mm	30 mm	400 mm	70 mm	8.8	16	3	35 mm	22387 daN	42%
14	16821	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	3	45 mm	31280 daN	54%
15	32319	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	41826 daN	77%
16	29676	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	41825,98 daN	71%
17	22973	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	31279,94 daN	73%
18	77	2 CAE 50x5	12 mm	35 mm	25 mm	400 mm	70 mm	8.8	20	2	35 mm	10269 daN	1%
28	19020	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	3	45 mm	31279,94 daN	61%
29	14768	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	3	45 mm	31280 daN	47%
30	9044	2 CAE 60x6	12 mm	35 mm	30 mm	400 mm	70 mm	8.8	16	3	35 mm	22387,20 daN	40%
81	53699	2 CAE 90x9	12 mm	45 mm	45 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	53884,28 daN	100%
82	53699	2 CAE 90x9	12 mm	45 mm	45 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	53884,28 daN	100%

Tableau 11 : vérification au feu des sections de barres en traction (portique famille 3)

N° de barre	Efforts en situation d'incendie	Section de cornière	Épaisseur gousset	e1	e2	Lg	p1	Classe	Diamètre (mm)	Nombre de boulons	e2g	Résistance mini au feu	Taux de travail au feu
6	13164	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	17034 daN	77%
12	502	2 CAE 50x5	12 mm	35 mm	25 mm	400 mm	70 mm	8.8	16	3	35 mm	3706 daN	14%
13	4205	2 CAE 60x6	12 mm	35 mm	30 mm	400 mm	70 mm	8.8	16	3	35 mm	6165 daN	68%
14	7496	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	3	45 mm	9984 daN	75%
15	14423	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	17034 daN	85%
16	13217	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	17034 daN	78%
17	10231	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	11721 daN	87%
18	50	2 CAE 50x5	12 mm	35 mm	25 mm	400 mm	70 mm	8.8	20	2	35 mm	2541 daN	2%
28	8419	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	3	45 mm	9984 daN	84%
29	6300	2 CAE 70x7	12 mm	45 mm	35 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	3	45 mm	9984 daN	63%
30	3753	2 CAE 60x6	12 mm	35 mm	30 mm	400 mm	70 mm	8.8	16	3	35 mm	6165 daN	61%
81	23949	2 CAE 90x9	12 mm	45 mm	45 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	26263 daN	91%
82	25202	2 CAE 90x9	12 mm	45 mm	45 mm	400 mm	90 mm	8.8	20	4	45 mm	26263 daN	96%

Pour les barres en traction, en comparant les résultats du logiciel Robot Structural Analysis et ceux de l'utilitaire, on s'aperçoit que 8 barres sur 12 ne sont pas conformes au dimensionnement au feu selon Robot tant dis que sur l'utilitaire, elles sont conformes excepté les barres 81 et 82. Cette différence est due aux considérations faites par Robot pour le calcul de la résistance au feu. Les différents facteurs qui peuvent influencer ces résultats sont : la valeur de l'émissivité, et les surfaces exposées au feu considéré. Ces éléments sont essentiels pour le calcul des coefficients de réduction pour les limites ($k_{y,\theta}$; $k_{E,\theta}$; $k_{p,\theta}$).

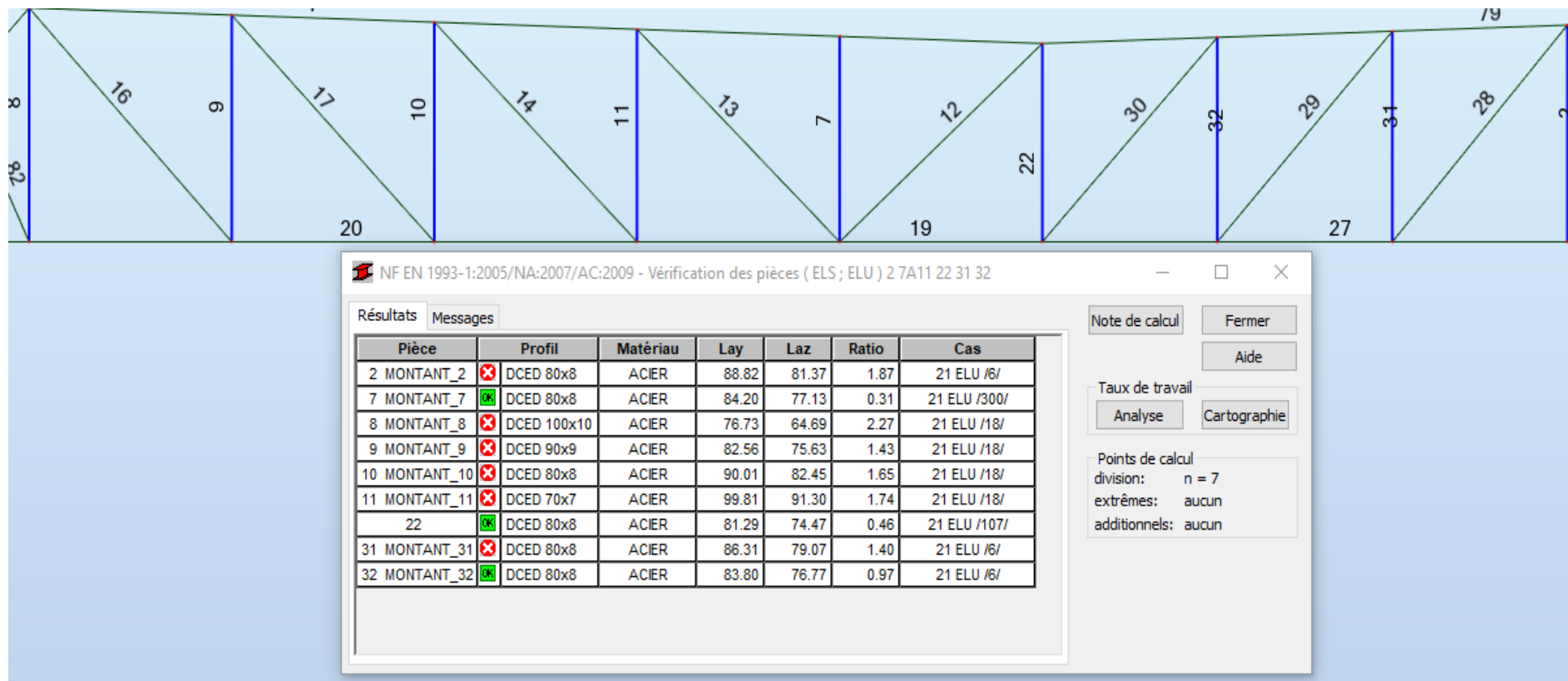


Figure 29 : Résultat du dimensionnement des barres en compression sur Robot

Tableau 12 : dimensionnement à froid des montants du treillis 3

N° de barre	Efforts	Section de cornière	Épaisseur entretoise	e1	e2	p1	Classe	Diamètre boulons	Nombre de boulons	Lg	e2g	Longueur	Taux de travail
2	16044	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2700 mm	57%
7	2784	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2560 mm	9%

8	46520	2 CAE 100x10	12 mm	45 mm	50 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2910 mm	100%
9	19077	2 CAE 90x9	12 mm	45 mm	45 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2820 mm	49%
10	13924	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2740 mm	51%
11	8898	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2650 mm	31%
22	4212	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2470 mm	13%
31	12283	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2620 mm	42%
32	8705	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2550 mm	29%

Tableau 13 : vérification au feu des montants du treillis 3

N° de barre	Efforts	Section de cornière	Épaisseur entretoise	e1	e2	p1	Classe	Diamètre boulons	Nombre de boulons	Lg	e2g	Longueur	Taux de travail au feu
2	7404	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2700 mm	100%
7	1194	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2560 mm	15%
8	21136	2 CAE 100x10	12 mm	45 mm	50 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2910 mm	84%
9	8400	2 CAE 90x9	12 mm	45 mm	45 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2820 mm	60%
10	6109	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2740 mm	84%
11	3928	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2650 mm	52%
22	1543	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2470 mm	18%
31	5356	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2620 mm	69%
32	3601	2 CAE 80x8	12 mm	45 mm	40 mm	90 mm	8.8	20	3	400 mm	45 mm	2550 mm	45%

Six (6) des barres en compression ne sont pas vérifiées en situation d'incendie selon le calcul de Robot. Ces mêmes barres avec notre modèle de calcul résistent en situation d'incendie avec un taux de travail de 55% en moyenne. Cette différence de résultat est liée au périmètre exposé au feu des cornières. Ce périmètre est considéré dans robot comme étant celui des deux cornières en entièreté négligeant ainsi un facteur de recouvrement qui permet aux cornières d'être protégées sur une de leurs ailes.

II. Discussion

Pour ce qui concerne le calcul des assemblages, on remarque qu'il y'a une différence (1% environ) de résultat entre les valeurs de robot et celles de notre utilitaire. En effet, cette différence peut être liée au fait que robot utilise la pince transversale en lieu et place de la pince longitudinale pour le calcul des coefficients α_b comme le préconise l'EN1993 1-8. Aussi, en lieu et place de la pince transversale dans le calcul du coefficient k_1 , robot utilise la pince longitudinale.

Ces écarts de 1%, 3.8% et de 10% entre les valeurs que génèrent Robot et celles calculées au travers de l'utilitaire sont plutôt satisfaisants, car les vérifications faites par notre outil sont basées sur les prescriptions de la NF EN 1993 et pour certains cas de figure comme le calcul de l'assemblage des cornières de 40, les données d'entrées sont exactement les mêmes, mais les considérations faites par le logiciel sont différentes des nôtres notamment le diamètre de perçage. En considérant un diamètre de perçage ($d_0 = d+1$) pour les boulons de diamètre 12mm, on obtient un écart de 1% entre les valeurs de robot et celles de l'utilitaire.

Après comparaison de nos résultats de dimensionnement des cornières en traction/compression avec le logiciel de calcul Robot structural, une différence majeure est à noter en ce qui concerne la résistance au feu des barres. En effet, pour certaines barres, la stabilité au feu R15 n'est pas vérifiée sur le logiciel robot structural. Cette non-conformité que nous avons réussi à déterminer se situe à deux niveaux :

- Le premier élément plus évident est celui de la valeur de l'émissivité considérée par robot. Cette émissivité est prise par défaut égale à la valeur de **0,63**. Robot n'intègre donc pas encore la considération de la galvanisation des aciers à chaud. La valeur de l'émissivité pour l'acier galvanisé selon les récentes publications du CTICM est prise égale à **0,35** quand la température est inférieure aux 500°C et **0,7** une fois qu'elle est supérieure aux 500°C.
- Pour le second élément de différence, il s'agit de la considération du périmètre exposé au feu. Ce périmètre est pris égal à tout le périmètre de chaque cornière ce qui n'est pas vrai pour les éléments assemblés dos à dos. Le fait de considérer le périmètre de toute la cornière comme étant le périmètre exposé au feu a pour effet d'entraîner un échauffement très rapide des éléments et donc une température critique largement supérieure à la réalité.

En modifiant la valeur de l'émissivité sur Robot pour les aciers non galvanisés, nous avons réussi à chiffrer un écart de température d'au moins 20 degrés Celsius. Cet écart qui varie en fonction de la section de double cornière considérée et est à la base de la réduction de la résistance en situation d'incendie.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Au terme de notre étude qui avait pour objectif principal d'élaborer un outil de calcul des treillis en doubles cornières boulonnées calcul (des doubles cornières et de leurs attaches), nous pouvons affirmer que les résultats obtenus sont très satisfaisants. En effet, à travers une recherche bibliographique poussée, nous avons pu élaborer un outil qui tient compte des Eurocodes et des dernières avancées dans le domaine du calcul au feu des charpentes galvanisées à chaud. Cette recherche bibliographique nous a permis de découvrir de nouvelles méthodes de calcul le plus réaliste possible quant au scénario de l'échauffement des éléments exposés.

Cet outil a été automatisé pour les cornières à ailes égales afin de prendre en compte les différents types de combinaison d'assemblage pour une rangée de boulons, différentes sections de gousset et classe de boulon.

Aussi, force est de constater certaines différences entre les résultats du logiciel Robot fréquemment utilisé dans le domaine des calculs de structures et ceux obtenus par l'utilitaire élaboré. Ces différences se situent notamment au niveau des coefficients αb et k_1 dans le calcul des assemblages boulonnés.

Les différentes combinaisons d'assemblages sont vérifiées en compression, traction et à une exposition au feu R15.

En somme, ce projet a permis de mettre à disposition du bureau d'études un outil de calcul fiable et adapté à leur pratique habituelle, mais aussi très malléable. Il pourra être mis à jour quand les nouvelles normes seront publiées. Il a permis de réduire le temps de calcul des barres de treillis et leurs attaches de plus de moitié tout en générant des résultats conformes aux normes et recommandations. Cependant, des progrès restent à faire dans le calcul des treillis notamment pour ce qui concerne la longueur d flambement à considérer pour les barres jumelées en compression.

Ce projet à travers la création de l'utilitaire nous a été très bénéfique notamment pour comprendre le fonctionnement des assemblages des cornières sur gousset, mais aussi au niveau des vérifications des résistances en situation d'incendie.

BIBLIOGRAPHIE

- NF EN 1991-1-2 (Juillet 2003) : actions générales - actions sur les structures exposées au feu
- NF EN 1993-1-1 (août 2013) : Calcul des structures en acier - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments - Annexe nationale à la NF EN 1993-1-1
- NF EN 1993-1-2 (Novembre 2005) : Règles générales — Calcul du comportement au feu
- NF EN 1993-1-8 (Décembre 2005) : Calcul des assemblages
- PROJET SKILLS : Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée Partie 5 : Conception et calcul des structures à treillis
- PROJET SKILLS : Bâtiments en acier à simple rez-de-chaussée Partie 6 : Conception et calcul des poteaux composés
- Gisèle BIHINA (2021), Ossature en acier : Méthode de justification d'une stabilité au feu de ¼ heure (R15)
- I.Ryan (CTICM), «Exemple de calcul selon l'EN 1993-1-8,» Revue CMI n°2 - 2007.
- A.Bureau, P.-L. Chouzenoux (CTICM), «Méthode simplifiée pour la vérification de barres comprimées composées de deux cornières assemblées dos-à-dos,» Revue CMI n°4 - 2010.
- Technique de l'ingénieur : Composants métalliques tendus et comprimés par Maël COUCHAUX
- Recommandations de la CNC2M : recommandations pour le dimensionnement des assemblages selon la NF EN 1993-1-8 avril 2015
- NCCI : Résistance au cisaillement d'un assemblage à gousset SN017a-FR-EU

ANNEXES

Annexe 1 : méthode complète de calcul de cornières jumelées dos à dos en compression

Annexe 2 : Standard Hemery-Hervieux

Annexe 3 : Note de calcul Robot assemblage cornière de 120 avec 3 boulons 8.8 M24

Annexe 4 : Exemple de sortie de la feuille de calcul

Annexe 5 : Quelques plans d'exécution des bâtiments cités

Annexe 1 : méthode complète de calcul de cornières jumelées dos à dos en compression

Notation

e_0 : amplitude de l'imperfection géométrique équivalente de l'élément composé

I_u : moment d'inertie de flexion d'une cornière par rapport à l'axe principal de plus forte inertie

I_v : moment d'inertie de flexion d'une cornière par rapport à l'axe principal de plus faible inertie

I_T : inertie de torsion de la section d'une cornière

I_W : inertie de gauchissement de la section d'une cornière.

u_0 : distance du centre de cisaillement au centre de gravité de la section d'une cornière

S_V : rigidité de cisaillement de l'élément composé

$W_{el,u}$: module élastique de résistance en flexion par rapport à l'axe de plus forte inertie

$W_{el,v}$: module élastique de résistance en flexion par rapport à l'axe de plus faible inertie

Calcul des efforts dans une membrure

Calcul du facteur d'imperfection de l'élément composé

Le facteur d'imperfection est calculé selon l'EN 1993-1-1 §6.4.1.

$$e_0 = \frac{L}{500}$$

L : Longueur de la barre

Moment d'inertie de flexion efficace

$$I_{eff} = 0,5 \times h_0^2 \times A_{ch} + 2\mu I_{ch}$$

Si : $\lambda \leq 75$ $\mu = 1$

Si : $75 \leq \lambda \leq 150$ $\mu = 2 - \frac{\lambda}{75}$

Si : $150 \leq \lambda$ $\mu = 0$

$$\lambda = \frac{L}{I_0}$$

$$I_0 = \sqrt{\frac{0,5 \times h_0^2 \times A_{ch} + 2I_{ch}}{2A_{ch}}}$$

Effort normal critique

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L^2}$$

Rigidité de cisaillement

$$S_V = \frac{2\pi^2 EI_{ch}}{a^2}$$

Moment fléchissant maximal à mi-longueur de l'élément

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} \times e_0}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{Cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_V}}$$

Effort de compression maximal dans une membrure

$$N_{ch,Ed} = 0,5 \times N_{Ed} + \frac{M_{Ed} \times h_0 \times A_{ch}}{2I_{eff}}$$

Effort tranchant maximal dans l'élément composé

$$V_{Ed} = \frac{\pi M_{Ed}}{L}$$

Moment de flexion local

$$M_{ch,Ed} = \frac{aV_{Ed}}{4}$$

$$M_{u,Ed} = M_{ch,Ed} \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)$$

$$M_{v,Ed} = M_{ch,Ed} \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)$$

Vérification de la stabilité locale de la membrure

Vérification de la résistance de la section de la cornière

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{ch,Ed}}{A_{ch}} + \frac{M_{u,Ed}}{W_{el,u}} + \frac{M_{v,Ed}}{W_{el,v}}$$

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Flambement par flexion par rapport à l'axe de forte inertie

$$N_{cr,u} = \frac{\pi^2 EI_u}{a^2}$$

$$\bar{\lambda}_u = \sqrt{\frac{A_{ch} \times f_y}{N_{cr,u}}}$$

$$N_{b,u,Rd} = \frac{\chi_u \times A \times f_y}{\gamma_{M1}}$$

Flambement par flexion par rapport à l'axe de faible inertie

$$N_{cr,v} = \frac{\pi^2 E I_v}{a^2}$$

$$\bar{\lambda}_v = \sqrt{\frac{A_{ch} \times f_y}{N_{cr,v}}}$$

$$N_{b,v,Rd} = \frac{\chi_v \times A \times f_y}{\gamma_{M1}}$$

Flambement par flexion torsion

$$N_{cr,T} = \frac{A_{ch}}{I_0} \left(G I_T + \frac{\pi^2 E I_w}{a^2} \right)$$

$$I_0 = I_u + I_v + u_0^2 A_{ch}$$

$$N_{cr,TF} = \frac{I_0}{2(I_u + I_v)} \left(N_{cr,u} + N_{cr,T} - \sqrt{(N_{cr,u} + N_{cr,T})^2 - 4 N_{cr,u} N_{cr,T} \frac{I_u + I_v}{I_0}} \right)$$

$$\bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{ch} \times f_y}{N_{cr,TF}}}$$

$$N_{b,TF,Rd} = \frac{\chi_{TF} \times A \times f_y}{\gamma_{M1}}$$

Résistance au flambement en compression

$$N_{b,Rd} = \min (N_{b,TF,Rd} ; N_{b,v,Rd} ; N_{b,u,Rd})$$

Annexe 2 : Standard Hemery-Hervieux

- Assemblage

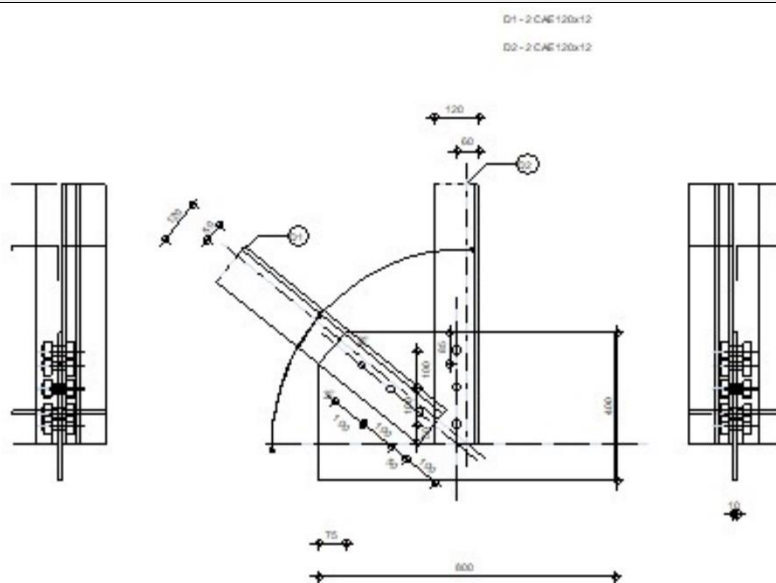
Sections	Nombre de boulons	Diamètre de boulon
2 CAE 40X4	2	M12
	3	
2 CAE 50X5	2	M16
	3	
2 CAE 60X6	2	M16
	3	
2 CAE 70X7	3	M20
2 CAE 80X8	3	M20
	4	
2 CAE 90X9	4	
2 CAE 100X10	4	M20
	5	
2 CAE 120X12	4	M24
	5	

- Pinces et entraxes

Diamètre de boulon	e1 (mm)	p1 (mm)
M12	25	50
M16	30	60
M20	35	70
M24	50	100

Annexe 3 : Note de calcul Robot assemblage cornière de 120 avec 3 boulons 8.8 M24

	Autodesk Robot Structural Analysis Professional 2018 Calcul de l'assemblage au gousset NF EN 1993-1-8:2005/NA:2007/AC:2009	
		Ratio 0,88



Général

Assemblage N°: 1
 Nom de l'assemblage : Gousset - contreventement
 Noeud de la structure: 30
 Barres de la structure: 1, 2,

Géométrie

Barres

	Barre 1	Barre 2				
Barre N°:	1	2				
Profilé:	2 CAE 120x12	2 CAE 120x12				
h	120	120				mm
b _f	120	120				mm
t _w	12	12				mm
t _f	12	12				mm
r	13	13				mm
A	5508,00	5508,00				mm ²
Matériau:	ACIER E24	ACIER E24				

		Barre 1	Barre 2				
	f_y	23500000,00	23500000,00				daN/m ²
	f_u	36500000,00	36500000,00				daN/m ²
Angle	α	39,13750	90,09116				Deg
Longueur	l	0,00	0,00				m

Boulons

Barre 1

Le plan de cisaillement passe par la partie FILETÉE du boulon

Classe = 8.8 Classe du boulon
 $d = 24$ [mm] Diamètre du boulon
 $d_0 = 26$ [mm] Diamètre du trou de boulon
 $A_s = 353,00$ [mm²] Aire de la section efficace du boulon
 $A_v = 452,39$ [mm²] Aire de la section du boulon
 $f_{yb} = 55000000,00$ [daN/m²] Limite de plasticité
 $f_{ub} = 80000000,00$ [daN/m²] Résistance du boulon à la traction
 $n = 3$ Nombre de colonnes des boulons

Espacement des boulons 100;100 [mm]

$e_1 = 50$ [mm] Distance du centre de gravité du premier boulon de l'extrémité de la barre
 $e_2 = 50$ [mm] Distance de l'axe des boulons du bord de la barre
 $e_c = 100$ [mm] Distance de l'extrémité de la barre du point d'intersection des axes des barres

Barre 2

Le plan de cisaillement passe par la partie FILETÉE du boulon

Classe = 8.8 Classe du boulon
 $d = 24$ [mm] Diamètre du boulon
 $d_0 = 26$ [mm] Diamètre du trou de boulon
 $A_s = 353,00$ [mm²] Aire de la section efficace du boulon
 $A_v = 452,39$ [mm²] Aire de la section du boulon
 $f_{yb} = 55000000,00$ [daN/m²] Limite de plasticité
 $f_{ub} = 80000000,00$ [daN/m²] Résistance du boulon à la traction
 $n = 3$ Nombre de colonnes des boulons

Espacement des boulons 100;100 [mm]

$e_1 = 50$ [mm] Distance du centre de gravité du premier boulon de l'extrémité de la barre
 $e_2 = 60$ [mm] Distance de l'axe des boulons du bord de la barre
 $e_c = 0$ [mm] Distance de l'extrémité de la barre du point d'intersection des axes des barres

Gousset

$l_p = 800$ [mm] Longueur de la platine
 $h_p = 400$ [mm] Hauteur de la platine
 $t_p = 10$ [mm] Epaisseur de la platine

Paramètres

$h_1 =$	75	[mm]	Grugeage
$v_1 =$	85	[mm]	Grugeage
$h_2 =$	0	[mm]	Grugeage
$v_2 =$	0	[mm]	Grugeage
$h_3 =$	0	[mm]	Grugeage
$v_3 =$	0	[mm]	Grugeage
$h_4 =$	0	[mm]	Grugeage
$v_4 =$	0	[mm]	Grugeage

Centre de gravité de la tôle par rapport au centre de gravité des barres (4 ; 98)

$e_v =$	100	[mm]	Distance verticale de l'extrémité du gousset du point d'intersection des axes des barres
$e_H =$	400	[mm]	Distance horizontale de l'extrémité du gousset du point d'intersection des axes des barres

Matériau: ACIER E24

$f_y =$ 23500000,00 [daN/m²] Résistance

Coefficients de matériau

$\gamma_{M0} =$	1,00	Coefficient de sécurité partiel	[2.2]
$\gamma_{M2} =$	1,25	Coefficient de sécurité partiel	[2.2]

Efforts

Cas: 21: ELU /310/ 1*1.35 + 2*1.05 + 8*0.90 + 20*1.50

$N_{b1,Ed} =$	42184,43	[daN]	Effort axial
$N_{b2,Ed} =$	-29515,60	[daN]	Effort axial

Résultats

Barre 1

Résistance des boulons

$F_{v,Rd} =$	27110,40	[daN]	Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement	$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot m / \gamma_{M2}$
--------------	----------	-------	---	---

Pression du boulon sur la barre

Direction x

$k_{1x} =$	2,50	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$
------------	------	--	---

$k_{1x} > 0.0$	2,50 > 0,00	vérifié
----------------	-------------	---------

$\alpha_{bx} =$	0,64	Coefficient dépendant de l'espacement des boulons	$\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$
-----------------	------	---	--

$\alpha_{bx} > 0.0$	0,64 > 0,00	vérifié
---------------------	-------------	---------

$F_{b,Rd1x} =$	26953,8	[daN]	Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou	$F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$
----------------	---------	-------	--	---

Direction z

$k_{1z} =$	2,50	Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$	$k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$
------------	------	--	--

$k_{1z} > 0.0$	2,50 > 0,00	vérifié
----------------	-------------	---------

$\alpha_{bz} = 0,64$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bz} > 0.0$ $0,64 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd1z} = 26953,85$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale $F_{b,Rd1z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la platine

Direction x

$k_{1x} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_1 = \min[2.8*(e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1x} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bx} = 1,00$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3*d_0), p_1/(3*d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bx} > 0.0$ $1,00 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd2x} = 17520,0$ [daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou $F_{b,Rd2x} = k_1 * \alpha_b * f_u * d * t / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8*(e_1/d_0) - 1.7, 1.4*(p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1z} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ **vérifié**

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3*d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bz} > 0.0$ $1,00 > 0,00$ **vérifié**

$F_{b,Rd2z} = 17520,00$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale $F_{b,Rd2z} = k_{1z} * \alpha_{bz} * f_u * d * t / \gamma_{M2}$

Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons

cisaillement des boulons

$e = 16$ [mm] Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons

$M_0 = 676,40$ [daN*m] Moment fléchissant réel $M_0 = N_{b1,Ed} * e$

$F_{NSd} = 14061,48$ [daN] Force résultante dans le boulon due à l'influence de l'effort axial $F_{NSd} = N_{b1,Ed} / n$

$F_{MSd} = 3381,99$ [daN] Effort composant dans le boulon dû à l'influence du moment $F_{MSd} = M_0 * X_{max} / \sum X_i^2$

$F_{x,Ed} = 14061,48$ [daN] Effort de calcul total dans le boulon sur la direction x $F_{x,Ed} = F_{NSd}$

$F_{z,Ed} = 3381,99$ [daN] Effort de calcul total dans le boulon sur la direction z $F_{z,Ed} = F_{MSd}$

$F_{Ed} = 14462,47$ [daN] Effort tranchant résultant dans le boulon $F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$

$F_{Rdx} = 17520,00$ [daN] Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction x $F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$

$F_{Rdz} = 17520,00$ [daN] Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction z $F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$

$|F_{x,Ed}| \leq F_{Rdx}$ $|14061,48| < 17520,00$ **vérifié** (0,80)

$|F_{z,Ed}| \leq F_{Rdz}$ $|3381,99| < 17520,00$ **vérifié** (0,19)

$F_{Ed} \leq F_{vRd}$ $14462,47 < 27110,40$ **vérifié** (0,53)

Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous

$\beta_3 = 0,61$ Coefficient de réduction [Tableau 3.8]

$A = 2754,00$ [mm²] Aire de la section transversale de la cornière

$A_{net} = 2442,00$ [mm²] Aire de la section nette $A_{net} = A - d_0 * t_{f1}$

$N_{u,Rd} = 43332,35$ [daN] Résistance de calcul de la section nette $N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u1}) / \gamma_{M2}$

$N_{pl,Rd} = 58247,10$ [daN] Résistance de calcul plastique de la section brute $N_{pl,Rd} = (0.9 * A * f_{y1}) / \gamma_{M2}$

$ 0.5 \cdot N_{b1,Ed} \leq N_{u,Rd}$	$ 21092,22 < 43332,35$	vérifié	(0,49)
$ 0.5 \cdot N_{b1,Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$ 21092,22 < 58247,10$	vérifié	(0,36)

Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc

$A_{nt} = 684,00$ [mm²] Aire nette de la zone de la section en traction

$A_{nv} = 2220,00$ [mm²] Aire de la zone de la section en traction

$V_{effRd} = 40106,76$ [daN] Résistance de calcul de la section affaiblie par les trous $V_{effRd} = 0.5 \cdot f_u \cdot A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}$

$ 0.5 \cdot N_{b1,Ed} \leq V_{effRd}$	$ 21092,22 < 40106,76$	vérifié	(0,53)
--	-------------------------	---------	--------

Barre 2

Résistance des boulons

$F_{v,Rd} = 27110,40$ [daN] Résistance de la tige d'un boulon au cisaillement

$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot f_{ub} \cdot A_s \cdot m / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la barre

Direction x

$k_{1x} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1x} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ vérifié

$\alpha_{bx} = 0,64$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bx} > 0.0$ $0,64 > 0,00$ vérifié

$F_{b,Rd1x} = 26953,85$ [daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou $F_{b,Rd1x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1z} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ vérifié

$\alpha_{bz} = 0,77$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bz} > 0.0$ $0,77 > 0,00$ vérifié

$F_{b,Rd1z} = 32344,62$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale $F_{b,Rd1z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Pression du boulon sur la platine

Direction x

$k_{1x} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1x} = \min[2.8 \cdot (e_2/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1x} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ vérifié

$\alpha_{bx} = 0,64$ Coefficient dépendant de l'espacement des boulons $\alpha_{bx} = \min[e_1/(3 \cdot d_0), p_1/(3 \cdot d_0) - 0.25, f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bx} > 0.0$ $0,64 > 0,00$ vérifié

$F_{b,Rd2x} = 11230,85$ [daN] Résistance de calcul à l'état limite de plastification de la paroi du trou $F_{b,Rd2x} = k_{1x} \cdot \alpha_{bx} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Direction z

$k_{1z} = 2,50$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $k_{1z} = \min[2.8 \cdot (e_1/d_0) - 1.7, 1.4 \cdot (p_1/d_0) - 1.7, 2.5]$

$k_{1z} > 0.0$ $2,50 > 0,00$ vérifié

$\alpha_{bz} = 1,00$ Coefficient pour le calcul de $F_{b,Rd}$ $\alpha_{bz} = \min[e_2/(3 \cdot d_0), f_{ub}/f_u, 1]$

$\alpha_{bz} > 0.0$ $1,00 > 0,00$ vérifié

$F_{b,Rd2z} = 17520,00$ [daN] Résistance d'un boulon en pression diamétrale $F_{b,Rd2z} = k_{1z} \cdot \alpha_{bz} \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{M2}$

Vérification de l'assemblage pour les efforts agissant sur les boulons

cisaillement des boulons

$e =$	26 [mm]	Excentricité de l'effort axial par rapport à l'axe des boulons	
$M_0 =$	-768,42 [daN*m]	Moment fléchissant réel	$M_0 = N_{b2,Ed} * e$
$F_{NSd} =$	9838,53 [daN]	Force résultante dans le boulon due à l'influence de l'effort axial	$F_{NSd} = N_{b2,Ed} / n$
$F_{MSd} =$	3842,09 [daN]	Effort composant dans le boulon dû à l'influence du moment	$F_{MSd} = M_0 * X_{max} / \sum X_i^2$
$F_{x,Ed} =$	9838,53 [daN]	Effort de calcul total dans le boulon sur la direction x	$F_{x,Ed} = F_{NSd}$
$F_{z,Ed} =$	3842,09 [daN]	Effort de calcul total dans le boulon sur la direction z	$F_{z,Ed} = F_{MSd}$
$F_{Ed} =$	10562,12 [daN]	Effort tranchant résultant dans le boulon	$F_{Ed} = \sqrt{F_{x,Ed}^2 + F_{z,Ed}^2}$
$F_{Rdx} =$	11230,85 [daN]	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction x	$F_{Rdx} = \min(F_{bRd1x}, F_{bRd2x})$
$F_{Rdz} =$	17520,00 [daN]	Résistance résultante de calcul du boulon sur la direction z	$F_{Rdz} = \min(F_{bRd1z}, F_{bRd2z})$

$ F_{x,Ed} \leq F_{Rdx}$	$ -9838,53 < 11230,85$	vérifié	(0,88)
$ F_{z,Ed} \leq F_{Rdz}$	$ -3842,09 < 17520,00$	vérifié	(0,22)
$F_{Ed} \leq F_{VRd}$	$10562,12 < 27110,40$	vérifié	(0,39)

Vérification de la section de la poutre affaiblie par les trous

$\beta_3 =$	0,61	Coefficient de réduction	[Tableau 3.8]
$A =$	2754,00 [mm ²]	Aire de la section transversale de la cornière	
$A_{net} =$	2442,00 [mm ²]	Aire de la section nette	$A_{net} = A - d_0 * t_{r2}$
$N_{u,Rd} =$	43332,35 [daN]	Résistance de calcul de la section nette	$N_{u,Rd} = (\beta_3 * A_{net} * f_{u2}) / \gamma_{M2}$
$N_{pl,Rd} =$	58247,10 [daN]	Résistance de calcul plastique de la section brute	$N_{pl,Rd} = (0.9 * A * f_{y2}) / \gamma_{M2}$
$ 0.5 * N_{b2,Ed} \leq N_{u,Rd}$	$ -14757,80 < 43332,35$	vérifié	(0,34)
$ 0.5 * N_{b2,Ed} \leq N_{pl,Rd}$	$ -14757,80 < 58247,10$	vérifié	(0,25)

Vérification de la barre pour le cisaillement de bloc

$A_{nt} =$	564,00 [mm ²]	Aire nette de la zone de la section en traction	
$A_{nv} =$	2220,00 [mm ²]	Aire de la zone de la section en traction	
$V_{effRd} =$	38354,76 [daN]	Résistance de calcul de la section affaiblie par les trous	$V_{effRd} = 0.5 * f_u * A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) * f_y * A_{nv} / \gamma_{M0}$

$A_{nt} = 564,00 \text{ [mm}^2 \text{]}$ Aire nette de la zone de la section en traction

$|0.5 \cdot N_{b2,Ed}| \leq V_{effRd}$ $|-14757,80| < 38354,76$ **vérifié** (0,38)

Assemblage satisfaisant vis à vis de la Norme	Ratio	0,88
--	-------	------

Annexe 4 : Exemple de sortie de la feuille de calcul

[illegible]

Figure 30 : Calcul de la résistance au feu

		Cornières	Nuance Fu	235 360		Gousset	nuance Fu	235 360	alpha teta	0,65						γ_{m1}	1
			Nombre de cornière	2		m	2		galva ?	Oui						γ_{m2}	1,25
																γ_{m0}	1
																γ_{mfi}	1
			Gousset														
N° de barre	Efforts	Section de cornière	épaisseur entretoise	nombre d'entretoise	e1	e2	p1	classe	Diamètre boulons	nombre de boulon	Lg	e2g	15i	50i	Longueur	Espacement entretoise	Taux de travail au feu
6/8/FEU+	10053,29	2 CAE 90x9	12 mm	5	40 mm	45 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	45 mm	264 mm	878 mm	2500 mm	23,7 i	67%
6/24/FEU+	10092,88	2 CAE 80x8	12 mm	5	40 mm	40 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	40 mm	234 mm	781 mm	2500 mm	26,7 i	122%
7/9/FEU+	7491,77	2 CAE 70x7	12 mm	5	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	20	3	210 mm	35 mm	205 mm	682 mm	2500 mm	30,5 i	191%
7/25/FEU+	7523,34	2 CAE 70x7	12 mm	5	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	20	3	210 mm	35 mm	205 mm	682 mm	2500 mm	30,5 i	192%
8/10/FEU+	5435,32	2 CAE 70x7	12 mm	5	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	35 mm	205 mm	682 mm	2500 mm	30,5 i	139%
8/26/FEU+	5468,12	2 CAE 70x7	12 mm	5	40 mm	35 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	35 mm	205 mm	682 mm	2500 mm	30,5 i	139%
9/11/FEU+	3405,57	2 CAE 60x6	12 mm	5	40 mm	30 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	30 mm	175 mm	584 mm	2500 mm	35,6 i	195%
9/27/FEU+	3430,58	2 CAE 60x6	12 mm	5	40 mm	30 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	30 mm	175 mm	584 mm	2500 mm	35,6 i	196%
10/12/FEU+	1576,08	2 CAE 60x6	12 mm	5	40 mm	30 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	30 mm	175 mm	584 mm	2500 mm	35,6 i	90%
10/28/FEU+	1601,99	2 CAE 60x6	12 mm	5	40 mm	30 mm	80 mm	8.8	16	3	210 mm	30 mm	175 mm	584 mm	2500 mm	35,6 i	92%

Figure 31 : Synthèse de résultats du Calcul de la résistance à la compression en situation d'incendie

	Cornières	Nuance Fu	235 360	Gousset		Nuance Fu	235 360	γ_{m2} γ_{m0}	1,25 1							
		m (plan de cisaillemen	2	Galva ?	Oui	nombre cornièr	2	γ_{mfi}	1							
Efforts en situation d'incendie	Section de cornière	épaisseur gousset	e1	e2	Lg	p1	Classe	Diamètr e (mm)	Nombre de boulon	e2g	Résistance mini fire	Température °c	Kb,teta	Ky,tet	Taux de travail au feu	
-16630,49	2 CAE 120x12	10 mm	40 mm	60 mm	600 mm	80 mm	8.8	20	3	60 mm	28067 daN	470,56	0,62	0,845	59%	
10092,88	2 CAE 70x7	10 mm	40 mm	35 mm	400 mm	80 mm	8.8	20	3	35 mm	7850 daN	639,70	0,17	0,375	129%	
7491,77	2 CAE 100x10	10 mm	40 mm	50 mm	400 mm	80 mm	8.8	20	3	50 mm	21025 daN	526,78	0,46	0,697	36%	
7523,34	2 CAE 80x8	10 mm	40 mm	40 mm	400 mm	80 mm	8.8	20	3	40 mm	9755 daN	604,84	0,21	0,458	77%	
5435,32	2 CAE 60x6	10 mm	40 mm	30 mm	400 mm	80 mm	8.8	16	3	30 mm	5381 daN	669,72	0,14	0,303	101%	
5468,12	2 CAE 60x6	10 mm	40 mm	30 mm	400 mm	80 mm	8.8	16	3	30 mm	5381 daN	669,72	0,14	0,303	102%	
3405,57	2 CAE 60x6	10 mm	40 mm	30 mm	400 mm	80 mm	8.8	16	3	30 mm	5381 daN	669,72	0,14	0,303	63%	
3430,58	2 CAE 60x6	10 mm	40 mm	30 mm	400 mm	80 mm	8.8	16	3	30 mm	5381 daN	669,72	0,14	0,303	64%	
1576,08	2 CAE 60x6	10 mm	40 mm	30 mm	400 mm	80 mm	8.8	16	3	30 mm	5381 daN	669,72	0,14	0,303	29%	
1601,99	2 CAE 60x6	10 mm	40 mm	30 mm	400 mm	80 mm	8.8	16	3	30 mm	5381 daN	669,72	0,14	0,303	30%	

Figure 32 : Synthèse de résultats du Calcul de la résistance à la traction en situation d'incendie

Annexe 5 : Quelques plans d'exécution des bâtiments cités

ELEVATION PORTIQUES FILES A a L - Ech:1/50

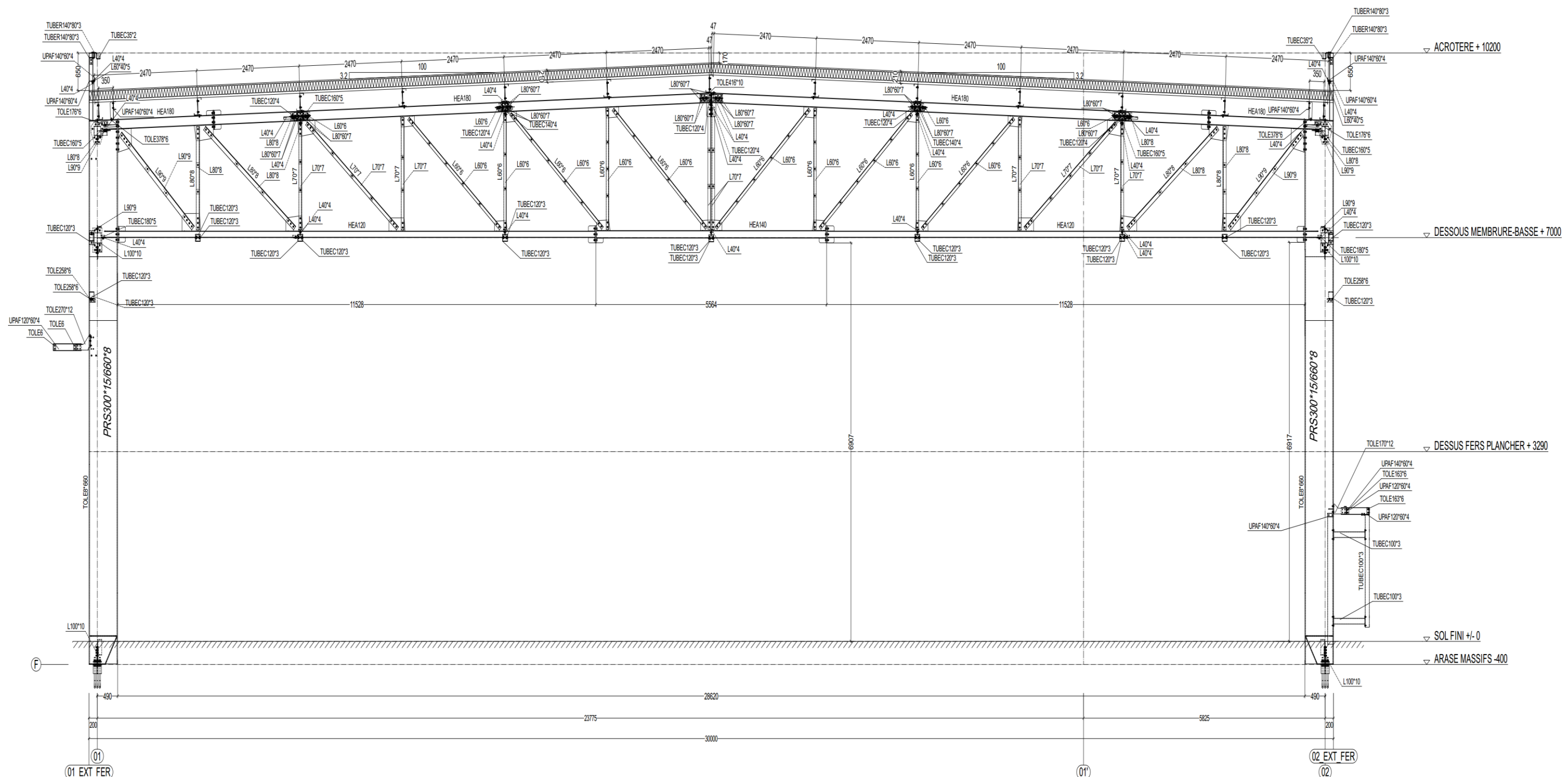
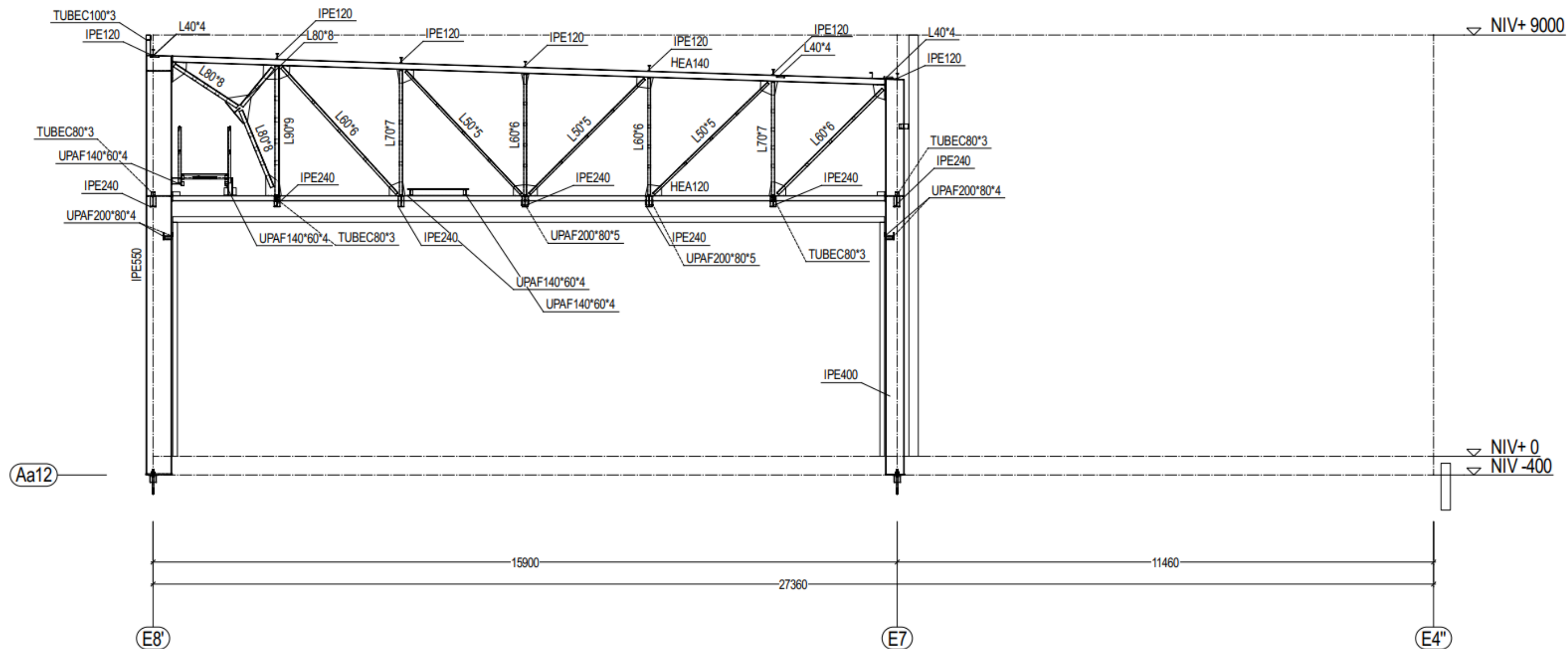


Figure 33 : élévation du bâtiment H à Montoir de Bretagne



COUPE FILE Aa12 Ech. 1:100

Figure 34 : coupe de la troisième famille de portique sans extension