

REALISATION D'UN MEMOIRE TECHNIQUE ET FINANCIER SUR LA CHARPENTE METALLIQUE

Projet de Fin d'Etudes

Etudiant

M. CABOCEL Tristan – Elève ingénieur en 5^{ème}
année

Tuteur entreprise

M. MACE Mikael – Cadre principale en Etude de Prix
Gros œuvre

Tuteur INSA

M. HOTTIER Jean-Michel



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier M. Thiébault CLEMENT, directeur technique et Caroline DELRIEU, des Ressources Humaines de l'entreprise Bouygues Bâtiment Ouvrages Publics pour m'avoir permis d'effectuer mon stage de fin d'études au sein de leur société.

Mes remerciements, vont ensuite à M. Jean-Yves CARRA, chef de service Etude de Prix Gros Œuvre de m'avoir accueilli au sein de son service.

Je remercie aussi Mikael MACE, mon tuteur au sein de l'entreprise, de m'avoir encadré et guidé tout au long de mon stage, sur mon projet d'étude comme sur les missions transverses qui m'ont été confiées.

Je tiens à remercier M. Jean-Michel HOTTIER, mon tuteur enseignant, pour sa disponibilité et les critiques qu'il a pu faire sur mon travail tout au long de mon stage.

Enfin, je remercie toute l'équipe du service Etude de Prix Gros Œuvre, et plus généralement tous les collaborateurs de la Direction Technique pour l'accueil qu'ils m'ont réservé et pour tous les moments passés ensemble.

RESUME

L'objectif de ce Projet de Fin d'Etudes, réalisé au sein du service Etude de Prix Gros Œuvre de Bouygues Bâtiment IdF – Ouvrages Publics, a été de réaliser un guide technique et financier sur la charpente métallique dans les bâtiments publics. L'entreprise, qui possède traditionnellement une culture béton, a pour objectif d'accroître sa maîtrise de la construction métallique. En effet, plus d'un tiers des projets étudiés aujourd'hui ont une partie Charpente Métallique.

Le rendu doit donc être structuré en deux parties. Une partie sera consacrée aux spécificités techniques de la charpente métallique, avec notamment les problématiques de conception/étude, de fabrication, de transport et de montage. La deuxième partie concerne le développement d'un outil de calcul de coût de charpente métallique pour le service Etude de Prix Gros Œuvre.

ABSTRACT

The main goal of this Final Year Project, made within the Price Study Of Shell of building department of Bouygues Bâtiment IdF – Ouvrages Publics, was to make a technical and financial guide of steel structures for public buildings. The company, which traditionally has a “concrete” approach of project, wants to improve its knowledge on the subject. Indeed, more than a third of the recent projects have a steel structure part.

The guide has to be structured in two parts. One is about technical specificities of steel structures, especially about the problematic of conception/sizing, manufacturing, transportation and mounting. The second part is the development of a cost calculation software for steel structures for the department.

Sommaire

REMERCIEMENTS	2
RESUME	3
ABSTRACT	3
INTRODUCTION	7
I. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE.....	8
1.1. Le groupe Bouygues	8
1.2. Bouygues Construction.....	8
1.3. Bouygues Bâtiment Ile-de-France	9
1.4. Bouygues Ouvrages Publics.....	10
1.5. Le service Etude de Prix Gros Œuvre.....	13
II. PRESENTATION DU PFE	14
2.1. Le besoin de l'entreprise	14
2.1.1. L'approche du lot Charpente Métallique	14
2.1.2. Besoin d'une nouvelle approche	14
2.2. Définition du sujet	15
2.3. Rendu attendu.....	15
2.4. Le mémoire technique	15
2.4.1. Cahier des charges.....	15
2.4.2. Organisation du mémoire	16
2.5. Le fichier de calcul de coût	18
2.5.1. Cahier des charges.....	18
2.5.2. Trame du logiciel	18
2.6. Organisation du travail.....	19
III. GUIDE TECHNIQUE SUR LA CM DANS LES BATIMENTS PUBLICS.....	21
3.1. Le matériau acier et les structures métalliques	21
3.1.1. Etendue du lot charpente métallique	21
3.1.2. Avantages et inconvénients de l'utilisation de l'acier	21
3.1.3. Les grand types de structure en CM.....	22
3.1.4. Planification d'un projet de CM.....	26
3.2. Conception de la CM	28
3.2.1. Les différentes phases d'études	28

3.2.2.	Principe de conception de charpente métallique	28
3.2.3.	Les assemblages	29
3.2.4.	Liaisons et structures.....	29
3.2.5.	Ordre de prix des principaux types de structures métalliques	31
3.3.	Consultation d'entreprise.....	31
3.4.	Fourniture et fabrication de l'acier	32
3.4.1.	Déroulement des opérations de fabrication	32
3.4.2.	Fourniture de l'acier	33
3.4.3.	Fabrication et assemblage en atelier	34
3.4.4.	Montage en atelier.....	35
3.5.	Protection contre la corrosion	36
3.5.1.	Généralités	36
3.5.2.	Préparation des surfaces.....	36
3.5.3.	Galvanisation à chaud	37
3.5.4.	Peinture anticorrosion.....	37
3.5.5.	Métallisation par projection.....	38
3.5.6.	Pas de protection anticorrosion	39
3.6.	Protection contre le feu	39
3.6.1.	Généralités	39
3.6.2.	Protection au feu de l'acier	41
3.6.3.	Protection par flocage	41
3.6.4.	Peinture intumescente	42
3.6.5.	Constructions mixtes.....	42
3.6.6.	Protection par écrans	43
	RESUME DES SYSTEMES DE PROTECTIONS	44
3.7.	Transport de la CM.....	45
3.7.1.	Corrélation entre planning de montage / de livraison.....	45
3.7.2.	Dimension et chargement limite du moyen de transport.....	45
3.7.3.	Coût du transport.....	45
3.8.	Montage de la CM	46
3.8.1.	Programme de montage et méthodologie.....	46
3.8.2.	Temps unitaire de montage	46
3.8.3.	Moyen de levage	49
3.8.4.	Montage et stabilité provisoire	50

3.9.	Les interfaces avec les autres lots	52
3.10.	La réhabilitation en CM	54
3.10.1.	Généralités	54
3.10.2.	Les avantages de l'acier en réhabilitation	54
3.10.3.	Particularité des travaux de réhabilitations	55
3.10.4.	Chiffrage en réhabilitation	55
IV.	Chiffrage d'un lot CM	56
4.1.	Décomposition d'un prix global	56
4.1.1.	Méthodologie de chiffrage	56
4.1.2.	Décomposition d'un prix	57
4.1.3.	Estimation rapide	59
4.2.	Outil de chiffrage CM	60
4.2.1.	L'onglet Chiffrage	60
4.2.2.	Exemple d'utilisation du logiciel	61
4.3.	Onglet Métré	64
	CONCLUSION	65
	TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	66
	TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	66
	BIBLIOGRAPHIE.....	68
	LISTE DES ANNEXES	69

INTRODUCTION

BOUYGUES Bâtiment Ile-de-France Ouvrages Publics, filiale francilienne de Bouygues Construction, souhaite développer son pôle « Construction Métallique ». En effet, de nos jours, de plus en plus de chantiers traités possèdent un lot Charpente Métallique, c'est donc une nécessité, pour répondre avec qualité aux affaires étudiées, d'avoir de vraies connaissances sur les structures métalliques.

C'est de par cette volonté que le Service Etude de Prix Gros Œuvre de l'entreprise m'a engagé en tant qu'assistant cadre en Etude de Prix. Ma mission principale pendant cette période a été de développer un guide technique et financier sur la Charpente Métallique dans les bâtiments publics pour le service Etude de Prix. Le but principal de ce mémoire est de pouvoir aider et guider les collaborateurs du service pendant l'étude d'un lot Charpente Métallique, en repérant les spécificités et les problématiques techniques, mais aussi en aidant pour le chiffrage de la structure.

L'approche de l'acier est souvent perturbée par une culture « béton » présente au sein de l'entreprise. Les réflexes structurels et techniques doivent être différents. L'étude doit donc mettre la lumière sur les étapes de réalisations de la Charpente Métallique, les points spécifiques à chaque étape, qui peuvent influencer sur le dimensionnement comme sur le prix, ainsi que les différentes fondamentales avec les constructions classiques.

La réalisation du mémoire s'est faite par une analyse en 4 phases.

La première phase a été la recherche bibliographique et documentaire sur le sujet, afin d'avoir une base conséquente de connaissances sur le sujet. Ont été consultées les textes normatifs, DTU et CCTG, ainsi que des guides techniques existants sur le sujet.

La deuxième phase a été l'analyse des retours de consultations des chantiers, qui permettent de voir la réalité des charpentes traitées, aussi bien en termes de coût que de type de charpente.

J'ai aussi visité plusieurs chantiers de charpente métallique. Le but de ces visites a été de pouvoir s'entretenir avec les conducteurs de travaux sur les problématiques de montage de charpente.

Enfin, Bouygues Construction possède un bureau d'étude spécialisé dans le domaine. J'ai pu plusieurs fois rencontrer des personnes y travaillant. Ils m'ont alors expliqué leur philosophie d'étude, les points spécifiques et les problématiques de ce lot.

I. PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

1.1. Le groupe Bouygues

Le groupe Bouygues a été créé en 1952 par Francis Bouygues.

A l'origine exclusivement spécialisée dans le bâtiment et les travaux industriels en Ile-de-France, l'entreprise a diversifié au fil du temps ses activités en direction d'autres secteurs, comme les travaux routiers, l'immobilier, les médias, les télécommunications, les transports et l'énergie.

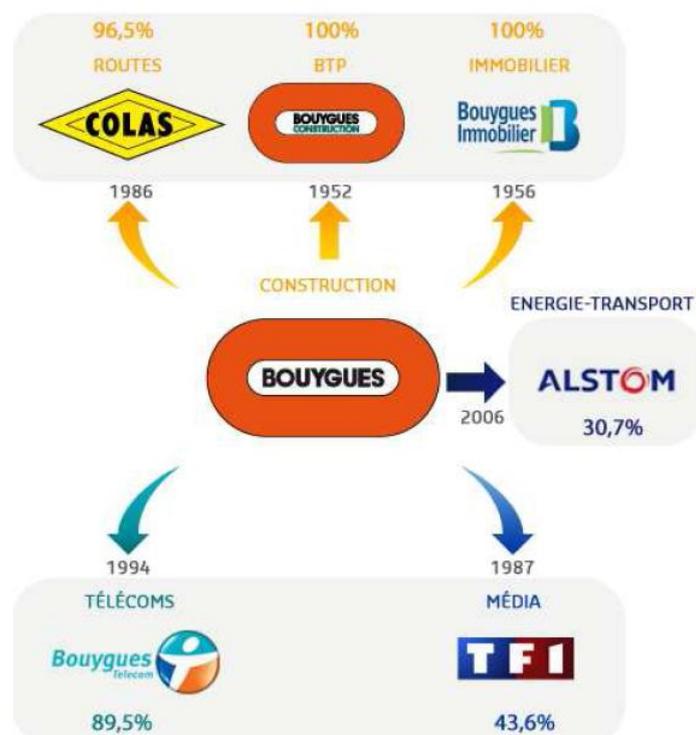


FIGURE 1 : ORGANIGRAMME DE BOUYGUES

Aujourd'hui, Bouygues est présent dans 80 pays et a réalisé plus de 30 % de son chiffre d'affaire à l'international. Avec 134 000 collaborateurs, Bouygues a réalisé en 2009 un chiffre d'affaire de 31,4 milliards d'euros.

1.2. Bouygues Construction

Filiale historique du groupe, Bouygues Construction est l'un des leaders mondiaux dans le domaine du génie civil. Présent sur les cinq continents il conjugue la puissance d'un grand groupe et la réactivité d'un réseau d'entreprise organisé en 8 entités complémentaires :

Bouygues Bâtiment Ile-de-France, Bouygues Entreprise France Europe, Bouygues Bâtiment International, Bouygues Travaux Publics, VSL, DTP Terrassement, ETDE et Bouygues Pôle Concessions.

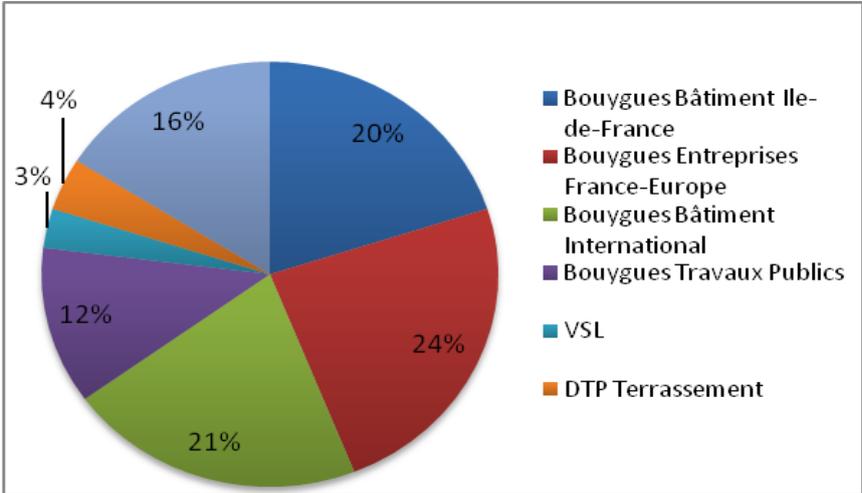


FIGURE 2 : REPARTITION DU CA SELON LES ENTITES

L'entreprise compte 52 000 collaborateurs, pour un chiffre d'affaire en 2011 de 9,8 milliards d'euros, dont 4,4 milliards à l'international.

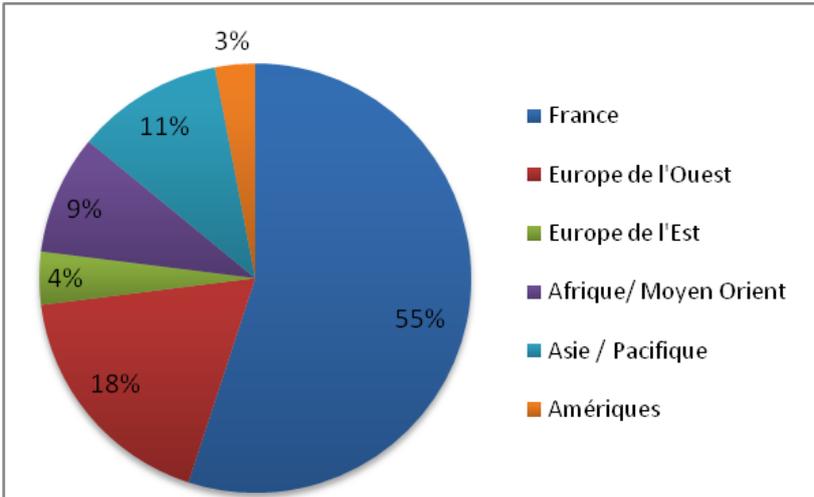


FIGURE 3 : REPARTITION DU CA SELON LES REGIONS

1.3. Bouygues Bâtiment Ile-de-France

Bouygues Bâtiment Ile-de-France est la filiale de Bouygues Construction chargée du marché francilien. Elle est la première société de construction en Ile-de-France avec plus de 13 % de part de marché en Ile-de-France et plus de 6 000 collaborateurs.

Elle développe pour ses clients une compétence globale à travers les spécialités de l'ensemble de ses unités opérationnelles :

Unité opérationnelle	Spécialisation	Montant d'activité
Rénovation Privée		340 M€
Construction Privée		227 M€
Ouvrages Publics		280 M€
Habitat résidentiel		200 M€
Habitat Social		379 M€
Brézillon	Réhabilitation en génie industriel	175 M€
Sodéarif	Développement immobilier	285 M€
Elan	Management de projet	21.4 M€

TABLEAU 1 : ACTIVITE DES FILIALES DE BOUYGUES ILE-DE-FRANCE

Par l'intermédiaire de ces filiales, elle offre un savoir-faire dans quatre grands domaines de compétences : les équipements publics, les ouvrages tertiaires privés, les logements et le génie civil industriel.

Le chiffre d'affaire prévisionnel de l'entreprise en 2012 s'élève à 2.25 milliards d'euros.

Depuis une dizaine d'années, les unités opérationnelles et les filiales de Bouygues Bâtiment IdF ont désigné la construction durable comme axe stratégique, la finalité étant de mettre en œuvre des solutions performantes et innovantes dans leurs opérations.

Plusieurs innovations sont développées par les différentes entités de l'entreprise, comme par exemple le Béton Isolant Structurel (développé en partenariat avec Lafarge), qui vise à réduire les ponts thermiques de façon significative (33 %).

1.4. Bouygues Ouvrages Publics

Bouygues Bâtiment Ouvrages Publics développe des ouvrages fonctionnels pour des clients du secteur public : l'état, grandes administrations, collectivités locales et autres.

De ce fait, l'entreprise intervient, en neuf ou en réhabilitation, sur des ouvrages très diverses : hôpitaux, groupes scolaires, bâtiments universitaires, musées, équipements sportifs et culturels etc.

Elle répond aux projets de clients et maîtres d'ouvrage en appel d'offres, conception/réalisation, délégation en Service Public et en partenariat public-privé. Les deux derniers sont gérés par Bouygues Construction Délégation et Partenariat Public (filiale d' « Ouvrages Publics »).

En 2010, l'entreprise comptait 31 chantiers en activité, pour 280 millions d'euros d'activité et 190 millions de prise de commande.

Actuellement, l'entreprise réalise des chantiers de très grande ampleur, comme :

- La Philharmonie de Paris (montant de l'opération : 112,7 millions d'euros).
- Les archives nationales, inaugurée en février 2013 (montant de l'opération : 112 millions d'euros).
- Le ministère de la Défense Balard à Paris (montant de l'opération : 3,5 milliards d'euros).

Ci-dessous l'organigramme de Bouygues Ouvrages Publics

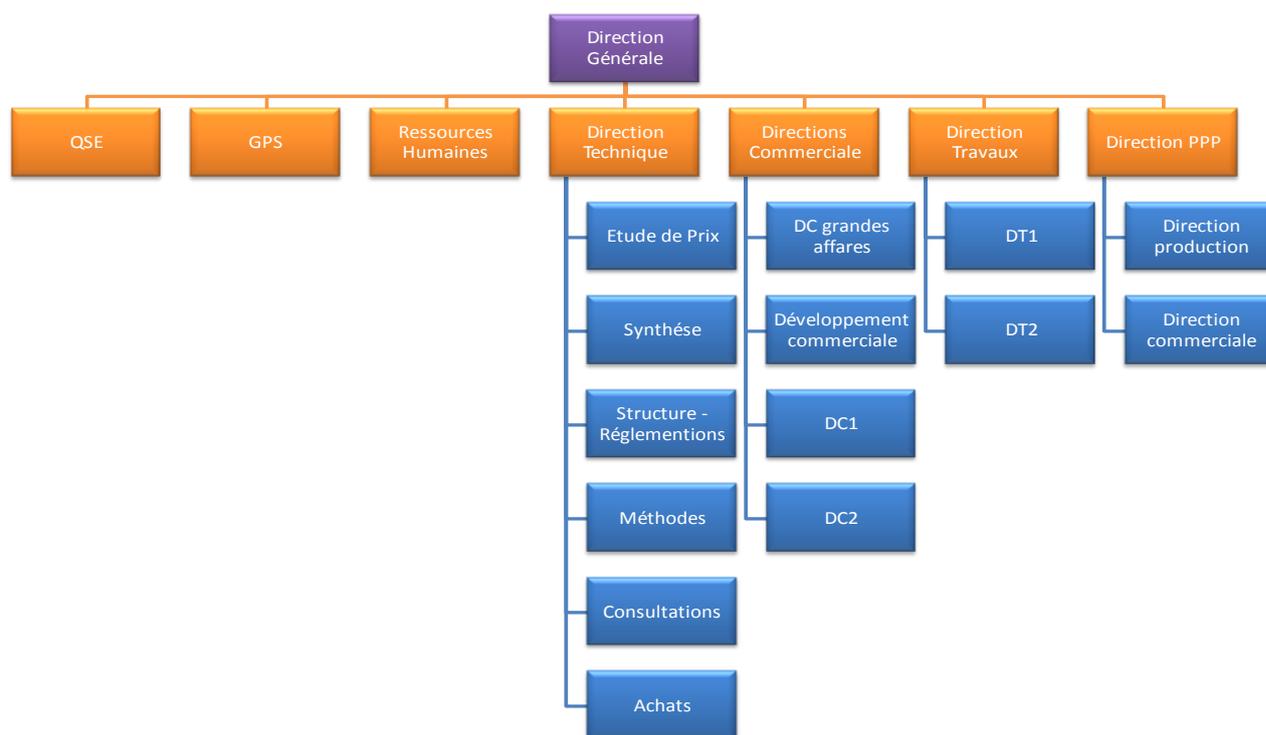


FIGURE 4 : ORGANIGRAMME DE BOUYGUES OUVRAGES PUBLICS

Bouygues Bâtiment Ouvrages Publics s'organise dans le traitement des affaires en trois directions :

1. **La direction commerciale** : son objectif est de rechercher et de signer des marchés pour assurer la prise de commande attendue :
 - En recherchant un niveau de satisfaction maximum des Clients.
 - En optimisant les projets en termes de qualité, sécurité, environnement, délai et prix.
 - En respectant les objectifs de rentabilité commerciale et les coûts d'études.Le but est de transmettre à l'équipe Travaux un dossier fiable et complet (marges, aléas) intégrant les aspects QSE propres à l'affaire.
Le processus commercial s'organise selon les modes de dévolutions des marchés publics (marché public de travaux, de conception/réalisation ou en PPP).

2. **La direction technique** : elle s'occupe de l'ensemble des études techniques et financières des projets aux différentes étapes : en phase d'avant-projet, en phase PRO et en phase d'exécution.
Elle est scindée en plusieurs services, se chargeant des différents aspects de l'étude :
 - Service Structure : chargé des études structures en avant projet comme en exécution, principalement pour les structures béton.
 - Service Méthodes : chargé du choix et de la réalisation des PICS, modes opératoires, planning etc pendant les phases de projet ainsi que pendant toute la durée du chantier.
 - Service Etude de prix : chargé de l'estimation des coûts du gros œuvre ainsi que de tous corps d'états d'un chantier, ainsi que de l'optimisation du prix, par le biais de variantes techniques ou de planning.
 - Service Développement Durable.

3. **Les équipes Travaux** : son objectif est la préparation, l'exécution et la réception des ouvrages.

La **direction PPP** est l'organe de l'entreprise chargée des marchés en délégation en service public et en PPP. Elle est chargée du traitement commercial et des relations avec les clients sur ces marchés. Les études techniques, ainsi que les travaux, sont réalisés par les directions technique et travaux de Bouygues Ouvrages Publics.

La volonté de l'entreprise est de développer le travail en équipe entre les différents services et les différentes directions. L'organisation du travail a été faite dans ce sens là : bureaux en open space, réunion entre commerciaux, techniques et travaux fréquents.

Autre exemple, tous les ans en février est organisé un séminaire de la direction technique ; sur 3 jours, où l'ensemble des collaborateurs de la direction (plus de 100 personnes) se retrouvent pour resserrer les liens entre eux et débattre sur des sujets majeurs de l'entreprise. Cette année, le fil connecteur était : « Comment améliorer les relations entre la direction Technique et ses clients (Direction commerciale, Equipes travaux etc.) ? ». Cette initiative permet à la fois d'améliorer la communication entre les différents services de la direction technique et de permettre à tous les collaborateurs de débattre et proposer des idées novatrices sur le fonctionnement et les lignes directrices de l'entreprise.

1.5. Le service Etude de Prix Gros Œuvre

Le service EdP Gros Œuvre est la partie du service EdP chargé en phase étude du :

- Chiffrage de tous les lots structurels et de gros œuvre (terrassement, fondations, structures, charpentes métallique et bois structurelles etc.), et des lots démolitions, désamiantage, déplombage, et des cloisons ICD.
- Planning de tous ces lots (en concertation avec le service Méthodes).
- De l'évaluation des besoins matériels pour la réalisation du gros œuvre.
- De tous les frais indirects liés au chantier (installation de chantier, personnel etc.).

II. PRESENTATION DU PFE

2.1. Le besoin de l'entreprise

2.1.1. L'approche du lot Charpente Métallique

La direction technique de l'entreprise ne possède pas de bureau d'étude ou de services spécialisés dans la conception et le dimensionnement de Charpente Métallique. Pour les études structure, les deux solutions sont les recours soit au BE Charpente de Bouygues Construction, soit à un BE externe.

Par contre, l'étude des parties « chiffrage » et « méthode » passe forcément par la **consultation de sous-traitants** spécialisés, pour plusieurs raisons :

- Les prix sont très variables dans le temps, et selon le type de structure/protection utilisé.
- Le montage de charpente doit faire l'objet d'un programme détaillé, en prenant en compte les problématiques de stabilité provisoire.
- L'entreprise a développé une culture « béton » : il n'y a pas une connaissance suffisante dans ce domaine pour permettre la réalisation d'une étude de ce lot (particulièrement en phase PRO).
- Bouygues OPB n'a pas d'équipe de montage de CM. La phase EXE passera forcément par la consultation et l'audit d'une entreprise spécialisée. Des contacts dès la phase étude peuvent permettre d'améliorer le rapport qualité/prix de l'offre finale.

2.1.2. Besoin d'une nouvelle approche

Le service d'étude de prix a pour ambition de développer son avis critique vis-à-vis d'un projet de charpente et des retours de consultations des entreprises sous-traitantes.

Elle a plus particulièrement, pour répondre au lot considéré :

- **Besoin d'une évaluation précise des coûts prévisionnels** : l'étude en phase d'avant projet ou DCE du lot CM se fait parfois sans la consultation d'un sous-traitant spécialisé. L'estimation des coûts doit cependant être à la fois suffisamment basse pour permettre de décrocher l'affaire et haute pour que le prix réel du lot (prix « sous-traitant ») ne soit pas supérieur au prix prévisionnel.
- **Besoin d'une étude rapide du lot** : Les réponses à une affaire peuvent être très courtes (de l'ordre de 6 semaines pour une réponse en phase DCE sur des affaires standards), durant lesquelles le service EdP Gros Œuvre doit traiter les

problématiques de fondations, terrassement, structure béton, bois et acier. A moins d'un bâtiment à dominante acier, le lot CM ne représente qu'une petite part du chantier d'un point de vue financier, et doit donc être traité rapidement.

- **Besoin d'une connaissance technique** : La consultation des entreprises sous-traitant en CM est faite par le service Etude de Prix. La bonne connaissance technique des structures métalliques permet une meilleure analyse de la qualité des réponses proposées par les sous-traitants.

2.2. Définition du sujet

Pour traiter au mieux le lot CM, le service a besoin d'une connaissance technique et financière des structures métalliques. La tâche qui m'a été confiée a pour but de répondre à ce besoin.

L'intitulé du PFE est :

Réalisation d'un guide technique et financier sur la Charpente Métallique dans les bâtiments publics

2.3. Rendu attendu

Le document attendu par l'entreprise est constituée de deux parties :

- Un mémoire technique, parlant principalement des problématiques techniques (fabrication, protection, montage etc.).
- Un logiciel de chiffrage du lot CM.

2.4. Le mémoire technique

2.4.1. Cahier des charges

Le mémoire technique doit contenir tous les points techniques généraux et spécifiques propres de l'étude jusqu'à la réalisation de charpente métallique. Son rôle est d'aider le service Etude de Prix dans ses choix techniques et des hypothèses prises lors du chiffrage.

Le but premier du mémoire technique est de servir de guide et de banque de données en phase d'étude d'affaire pour le service d'Etude de Prix. Il doit donc décrire:

- Les différents types de structure, modes opératoires, protections et tous autres points concernant le lot CM.
- Le « **cycle** » de réalisation d'une structure en acier, de l'étude à la pose.
- Les **problématiques de montage** de la CM, notamment les cadences de montages, les incidences sur le chantier et les autres lots, la stabilité provisoire de la structure, la sécurité etc.
- Une base de prix, ainsi qu'une méthodologie de chiffrage du lot.

Une idée plus large est de concevoir ce mémoire en plus comme guide global pouvant servir à toute étape du projet, au niveau des différents services de la Direction Technique.

2.4.2. Organisation du mémoire

Le mémoire final fait 110 pages. Il a été organisé de façon à suivre le cheminement de réalisation de la charpente métallique (cf schéma ci-dessous).

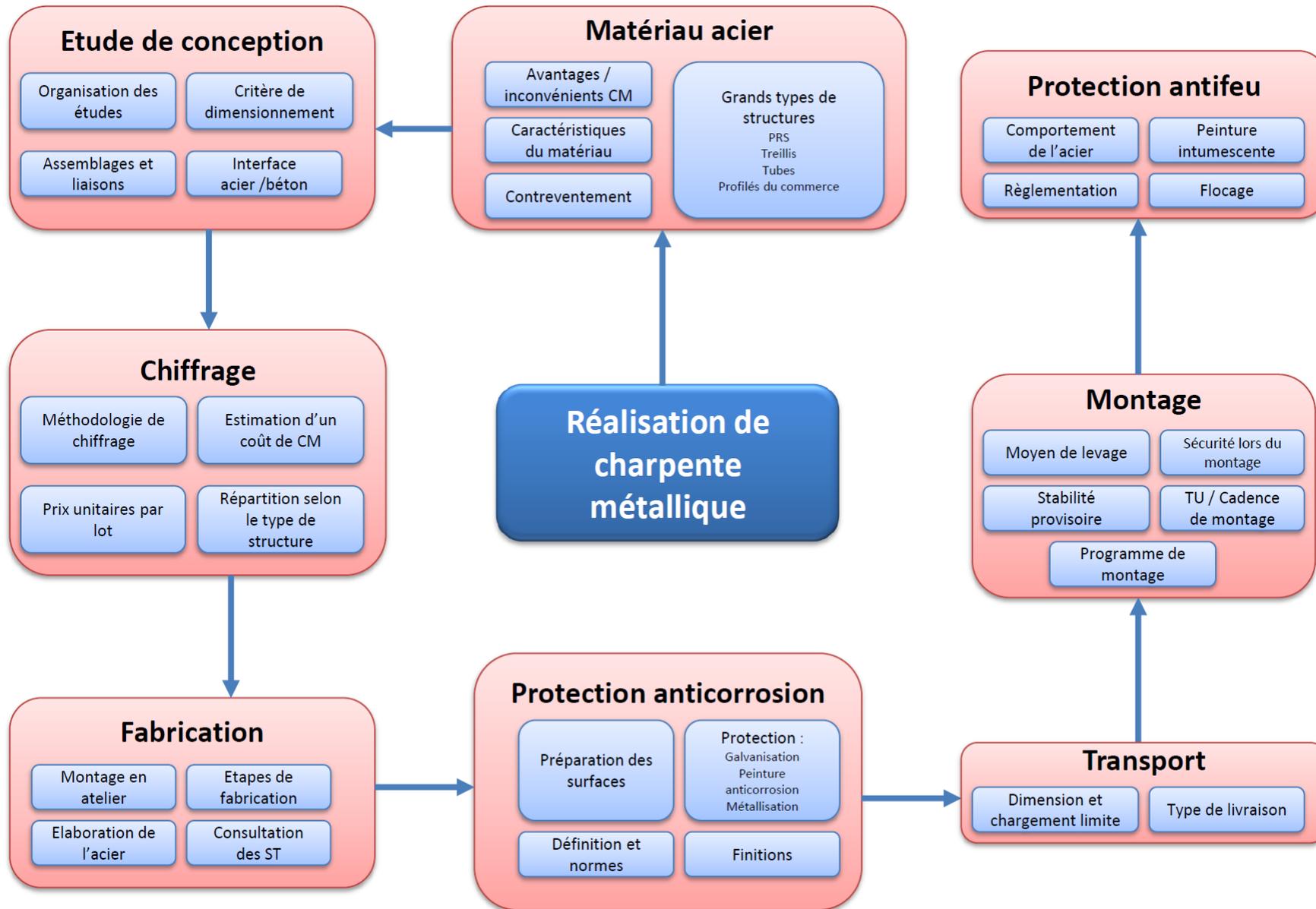


FIGURE 5 : ETAPES DE REALISATION D'UN PROJET DE CHARPENTE METALLIQUE

2.5. Le fichier de calcul de coût

2.5.1. Cahier des charges

Le but premier du fichier est de fournir une estimation fiable du coût d'un projet de CM en phase d'étude. La création de cet outil a du répondre à un certain nombre de règles, aussi bien sur la forme que sur le fond :

- **Simplicité d'utilisation** : le logiciel doit être simple à utiliser, avec un minimum de données d'entrée. Les descriptions des lots CM en phase étude étant souvent sommaires, avoir un logiciel trop précis serait peu utile pour chiffrer ces lots.
- **Liberté de modification des prix** : les prix de CM sont fortement variables. La modification de la base de données de prix doit être simple.
- **Liberté de correction des prix finaux** : L'utilisateur doit facilement pouvoir modifier les prix de prestations/cadences/PU ou le prix final, afin que le prix colle mieux aux descriptions du CCTP.
- **Possibilité d'ajouts de « plus-value »** : Les points spécifiques du lot (élément cintré, grande hauteur etc.) doivent pouvoir être pris en compte dans le logiciel, à l'unité ou globalement.

2.5.2. Trame du logiciel

L'outil est développé sur Microsoft Office Excel. Il est composé :

- D'un onglet principal, nommé « Chiffrage » dans lequel sont entrées les caractéristiques de la structure, et où est calculé le coût de la structure.
- De deux onglets annexes :
 - L'onglet « Métré », comprenant la catalogue OTUA des profilés du commerce, et permettant entre autres de déterminer les surfaces de peinture et de flocage.
 - L'onglet « Base de donnée », référentiel des prix et cadence de CM.

2 onglets annexes :

- Métré : référentiel de tous les profilés du commerce -> permet de déterminer à partir de poids ou ml de profilé, le poids et les surfaces de peinture et de protection.
- Hypotheses : base de données des prix

2.6. Organisation du travail

Le travail réalisé s'est organisé comme un travail de recherche. En effet, la dernière étude sur la Charpente Métallique pour le service a été réalisée en 1997, et aucun autre guide ne parle du sujet d'un point de vue technique et financière.

Le but était donc, pour obtenir des informations précises sur le lot, de rencontrer tous les acteurs de la réalisation d'une charpente :

- Le bureau d'étude CM de Bouygues pour la partie conception et la partie chiffrage.
- La consultation des sous-traitants pour les parties de fourniture et fabrication de l'acier.
- Les travaux pour parler de la pose de la charpente et des problèmes rencontrés.

Au final, mon travail c'est organisé de la façon suivante :

	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Tâches					
Recherche documentation technique	—————				
Consultation de sous-traitants		—————			
Travail avec BE CM de Bouygues			—————		
Visite de chantiers de charpente	—————				
Création d'un fichier de calcul de prix			—————		
Rédaction du rapport	—————				

Recherche de documentation technique

La première étape du PFE a été de rechercher de la documentation technique sur le sujet, de façon à se constituer une base de données technique et normative.

Cette base de données s'est réalisée par l'intermédiaire :

- Des normes sur l'acier et la construction métallique.
- Les TU et les CCTG relatifs à la construction métallique.
- Les associations et organisations professionnelles sur la charpente métallique, comme l'OTUA.
- La base de données de l'entreprise, comprenant des guides sur la charpente, les expériences des retours de chantiers etc.

Consultation de sous-traitants

La consultation de sous-traitants c'est faite de deux façons :

- Par l'évaluation des **rapports de consultations**, qui sont en fait les offres remises par des entreprises à un appel d'offre de Bouygues pour les chantiers passés. En analysant ces rapports, on obtient facilement les prix unitaires globaux de CM. En fonction du détail donné par les entreprises, on peut aussi obtenir des prix plus détaillés (coût d'étude, prix des protections corrosion ou feu, coût du montage etc.).
- En s'adressant directement aux entreprises. Cependant, les entreprises sont peu enclines à communiquer sur leurs prix, leur manière de chiffrer ou leurs cadences de productions, ce qui a rendu difficile cette possibilité.

Travail avec le bureau d'étude CM de Bouygues Construction

La rencontre avec le bureau d'étude CM de Bouygues Construction m'a permis de parler et de comprendre le métier d'étude de charpente métallique.

Visite de chantier de charpente

La visite de trois chantiers comportant de la charpente métallique m'a permis de me familiariser avec les problématiques de montage.

III. GUIDE TECHNIQUE SUR LA CM DANS LES BATIMENTS PUBLICS

3.1. Le matériau acier et les structures métalliques

3.1.1. Etendue du lot charpente métallique

Le lot Charpente Métallique (CM) a pour objectif la fabrication et la mise en œuvre :

- Des charpentes métalliques structurelles.
- Des bacs acier et planchers mixtes acier-béton.
- Revêtement anticorrosion et finition.

Le mémoire traite aussi :

- de la protection contre le feu de la charpente
- De l'incidence sur les frais de chantier (levage, sécurité etc.).

3.1.2. Avantages et inconvénients de l'utilisation de l'acier

AVANTAGES	INCONVENIENTS
<ul style="list-style-type: none"> - Faible volume de matériau mis en œuvre, entraînant : <ul style="list-style-type: none"> o Une légèreté de la structure porteuse, donc des fondations moins coûteuses. o Des poteaux plus minces autorisant une plus grande utilisation de la surface au sol. - Déformabilité supérieure de la structure par rapport à une structure béton. - Rapidité d'exécution. - Valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales : <ul style="list-style-type: none"> o Résistance aux efforts, dureté, résistance aux chocs - Adaptabilité aux travaux de réhabilitation. - Propreté du chantier. - Extension facilitée. - Grande tenue en fatigue - Fort potentiel de recyclage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Des protections au feu et à la corrosion sont souvent nécessaires. - Coût du matériau de base plus cher que pour le béton, et plus sensible aux fluctuations du marché. - Montage délicat. - Gérer les interfaces entre les étapes fabrication/ transport / montage. - Peu d'inertie thermique : les structures métalliques sont très sensibles aux changements de température.

TABLEAU 2 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES CHARPENTES METALLIQUES

D'après la norme européenne EN 10025, l'acier est un matériau contenant en poids plus de fer que les autres éléments, ayant en général moins de 2 % de carbone et contenant d'autres éléments :

- **Fer** = l'élément de base.
- **Carbone** = deuxième élément caractéristique, à hauteur de 2% maximum.
- **Impuretés** (phosphore, soufre...).
- **Additifs volontaires** (silicium, nickel, chrome...) en fonction des caractéristiques du produit voulu.

Nuance d'acier

La **nuance d'acier** est définie à partir de la limite d'élasticité. Les trois nuances principales sont les aciers pour utilisations structurelles S 235, S 275 et S 355.

D'autres nuances plus performantes sont disponibles, pour des cas particuliers nécessitant des résistances très élevée (ex : acier Histar 460).

L'augmentation de la nuance d'acier entraîne une augmentation du prix de son élaboration. Un acier S355 coûte par exemple en moyenne 15 % plus cher qu'un S235.

Nuance d'acier selon EN 10 027-1	Limite d'élasticité f_y [N/mm ²]	Résistance à la traction f_u [N/mm ²]	Allongement de rupture A [%]	Utilisation commune
S 235	235	360	26	Acier de charpente
S 275	275	430	22	Acier pour profilé creux
S355	355	510	22	Acier à haute résistance
S 460	460	550	17	Acier à grain fin (très haute résistance)

TABLEAU 3 : UTILISATION D'UN PROFILE SELON LA NUANCE D'ACIER

Qualité d'acier :

La **qualité d'acier** caractérise la fragilité d'un matériau. Les ruptures fragiles se produisent sans apparition de déformation plastique.

3.1.3. Les grand types de structure en CM

L'utilisation de l'acier offre de grandes possibilités de choix d'un point de vue structurel et architectural. Cela est à la fois dû aux qualités intrinsèques du matériau et au grand panel de structure existant. En effet, on peut nommer 5 grands types de structures, permettant de répondre efficacement aux contraintes des dossiers.

Structure en profilé du commerce

Les profilés du commerce sont des profilés standards qui sont définis à partir du catalogue OTUA. Il existe plusieurs types de profilés, en fonction des contraintes de la structure :

- **IPE, UAP et HEA** : charpente à charges d'exploitation légères (toitures etc.).
- **HEB** : charges lourdes, planchers de reprise, poutres de roulement.
- **HEM** : le plus résistant, mais requiert des commandes spéciales impliquant un rallongement des délais.

Profilés reconstitués soudés

Les profilés reconstitués soudés (PRS) sont des profilés dont la forme a été conçue de sorte à optimiser ses performances vis-à-vis des sollicitations reprises.

Les PRS sont principalement utilisés pour :

- les **moyennes portées**, pour alléger la section et donc le poids par rapport à une solution en profilé du commerce,
- Les **grandes portées** ou **charges lourdes** (où les profilés du commerce sont inadaptés).

Le PRS présente donc des avantages :

- **De résistance** : optimisation du profilé par rapport aux sollicitations.
 - **Architecturaux** : libération d'espace, grande portée possible, plus esthétique que les poutres treillis.
 - **Economique** : gain de masse, diminution du nombre d'assemblage et de point de reprise d'efforts.
-

Le recours au PRS entraîne par contre des surcoûts par rapport à une structure classique en :

- **Etude** : **0,1 € / kg** - le dimensionnement d'une pièce unique en fonction de charges propres est plus long que pour un cas classique.
- **Fourniture** : de **0,2 à 0,35 € / kg** - la pièce étant unique ne correspond pas aux standards OTUA, ce qui fait augmenter le temps de fourniture de la pièce. Ce surcoût peut être très variable selon le type de PRS.
- **Fabrication** : **0,05 à 0,2 €/kg** - assemblage/usinage parfois complexe.

Les treillis

Un treillis est un assemblage de barres verticales, horizontales et diagonales formant un système triangulé, de sorte que chaque barre subisse un effort acceptable et que la déformation de l'ensemble soit faible.

L'utilisation de treillis a pour objectifs de:

- **Minimiser le poids de la structure.**
 - **Maximiser la rigidité.**
-



FIGURE 6: STRUCTURE EN TREILLIS - VELODROME DE SAINT QUENTIN

Les treillis entraînent des surcoûts en :

- **Etude : +0,1 €/kg** – Etude plus compliquée que pour une structure classique.
- **Fourniture** (selon les profilés utilisés pour le treillis) : **+ 0,1 €/kg** -
- **Fabrication** en atelier: **0,5 à 0,7 €/kg** – Les treillis sont soudés, ce qui augmente considérablement le temps de fabrication.
- **Montage** : **+ 0,1 €/kg** – Profilés préassemblés, nécessitant souvent plusieurs équipes de montage/moyen de levage.

Les structures tubulaires

Les structures tubulaires sont composées de profilés en rond creux.

Le choix de structures en tube se fait principalement pour des raisons architecturales. Cela conduit à des plus-values en :

- **Fourniture : + 0,9 €/kg** – Les profilés en rond creux demandent des temps de réalisation plus longs et des techniques spécifiques, ce qui fait augmenter son coût.
- **Fabrication : + 0,1 €/kg** – les techniques d'assemblages sont différentes de celles pour les profilés classiques, ce qui fait augmenter les cadences de fabrication.
- **Montage : + 0,15 €/kg** – Assemblage particulier.



FIGURE 7: STRUCTURE TUBULAIRE - ZOO DE VINCENNES

Plancher en bac collaborant

Le plancher est conçu à base d'une tôle profilée à froid en acier galvanisé (0,5 à quelques millimètres d'épaisseur) comportant sur les flancs de ses nervures des bossages régulièrement espacés, sur lequel on coule du béton (armé ou non) pour obtenir une dalle d'épaisseur de 0,5 à 2 m.

Le plancher collaborant présente plusieurs avantages :

- Il est facile à transporter (emboîtement des tôles).
- Pratique (poids surfacique très faible).
- Rapide de pose
- Economique (coût global des plus faibles pour un plancher grâce à la rapidité de mise en œuvre).

3.1.4. Planification d'un projet de CM

Un projet de charpente métallique se déroule grossièrement en 5 phases : la conception, la consultation d'entreprise, la fabrication, la livraison et le montage de la structure.

- La **conception** consiste à établir les plans généraux, les descentes de charges, le dimensionnement de la structure en fonction de son utilisation et de ses caractéristiques. Généralement, cette phase est réalisée conjointement avec un BE de structure métallique.
- La **consultation d'entreprise** est la phase de désignation de l'entreprise qui effectuera les travaux.
- La **fabrication** est souvent l'étape la plus longue du processus. La première phase est la commande d'acier, auprès de l'usine du ST ou d'un fournisseur. La structure est ensuite fabriquée en atelier, en suivant les prescriptions du dossier (CCTP). La protection contre la corrosion est réalisée dans la plupart des cas en atelier. Une partie de l'assemblage est aussi réalisée en atelier, avec comme contrainte principale le gabarit des moyens de transport.
- La **livraison** s'effectue en une fois ou au fur et à mesure de l'avancement, en fonction de la zone de stockage sur site. Cette phase joue un rôle important dans la conception de l'ouvrage, à cause du gabarit du moyen de transport, qui limite la taille des profilés fabriqués en atelier.
- Le **montage** est confié intégralement à l'entreprise S-T. Un moyen de levage doit être fourni (grue mobile en général).

Ci-dessous un exemple de planning de projet de charpente métallique de 500 tonnes d'un bâtiment industriel neuf de 1000 m².

3.2. Conception de la CM

3.2.1. Les différentes phases d'études

En fonction du type d'affaire (conception/réalisation, appel d'offre classique, PPP), l'entreprise ne « commencera » son étude au même stade de l'affaire : en phase avant-projet pour les conceptions/réalisations, et en phase DCE pour les autres.

- **L'étude APS/APD ou DCE:** C'est la définition générale de la construction. Les objectifs de cette étude sont :
 - La consultation de BE pour le dimensionnement de la structure.
 - La consultation de sous-traitant CM pour se faire une première idée de prix.
 - Les documents d'entrée des études EXE.

- **Le transfert (étude EXE) :** C'est la définition précise de la construction. Les objectifs de cette étude sont :
 - Consultation de sous traitants de fabrication/montage.
 - Commande de matière.
 - Calcul des ancrages et des fondations.
 - Documents d'entrée des plans de traçage.

- **Les plans de traçage et plans d'atelier :** C'est la définition détaillée d'une construction. Elle est réalisée par le fabricant de la CM, et doit contenir les plans d'atelier comprenant toutes les cotes, les perçages, les tolérances et tous les éléments structurels type. Ils sont établis à partir des plans d'exécution.

3.2.2. Principe de conception de charpente métallique

L'approche de conception d'une structure métallique est différente de celle d'une structure béton. Plusieurs sujets sont à prendre en compte lors de la conception de l'ouvrage :

- La stabilité de l'ouvrage, **provisoire** (pendant le montage) et **définitive**.
- Le transport, qui limite la taille maximale des profilés en sortie d'atelier.
- La sécurité lors de la pose.
- La nuance (et la qualité) de l'acier : dans un objectif d'optimisation de la structure.
- Les interfaces avec les autres, et principalement à la jonction acier/béton.

La première fonction de la structure d'un bâtiment est **d'assurer la stabilité**. Les considérations d'ordre architectural viennent en second plan. La stabilisation est assurée par un système de contreventement dont les fonctions sont :

- **La transmission** des efforts horizontaux aux fondations.
- **La limitation** des déformations latérales du bâtiment.

3.2.3. Les assemblages

L'assemblage, zone d'interconnexion de deux éléments ou plus, a pour rôle de transmettre les efforts entre ces éléments. Il existe deux catégories d'assemblages :

- Assemblage par contact mécanique : boulons, (rivets, rivelons).
- Assemblage par procédé de soudage.

Le boulonnage et le soudage sont les deux assemblages les plus utilisés aujourd'hui. Les deux procédés ont des caractéristiques bien différentes et sont utilisés dans des cas précis.

	Boulonnage	Soudage
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en œuvre facile - Economique 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de besoin d'usinage
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Problème local de corrosion (galva, peinture) 	<ul style="list-style-type: none"> - Temps unitaire long - Pas applicable à tous les aciers - Défaut de soudure à contrôler
Utilisation	<ul style="list-style-type: none"> - Montage sur chantier 	<ul style="list-style-type: none"> - Assemblage en atelier. - Réhabilitation. - PRS

TABLEAU 4 : COMPARAISON DES ASSEMBLAGES PAR SOUDAGE ET BOULONNAGE

3.2.4. Liaisons et structures

	Ossatures articulées	Ossatures encastrées (portiques)
Stabilité	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité du bâtiment assurée par le contreventement. 	<ul style="list-style-type: none"> - Stabilité du bâtiment assurée par les encastremets.
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Nœuds de conception et d'exécution simples. - Montage rapide de l'ossature. - Réglage facile non sensible aux tolérances de fabrication. - Poteaux essentiellement comprimés 	<ul style="list-style-type: none"> - Poutres de dimensions moindres. - Plus grande marge de sécurité en cas d'accident ou d'incendie.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Poutres de plus grandes dimensions. - Présence de contreventements pouvant être gênants. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation coûteuse et compliquée des nœuds. - Réglage difficile et très sensible aux tolérances de fabrication - Sollicitations des poteaux augmentées

TABLEAU 5 : COMPARAISON DES OSSATURES ARTICULEES ET ENCASTREES

Il existe trois types de liaison en structures métalliques :

- **L'encastrement** : liaison rigide qui fixe complètement les deux éléments entre eux.
- **L'articulation** : liaison non rigide entre au moins deux éléments.
- **L'appui simple**.

Les principes de conception d'une articulation ou d'un encastrement sont les suivants :

- **Pour l'articulation** :
 - o Soit les âmes des poutres sont reliées entre elles.
 - o Soit une âme et une aile sont reliées

Il reste un jeu entre les éléments.

- **Pour l'encastrement** :
 - o Les âmes et les ailes des poutres sont reliées.

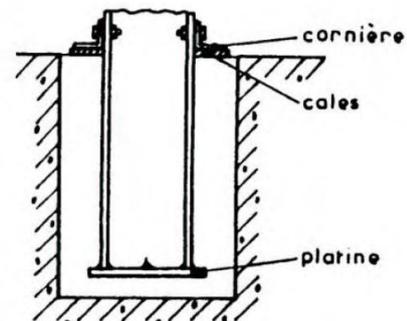
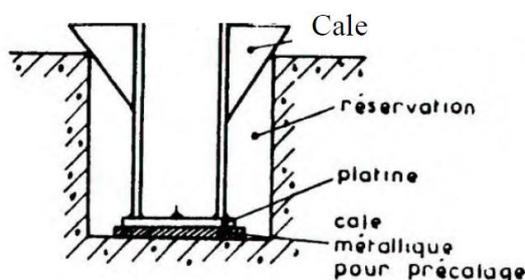
Une liste non exhaustive des types de liaisons en CM est disponible en ANNEXE 1.

Interface avec le béton

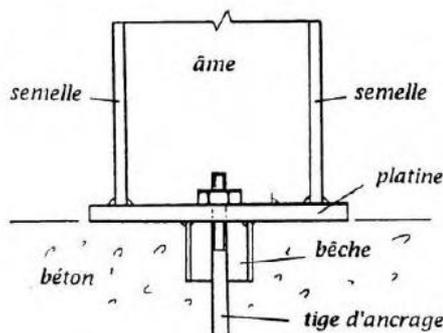
L'interface entre la charpente métallique avec le béton est très importante d'un point de vue structurel : c'est la liaison entre la charpente et le reste du bâtiment.

Plusieurs solutions sont envisageables :

- **Poteau noyé dans le béton** : le poteau est disposé dans une réservation faite dans le béton. Une fois la réservation remplie de béton, la liaison est assimilée à un encastrement.



- **Platines et tiges en pieds de poteaux** : Les platines sont soudées aux poteaux et sont en appui direct avec le béton. Elles transmettent un effort de compression (et un effort horizontal par frottement sur le béton). Des raidisseurs peuvent être placés pour des efforts importants, afin d'éviter la déformation de la platine.



Les tiges sont boulonnées à la platine et ancrées au massif de béton. Les tiges peuvent être droites, recourbées ou avec plaque. Elles transmettent un effort de traction.

Une bèche est souvent placée afin de reprendre les efforts tranchants en pied de poteau.

3.2.5. Ordre de prix des principaux types de structures métalliques

Le prix au kilo des structures métalliques peut varier selon plusieurs hypothèses de conception, comme le choix du type de profilé, de liaison et d'assemblage, les hauteurs et portées de la structure.

On peut classer par ordre croissant de prix au kilo les principaux types de structures métalliques :

- Structures simples (type poutres/poteaux), en profilés.
- Structures en portique à un étage en profilés courants.
- Structures de grande hauteur avec quelques éléments soudés.
- Structures en poutres soudées et en caisson.
- Structures tubes ou en profils creux rectangulaires.
- Structures particulières à haut pourcentage en soudure.



3.3. Consultation d'entreprise

La fabrication de l'ossature métallique est confiée à une entreprise spécialisée en CM. Une consultation suivie d'un audit d'entreprise doit être fait pour réaliser ces prestations, le but étant de :

- Confier le marché à une entreprise qualifiée, aux finances solides et de bonne réputation.
- Rechercher le meilleur rapport qualité/prix.
- Trouver une entreprise pouvant traiter la totalité (ou le maximum) de lots.

Répartition des lots

La répartition des lots de CM peut se faire de différentes façons, allant du marché global à la séparation totale des phases. Dans 90 % des cas, l'ensemble des phases sont réalisées par une même entreprise. Cette organisation a plusieurs avantages :

- Permet une fluidité au niveau de la chaîne de réalisation de la CM (planning de montage très précis / pas de possibilité de modification).
- Pas de soucis d'interfaces entre les phases de réalisation.

La séparation des phases peut créer beaucoup de problèmes, elle permet cependant une réduction des coûts. L'étude et la fourniture peuvent être traitées séparément sans conséquences majeures. Les fabrication/transport/pose doivent être gérés par la même entreprise, afin de limiter tout impact au niveau du planning de pose.

Déroulement des études d'exécution

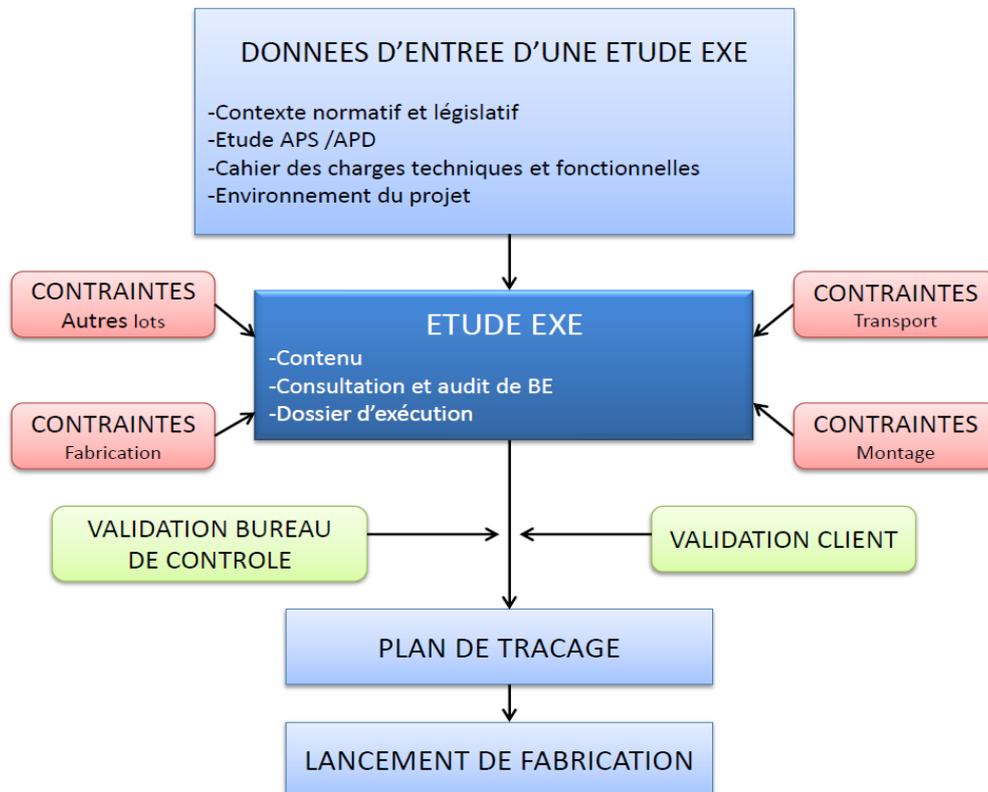


FIGURE 8 : DEROULEMENT DES ETUDES D'EXECUTION

3.4. Fourniture et fabrication de l'acier

3.4.1. Déroulement des opérations de fabrication

La phase de fourniture fabrication se déroule en 4 parties : l'étude des éléments d'entrées par le sous-traitant, la fourniture de l'acier, la fabrication de l'ossature et l'application des protections anticorrosion.

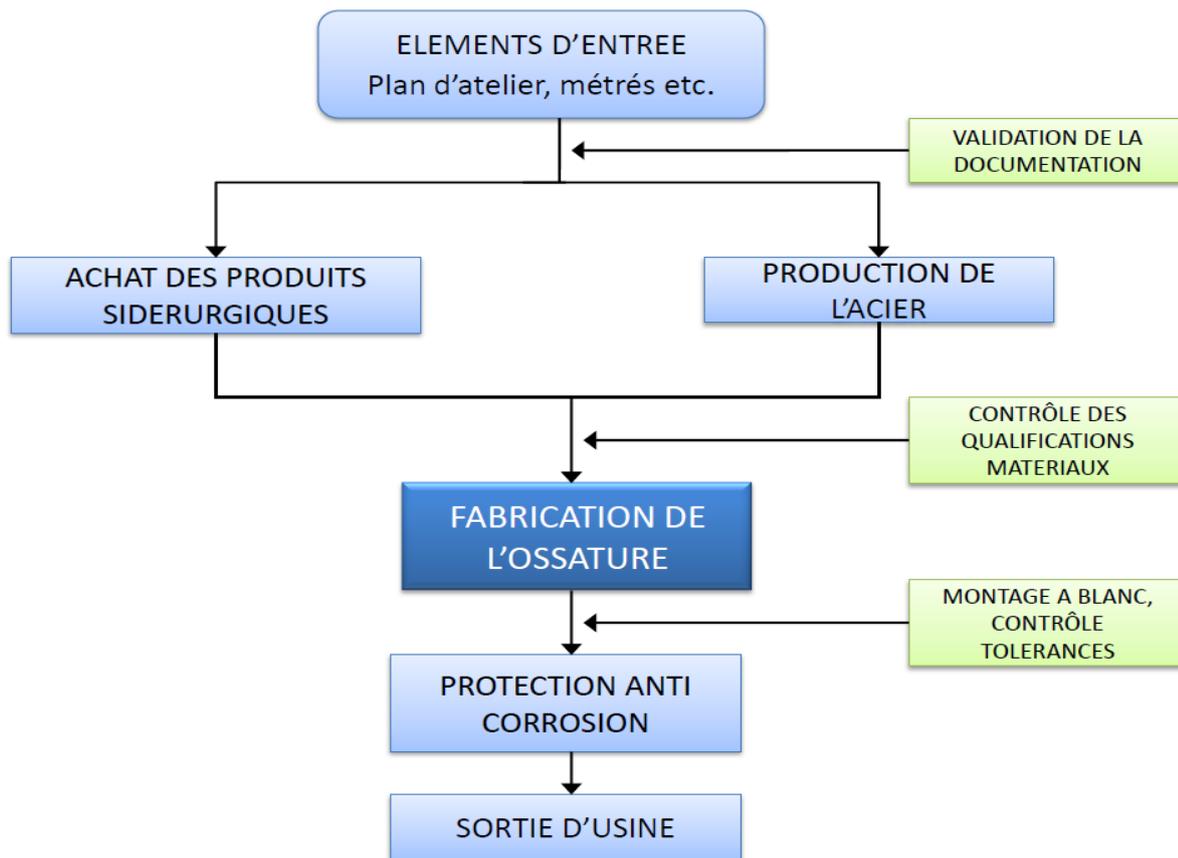


FIGURE 9 : ETAPES D'ELABORATION ET DE FABRICATION DE LA CHARPENTE

3.4.2. Fourniture de l'acier

L'élaboration de l'acier se fait en trois grandes étapes de transformation : réalisation de l'acier liquide, des demi-produits puis des produits finis.

Matières premières -> Acier liquide

Les matières essentielles entrant dans la composition de l'acier sont les minerais de fer et le coke, ainsi que la ferraille. Cette étape sert à combiner les composants chimiques qui vont créer les nuances les qualités de l'acier en fonction de son utilisation. C'est donc là que les propriétés de l'acier sont définies.

Deux filières permettent la réalisation de l'acier liquide, la filière fonte (utilisation de fer et de coke) et la filière ferraille (utilisation de la ferraille -> recyclage).

Acier liquide -> Demi-produits : la coulée

Dans cette étape, l'acier est solidifié progressivement par coulée, et une ébauche des formes des profilés est faite. Deux méthodes de coulées sont utilisées pour réaliser les demi-produits, la coulée continue et la coulée en lingots.

Demi-produits -> Produits finis : le laminage

La mise en forme des demi-produits sous forme de produits se fait par laminage. Le laminage consiste à étirer et écraser le métal pour lui donner des formes et dimensions souhaitées. Le laminage s'effectue à chaud.

3.4.3. Fabrication et assemblage en atelier

La fabrication en atelier se déroule en plusieurs phases : la préparation de surface (décapage ou grenailage), le traçage/découpage, le marquage, le perçage des trous (pour les structures boulonnées), l'usinage et l'assemblage en atelier.

Elle est l'étape la plus longue dans la réalisation de la charpente. En fonction de la complexité de la pièce à fabriquer (soudage, perçage, ajout de raidisseurs etc.), la cadence de montage peut grandement augmenter.

Analyse des TU de fabrication d'éléments métalliques

Le tableau suivant donne les TU de fabrication de différents éléments de charpente. Cette analyse a été réalisée par M. Michel COUSSEAU, cadre expert en Charpente Métallique travaillant au BE structure CM chez Bouygues Bâtiment International, et faisant partie du Pôle CM de Bouygues Construction.

Son analyse c'est basée sur son expérience précédente en tant qu'ingénieur dans une **entreprise de réalisation de CM**, et sur les coûts de fabrication observés sur les chantiers de Bouygues International et plus généralement de Bouygues Construction (les affaires d'OPB et des autres entités comportant une grande partie « CM » sont très souvent traitées en parallèle par le BE CM de Bouygues Construction).

Type d'élément	h/t minimal	h/t maximal	h/t médian
Ferme	12.5	90	25
Pannes – profilés	6.5	60	12
Pannes – série	5	13	8
Contreventements	12	60	35
Poteaux treillis	20	67	41
Poteaux profilés	11	45	18
Poutre treillis	13	78	35
Traverse	12	57	28
Solives	6	55	12
Portique	15	82	22

TABLEAU 6 : NOMBRE D'HEURES PRODUCTIVES DE FABRICATION PAR TYPE D'ELEMENT

On voit sur le tableau précédent que des montages très complexes peuvent entraîner des surcoûts importants.

L'estimation des cadences de fabrication peut être faite avec une très bonne précision. Cependant, une analyse des cadences pour chaque élément est très longue, surtout en phase d'étude.

Analyse des TU des grands types de structures

Une analyse plus globale du type de profilé de la charpente (en sortant les principaux éléments constitutants) a permis d'obtenir la cadence de fabrication de la structure d'une manière suffisamment précise sans passer par l'analyse de tous les éléments.

Elle a été faite en recoupant les données :

- Des nombres d'heures productives de fabrication par type d'éléments.
- Des coûts globaux de fabrication de l'acier sur des précédents chantiers (quand les rapports de consultation offrent cette précision).
- Des prix utilisés par Bouygues OPB et le BE CM de Bouygues Construction en phase étude.

Type de structure	Cadence (h/t)	Explication
Profilé du commerce	12	Classique
PRS	15	Assemblage particulier, pièce unique
Tubes	17	Assemblage compliqué, pas de soudage
Treillis	30	Haut potentiel de soudage
Structures cintrées	30	Haut potentiel de soudage

TABLEAU 7 : CADENCE DE FABRICATION DES PRINCIPALES STRUCTURES

3.4.4. Montage en atelier

En règle générale, les assemblages d'atelier sont soudés et les assemblages de chantier boulonnés

L'assemblage en atelier concerne principalement les éléments de petite taille, à cause des dimensions et du tonnage maximum du moyen de transport. Cela concerne en particulier :

- Les treillis et poutres treillis.
- Les PRS
- Les poutres à aile rallongée.

Le soudage sur éléments (raidisseurs, liaisons, PRS, treillis etc.), sont réalisés dans la mesure du possible en atelier. Le recours **au convoi exceptionnel** est envisageable dans le cas d'éléments à fort potentiel de soudage de dimensions extraordinaires.

3.5. Protection contre la corrosion

3.5.1. Généralités

La norme ISO 8044 définit la corrosion.

Le fascicule 56 du CCTG définit les dispositions générales ainsi que les détails et contrôles sur les protections des ouvrages à la corrosion.

Le développement de la corrosion sur les structures aciers « bruts » est principalement fonction de l'agressivité du milieu environnant. Le milieu est classé selon son agressivité, comme suit :

CATEGORIE	INTERIEUR	EXTERIEUR
C1 Très faible	Bâtiments chauffés : bureaux, écoles, magasins...	
C2 Faible	Bâtiments non chauffés où de la condensation peut se produire : entrepôts, salles de sport ...	Atmosphères peu polluées : zones rurales
C3 Moyen	Enceintes de fabrication avec humidité élevée : industrie alimentaire, brasserie ...	Atmosphères urbaines et industrielles, pollution modérée
C4 Haut	Usines chimiques, piscines	Zones industrielles
C5 – I Très élevée	Bâtiment avec condensation permanente et pollution élevée	Zones industrielles avec une humidité élevée et une atmosphère agressive

TABLEAU 8 : CLASSIFICATION DE L'AGRESSIVITE DU MILIEU ENVIRONNANT

Plusieurs techniques sont utilisées pour pallier à la corrosion de la structure. Les différentes protections peuvent toutes garantir une protection pour tout type de milieu environnant. Seule **l'épaisseur de la couche de protection** variera selon l'agressivité du milieu.

3.5.2. Préparation des surfaces

La préparation de la surface consiste en l'enlèvement de toute impureté présente sur l'élément : calamine, rouille etc. Elle joue un rôle important dans la détermination de la valeur protectrice d'un revêtement. Deux procédés sont couramment utilisés en atelier de fabrication :

- Le **décapage à l'acide** (pour la galvanisation et la métallisation).
- Le **grenailage et sablage** (pour la peinture anticorrosion).

3.5.3. Galvanisation à chaud

La galvanisation à chaud est la formation d'un revêtement de zinc et/ou d'alliages zinc-fer par immersion de pièce en acier ou en fonte dans un bain de zinc en fusion. Le traitement doit être conforme aux normes européennes **EN ISO 14713-2:2009** et à la **norme NF EN**

	Propriétés	Mise en œuvre
Avantages	<ul style="list-style-type: none">- « Double protection » : physique par enrobage et électrochimique grâce au zinc.- Epaisseur du revêtement importante (70 à 80 microns).- Revêtement très adhérent : création d'un alliage métallique.	<ul style="list-style-type: none">- Enrobage total de la pièce (pas de zone sans protection).- Réalisation en atelier à bonne cadence.- Efficacité de cette protection estimée à 30 ans en milieu urbain.- Finition pas obligatoire.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">- Risque de déformation des pièces fines à cause de la température haute de fusion (450 °C)- Résidus de zinc lors de la sortie de la pièce et irrégularités de surface dues à l'épaisseur de zinc déposée	<ul style="list-style-type: none">- Facile à abimer lors du transport ou manutention.- Trous et filetages obstrués par le zinc en fusion, nécessitant un perçage ultérieur qui abime.- Difficile à peindre

TABLEAU 9: AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA GALVANISATION

ISO 1461.

La galvanisation assure une meilleure protection à la corrosion que la peinture. Elle est cependant peu adaptée aux assemblages par soudure sur chantier (difficulté de galvaniser les cordons de soudure sur chantier).

Remarques :

- La galvanisation est inadaptée aux structures tubulaires (risque de remplissage, explosion).
- Toutes les qualités d'acier de ne sont pas galvanisables (voir norme NF A 35-503).
- La galvanisation est réalisée dans des cuves de galvanisation (de 15 ml en général), ce qui est à prendre en compte dans le dimensionnement des pièces galvanisées.

3.5.4. Peinture anticorrosion

En général, un système de peinture a trois composants :

- **La couche primaire** : le liant (faciliter l'adhérence et inhiber le processus de corrosion).

- **La couche intermédiaire** : Contribue à l'épaisseur totale du revêtement. C'est la seconde barrière à la corrosion.
- **La couche de finition** : donne la couleur et résiste à l'abrasion, aux attaques chimiques et aux intempéries. La couche de finition peut être une couche de peinture intumescente. Pas de couche de finition si flochage.

Propriétés		Mise en œuvre
Avantages	- Finition propre et couche régulière.	- En atelier ou sur chantier. - Protection la moins chère - Taille des éléments illimitée.
Inconvénients	- Protection interrompue en cas de dégradation ou fissure. - Nécessite une bonne préparation de surface.	- Temps de réalisation long. - Durée de vie faible par rapport aux autres

TABLEAU 10 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA PEINTURE ANTICORROSION

Le choix du système de peinture dépend principalement de la nature de l'environnement, de la durée avant le premier entretien et de l'aspect voulu.

3.5.5. Métallisation par projection

La métallisation par projection consiste à faire fondre le métal et à le projeter sur la surface à l'aide de pistolet à flamme ou d'arc électrique.

Cette méthode est peu utilisée dans le cas de structures neuves, mais peut être utile pour la protection d'ouvrages existants (utilisation facile sur chantier).

Propriétés		Mise en oeuvre
Avantages	- Durée de vie et résistance la plus grande - Adaptable à toute qualité d'acier.	- Effectuable en atelier ou sur chantier. - Taille des éléments illimitée
Inconvénients	- haut niveau de propreté de surface exigée. - Nécessite peinture de finition.	- Temps de réalisation long. - Inadaptée pour grandes structures - Cher

TABLEAU 11 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA METALLISATION

3.5.6. Pas de protection anticorrosion

Les profilés peuvent ne pas avoir besoin d'un revêtement spécifique anticorrosion (galvanisation, peinture etc.) dans le cas où un revêtement autre isole la pièce du milieu extérieur, et assure une **protection physique** contre la corrosion : c'est notamment le cas pour les flocages antifeu.

Une protection physique n'est efficace que si le milieu extérieur ne favorise pas l'oxydation de l'acier. Cette solution est donc bonne pour des milieux de classe C1 et C2.

3.6. Protection contre le feu

3.6.1. Généralités

La conception des structures en acier doit être faite pour satisfaire la stabilité au feu imposée par les réglementations (voir ANNEXE 3). Plusieurs choix peuvent être faits :

- Application de protections passives sur l'acier.
- Utilisation de structures mixtes acier/béton, et donc de la bonne tenue au feu du béton.
- Etude d'ingénierie incendie, consistant à l'étude de la propagation du feu dans le bâtiment, et donc à l'optimisation de l'architecture du bâtiment pour diminuer celle-ci.

En fonction du type de structure, le but est de déterminer si une protection antifeu est suffisante pour atteindre la stabilité requise, ou si des études complémentaires doivent être réalisées pour prouver la résistance de la structure.

Un rappel des 3 critères de résistance au feu est fait en ANNEXE 2.

Analyse de la stabilité au feu des principales structures acier

Une analyse, réalisée conjointement avec le service Règlementation et Incendie de l'entreprise, a permis de définir la tenue au feu des principales structures acier, et le besoin ou non d'une étude d'une étude ingénierie complémentaire.

Plusieurs critères ont permis de déterminer les capacités de stabilité au feu des structures :

- La **résistance intrinsèque au feu de l'acier** : une analyse de la stabilité au feu de l'acier est réalisée en annexe 4.
- La **résistance au feu intrinsèque du béton**, et son apport pour la construction mixte, dont l'analyse est en annexe 4.
- Les **protections passives**.
- La propagation du feu en **extérieur**.

En regardant dans les anciens chantiers de l'entreprise, nous avons pu définir dans quels cas la structure se suffisait à elle-même en terme de stabilité au feu, dans quels cas de précautions spécifiques ont du être prises (issues de secours, zones d'attente, étude de

propagation du feu etc.), et dans quels cas l'exigence de stabilité était trop compliquée à obtenir.

Exigence de stabilité	Structure acier				Structure mixte acier-béton
	Structure extérieure		Structure intérieure		
	Non protégée	Protégée	Non protégée	Protégée	
Aucune	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée
1/4 h	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée
1/2 h	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Stabilité assurée
1 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Difficulté d'utilisation	Stabilité assurée	Stabilité assurée
1,5 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Difficulté d'utilisation	Stabilité assurée	Stabilité assurée
2 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Difficulté d'utilisation	Stabilité assurée	Stabilité assurée
4 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Difficulté d'utilisation	Stabilité assurée	Stabilité assurée

Exigence de degré coupe-feu	Plancher mixte acier-béton		Dalle béton préfabriquée + poutre acier intégrée	Plancher sec
	Poutre acier + dalle béton ou bac acier remplissage béton			
	Poutre non protégée	Poutre protégée		
Aucune	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée
1/4 h	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Stabilité assurée
1/2 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Stabilité assurée	Possibilité d'utilisation
1 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Possibilité d'utilisation	Possibilité d'utilisation
1,5 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Possibilité d'utilisation	Difficulté d'utilisation
2 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Possibilité d'utilisation	Difficulté d'utilisation
4 h	Possibilité d'utilisation	Stabilité assurée	Difficulté d'utilisation	Difficulté d'utilisation

 Stabilité assurée

 Possibilité d'utilisation devant être justifiée par une étude ingénierie incendie ou précautions particulières

 Difficulté d'utilisation pour un coût raisonnable : à déconseiller sauf contraintes particulières du sujet (Utilisation nécessitant des justifications)

TABEAU 12 : EXIGENCE DE STABILITE DES PRINCIPALES STRUCTURES ACIER

3.6.2. Protection au feu de l'acier

Deux types de protections permettent de lutter contre la dégradation du bâtiment et la propagation du feu lors d'un incendie :

- **Les protections passives** : cela consiste à intégrer dans la construction des systèmes limitant la propagation de l'incendie. Pour la construction métallique, il existe différentes protections passives:
 - o Le flocage.
 - o Les peintures intumescentes.
 - o Les écrans.

Selon la durée de tenue au feu, différents types de protections passives seront envisagées :

- o **15-30 min** : non protégé.
- o **60-120 min** : Projection fibreuse ou pâteuse, peinture intumescente.
- o **120-240 min** : protection par des écrans (ou circulation d'eau -> tubulaire).

La protection alourdit considérablement le montant de la structure métallique et explique parfois les écarts avec une solution béton.

- **Les systèmes actifs** : c'est-à-dire qu'elles mettent en œuvre des dispositifs dynamiques (détection, alarme...) pour lutter contre l'incendie :
 - o Sprinkleurs.
 - o Système de désenfumage, extincteurs etc.

3.6.3. Protection par flocage

Le flocage se fait par projection d'un produit minéral coupe-feu ou stable au feu sur la surface à protéger. La projection se fait sur chantier, après montage et assemblage, sur des **surfaces brutes** ou ayant reçu une **couche de peinture primaire**.

Il existe deux types de flocage :

- Flocage fibreux
- Flocage pâteux

La protection pâteuse présente une qualité supérieure, un aspect fini satisfaisant et une plus grande pérennité par rapport à la protection fibreuse.

La différence entre flocage pâteux et fibreux est leur densité (> 450 kg /m³ pour le pâteux, contre moins de 250 kg/m³), ce qui explique le gain de qualité amené par le flocage pâteux. Le flocage pâteux coûte environ 3 €/m² en plus à stabilité au feu équivalente.

Propriétés		Mise en œuvre
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Peu cher. - Remplace la protection anticorrosion 	<ul style="list-style-type: none"> - Application rapide. - S'adapte à toute forme de structure.
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Sujet aux fissurations. - Besoin de primaire ou d'un grenailage. 	<ul style="list-style-type: none"> - Inesthétique : besoin de finition si visible. - Produit salissant. - Couche d'adhérence souvent nécessaire

TABLEAU 13 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DU FLOPAGE FIBREUX

Les flocages fibreux/pâteux peuvent garantir des performances thermiques et/ou acoustiques en plus de la protection contre le feu -> Economies possibles

3.6.4. Peinture intumescente

La peinture intumescente est une protection stable au feu en intérieur comme en extérieur. C'est un produit thermoplastique qui gonfle sous l'action de la chaleur (à partir de 200 °C) pour former une mousse microporeuse isolante (« meringue ») qui va isoler thermiquement le support.

La protection varie de 30 minutes à 2 heures.

Cette solution est esthétique car elle propose une finition parfaite avec un vaste choix de couleurs et simple à mettre en œuvre.

La stabilité au feu de ces peintures est directement liée à l'épaisseur de la couche de peinture mise en œuvre.

Propriétés		Mise en œuvre
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> - Mise en valeur de l'aspect architectural de la structure acier. - Epouse toutes les formes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Finition propre (une couche de finition n'est pas indispensable).
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> - Grenailage nécessaire. - Couche primaire anticorrosion nécessaire 	<ul style="list-style-type: none"> - Protection sensible aux chocs. - Délais de séchage long, donc délais d'application longs.

TABLEAU 14 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA PEINTURE INTUMESCENTE

3.6.5. Constructions mixtes

Dans le cas des constructions mixtes acier/béton, la charpente profite de la bonne résistance du béton au feu comme protection.

C'est notamment le cas pour :

- **Poteaux creux en acier remplis de béton** -> Performance incendie dépendant principalement de la dimension de l'élément, ainsi que des propriétés de résistance traction/flexion du béton :
 - o Béton armé (armature ou fibre acier) - jusqu'à 120 minutes.
 - o Béton non armé – 30 minutes.
- **Profilé recouvert de béton** (en H).
- **Plancher béton à bac acier** – résistance jusqu'à 2 heures (selon épaisseur du béton et ratio d'armatures).



FIGURE 10: POTEAUX MIXTE ACIER/BETON

3.6.6. Protection par écrans

Protection par cloisons ou plafonds suspendus

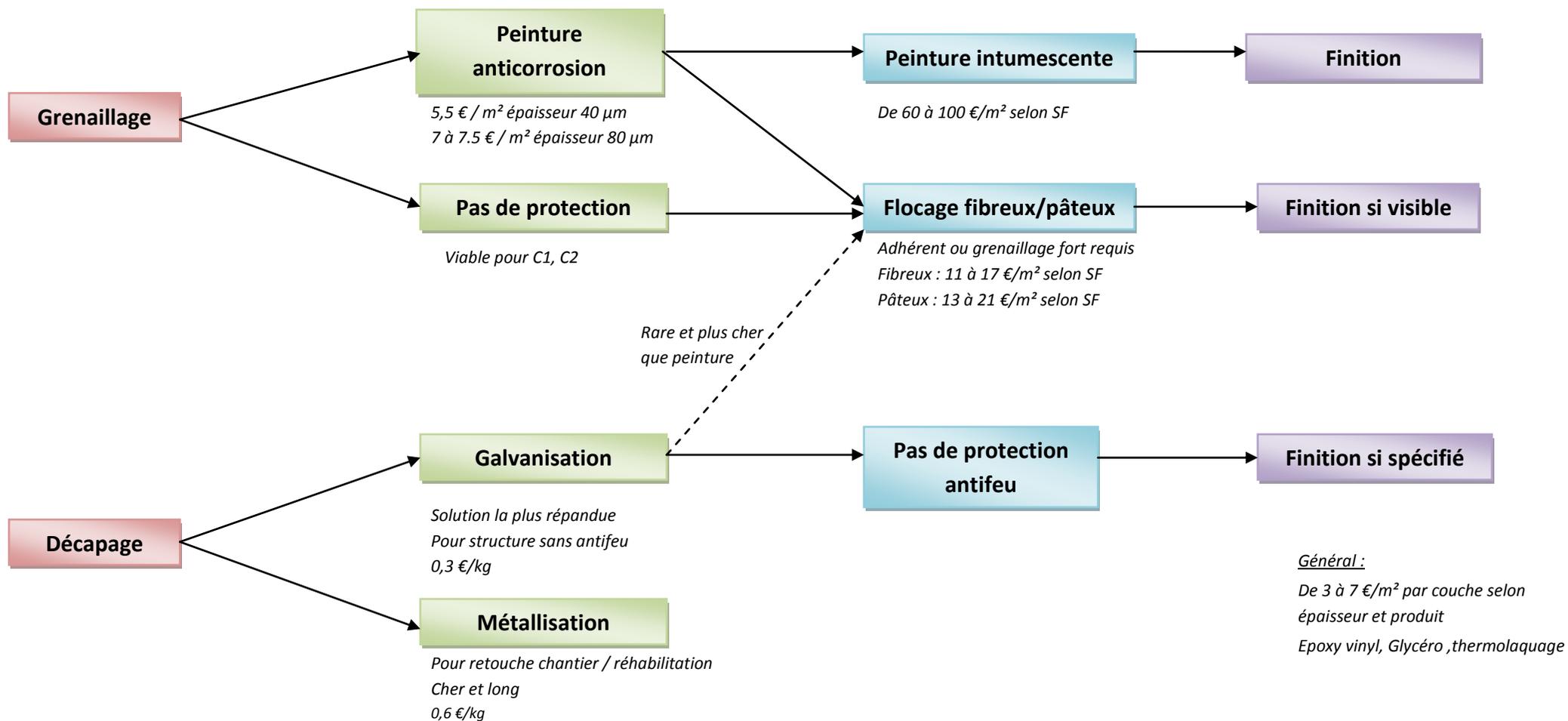
Possibilité de combiner leur fonction d'origine (acoustique, thermique, étanchéité etc.) à la protection incendie, ce qui apporte un gain financier.

Le niveau de stabilité au feu est variable en fonction de la gamme d'écran choisi.

Les écrans doivent assumer l'**étanchéité** aux gaz, l'**isolation** thermique et la **stabilité** nécessaire à la non propagation du feu, d'où une attention particulière pendant le montage (joints coupe-feu, assemblages).

Ce type de protection (comme la construction mixte), entraîne une augmentation non négligeable du poids de la charpente (jusqu'à 30 %), ce qui a une incidence au niveau des fondations.

RESUME DES SYSTEMES DE PROTECTIONS



PREPARATION DE
SURFACE

PROTECTION
ANTICORROSION

PROTECTION
ANTIFOU

FINITIONS

3.7. Transport de la CM

3.7.1. Corrélation entre planning de montage / de livraison

Le montage de l'ossature métallique est planifié de manière précise de sorte à assurer la stabilité de celle-ci pendant la phase de montage. Ce planning ne peut pas être modifié. La livraison doit donc être faite de sorte à respecter ce planning. Deux types de livraisons sont alors possibles :

- **Livraison à pose immédiate** : la livraison des éléments est guidée par le planning de montage. Les éléments arrivent pour être montés sans stockage. Cette livraison est privilégiée pour le chantier car il n'y a pas de problèmes de stockage des pièces de charpente.
- **Livraison par lot** : la charpente est livrée par lot (bac, profilé etc.). Plus facile pour l'entreprise CM, mais nécessite une zone de stockage conséquente sur le chantier. De plus, cela peut poser des problèmes pour retrouver les éléments à monter.

3.7.2. Dimension et chargement limite du moyen de transport

Le transport des éléments de charpente métallique joue un rôle important dans la **conception** de celle-ci. En effet, les dimensions du camion sont des critères limitants lors de la conception. Il faut faire attention à :

- La longueur du camion, dimensionnant la taille max. des éléments en sortie d'usine.
- Le chargement maximal.
- Le volume disponible (ex : pour les treillis).
-

Le choix du moyen de transport doit donc se faire dès la phase d'étude de la structure.

Grandes longueurs : Des camions pouvant aller jusqu'à 16 m de longueur peuvent être utilisés. Ils sont considérés comme des convois exceptionnels, mais sans besoin de voiture accompagnatrice, ce qui limite leur coût.

Pour des structures plus grandes (> 16 m, poutre treillis forte portée par exemple) dont l'assemblage doit être nécessairement réalisé en atelier, un transport par convoi exceptionnel avec accompagnateur est obligatoire.

3.7.3. Coût du transport

Le coût du transport de la CM est fonction de plusieurs critères :

- Le poids total d'éléments à transporter.
- Le type d'éléments (ex : poids volumique treillis plus faible -> plus de camions).
- La distance entre atelier et chantier (surtout pour les entreprises hors Ile-de-France !).
- L'éventualité de convois exceptionnels pour certaines structures.

Foisonnement de 30 à 50 %.

On peut estimer pour un camion de 25 tonnes, un poids moyen de transport de l'ordre de 17 tonnes.

Le prix unitaire d'un camion est principalement fonction de la distance à parcourir. Pour des ateliers en Ile-de-France, on peut compter sur 600 à 800 €, puis de 800 jusqu'à 1000 € en s'éloignant (France, Espagne, Allemagne).

Tous les ateliers de fabrication n'ont pas les structures pour fabriquer des tonnages importants. C'est pour ça qu'il est possible de faire fabriquer la charpente loin du chantier.

3.8. Montage de la CM

3.8.1. Programme de montage et méthodologie

Le montage de charpente métallique entraîne plus de contraintes que pour les autres structures, pour plusieurs raisons :

- Le **type d'assemblage et de liaisons**.
- Le **moyen de levage** utilisé.
- La **stabilité provisoire** de la structure (pendant le montage).
- La sécurité lors de la pose, avec notamment le travail en hauteur
- La possibilité d'**assemblage au sol**.

Ces contraintes sont à prendre en compte dès la conception de l'ouvrage.

3.8.2. Temps unitaire de montage

Les temps unitaires (TU) de montage en CM, exprimés entre autres en heure/tonne, permettent de prévoir la durée globale du montage de la structure. Ils peuvent fortement varier selon :

- La complexité de l'ouvrage.
- Le mode d'assemblage (boulonnage, soudure).
- L'architecture des nœuds (encastrement, articulation).
- Des conditions météo (soudure en hiver, travail sous la pluie).

Analyse des TU de montage

Une analyse des coûts de montage sur les précédents chantiers a permis de déterminer des TU de montage selon le type de bâtiment.

Le coût du montage total est régulièrement donné dans les devis des entreprises charpentes. Le coût moyen de main d'œuvre est de 40 €/h en 2013. Il permet de déterminer le nombre d'heures productives pour la réalisation de la charpente.

Une analyse réalisée en 1997 avait déjà permis d'estimer les TU de montage pour les chantiers de l'époque. Cependant, du fait de l'évolution du marché de la CM, de la taille et de la complexité des charpentes réalisées depuis 10 ans, une nouvelle analyse a dû être faite.

Ont été considérés les projets datant de 2005 à aujourd'hui. Les structures ont été réparties en trois grandes catégories :

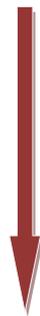
- **Les constructions légères** : Ossatures industrielles simples, entrepôts, treillis simples, structure en petits profilés, répétitifs, plancher et toiture légères.
- **Les constructions moyennes** : Ossatures industrielles classiques, ossatures d'immeuble, treillis, plancher lourd, structures PRS, structures encastrées.
- **Les constructions lourdes** : Ossatures complexes, IGH, gros profilés, Ossature ou toiture en grande hauteur et structure suspendue, très longue portée, structures cintrées.

Le tableau ci-après résume l'analyse faite en donnant des fourchettes de TU de montage selon le type de bâtiment concerné.

Ces chiffres décrivent des TU globaux pour l'ensemble de la charpente. Dans le cas de montages complexes mais exceptionnels par rapport au tonnage global, il vaut mieux raisonner pour l'élément indépendamment.

Ci-dessous sont classés dans un ordre croissant de difficulté de montage quelques exemples de montages exceptionnels :

- Structure classique, majoritairement articulée : 0 h/tonnes.
- Structure treillis : + 1 h/tonnes.
- Structure encastrée : + 2 h/tonnes.
- Structure cintrée : + 3 h/tonnes.
- Structure en tube : + 3,5 h/tonnes.
- Structure suspendue : + 4.5 h/tonnes.
- Très grande portée (montage en plusieurs fois) : selon le nombre de parties.



Les conditions climatiques ont aussi une influence sur le temps de montage, de l'ordre de **2 h/tonnes pour des journées pluvieuses**.

Type de construction	TU de montage (h/t)	Exemples	Exemples
CONSTRUCTION LEGERE Ossatures industrielles simples, entrepôts en portique, treillis simples, petits profilés	9 à 12	- Profilés simples et léger. - Structures portiques simples - Faible hauteur de montage. - Beaucoup de préassemblages en atelier	 <ul style="list-style-type: none"> - Ossature industrielle simple - Plancher léger
CONSTRUCTION MOYENNE Ossatures industrielles classiques Ossatures d'immeubles, treillis.	12 à 16	- Montage sur plusieurs étages - Beaucoup d'encastremets. - Treillis	 <ul style="list-style-type: none"> - Musée du quai Branly - Plancher lourd (Archives Nationales Pierrefitte)
CONSTRUCTION LOURDE Bâtiments métalliques à ossature complexe, gros profilés IGH	16 à 22	- Montages spéciaux - Très gros profilés - Très grande hauteur de montage - Beaucoup d'assemblages chantier	 <ul style="list-style-type: none"> - Ossature industrielle lourde (hangar Dassault) - Structure cintrée (Grande serre du zoo de Vincennes)

TABLEAU 15 : TEMPS UNITAIRE DE MONTAGE SELON LE TYPE DE BATIMENT

3.8.3. Moyen de levage

Le tableau ci-dessous résume les différents avantages et inconvénients des moyens de levage en fonction de critères de levage :

Critères	Grue mobile	Grue fixe
Place sur le chantier	Chantier exigü -> pas de place pour le maniement de la grue	Grue implantée -> pas de problème
Anatomie du chantier	Bâtiment de surface importante.	Bâtiment à grande hauteur
Poids des profilés	A choisir en fonction du poids max à lever	Vérifier le poids max de levée de la grue / éloignement de la zone
Vitesse de montage	Grue allouée seulement au lot CM -> vitesse de montage élevée	Interférence avec les autres lots -> vitesse de montage plus faible / « plage horaire » grue pour le lot CM
Sous-traitant au montage	Indépendance au niveau du moyen de levage	Interférence avec les autres lots/entreprises
Saturation de grue	Si grue fixe non saturée	Si grue fixe saturée

TABLEAU 16 : COMPARATIF GRUE FIXE / GRUE MOBILE

Le choix du moyen de levage se fera donc en considération des dimensions du chantier, de l'élément le plus lourd ou le plus volumineux à porter ainsi que du planning de montage (définissant la vitesse de montage de la CM).

Dans le cas où une petite partie de l'ossature doit faire l'objet d'un montage exceptionnel (fort tonnage, vitesse de montage élevée etc.), il est judicieux de louer une grue mobile pour le temps du montage, et de prendre pour le reste du chantier un moyen de levage mieux adapté.

Cadence de montage

Pour une équipe de monteurs (5 personnes), la cadence moyenne est de **50 tonnes/semaine**. Le temps de montage est généralement d'une **heure/tonnes** soit 9 tonnes/jour pour avoir une grue presque à saturation.

Ces données sont variables en fonction du type de structure à monter, et de sa répétitivité, mais une cadence soutenue ne pourra pas dépasser 80 tonnes/semaine.

3.8.4. Montage et stabilité provisoire

Préassemblage des éléments

Du fait de la dangerosité de l'assemblage des éléments en hauteur et du partage possible de la grue entre différents lots, le plus de travail possible se fera avant levage. Le préassemblage des éléments peut se faire :

- **En atelier** : dans le cas d'éléments transportables (vérifier le gabarit du transport).
- **Sur chantier** : les assemblages sont réalisés au sol. Les éléments assemblés doivent être autostable afin d'éviter les problèmes de stabilité provisoire ou d'utilisation de palonnier.

Il est aussi soumis à des facteurs limitants, comme :

- Le poids et le volume de la pièce préassemblée par rapport à la capacité portante de la grue.
- La distance et la hauteur à atteindre.
- La rigidité de la pièce (risque de détérioration lors du déplacement).
- L'aire de stockage disponible.



FIGURE 11 : ELEMENT ASSEMBLE AU SOL

Éléments provisoires d'ossatures

La principale contrainte lors du montage est de maintenir à tout moment la stabilité de la structure. C'est pour ces raisons qu'il faut planifier l'ordre du montage et son effet sur la stabilité de la structure. Tous les éléments n'étant pas autostable, il faut des **éléments provisoires d'ossature** afin d'assurer sa stabilité lors du montage. Ils peuvent être des:

- Éléments assemblés à l'ossature (croix de contreventement, poutre, poteau, hauban etc.).
- Etaiements.

Ceux-ci doivent être conçus et dimensionnés de manière à assurer la stabilité de la pose à la dépose (si dépose) de la même façon que les éléments définitifs.



FIGURE 12 : QUELQUES SYSTEMES DE STABILITE PROVISoire

Montage et assemblage définitif

En général, le montage débute par la pose des poteaux. Leur stabilité peut être provisoire assurée par l'intermédiaire de haubans ou d'étais, ou définitive, comme dans le cas des croix et portiques de sécurité.

Les ouvrages « stabilisateurs » tels que les ouvrages contreventés sont montés en priorité. Les autres éléments (arbalétrier, poutres etc.) seront ensuite assemblés aux éléments stabilisés.

Les assemblages provisoires permettent aussi de vérifier l'alignement, de l'aplomb et du nivellement de la structure. Une fois corrigés, on peut procéder à l'assemblage définitif.

L'assemblage définitif est réalisé par boulonnage. Deux types de boulons sont utilisés :

- **Boulons de classe de résistance 4.6 et 5.9 en usage général** : dans ce cas, le serrage se fait manuellement à la clé.
- **Boulons de classe de résistance 8.8 et 10.9 dans le cas de serrage contrôlé** : le serrage est contrôlé de façon à avoir en effort de traction spécifique dans la tige du boulon. Le boulon est mis en pré-tension par serrage à couple contrôlé, par tour d'écrou et en utilisant des indicateurs d'effort.

L'utilisation de ce type de boulon est recommandé pour les assemblages très sollicités ou soumis à de la fatigue (séismicité, vibrations de machines etc.).



FIGURE 13: BOULONNAGE

3.9. Les interfaces avec les autres lots

La sous-traitance systématique de la réalisation de la charpente métallique peut entraîner des problèmes avec les autres lots.

Les interfaces entre CM et les autres lots se situent principalement à trois niveaux :

- **A la conception** : charges supplémentaires prises en compte pour le dimensionnement amenées par les différents lots techniques, CVC etc., plans pour fixations bardages etc.
- **A l'exécution** : Fixation des appareils, réseaux, bardages etc.
- **A la réception.**

Dans tous les cas, c'est l'entreprise générale qui devra gérer ces interfaces.

Corps d'état	Interfaces de conception	Interfaces d'exécution	Interfaces de réception
Gros Œuvre	<ul style="list-style-type: none"> - Fournir les informations nécessaires au dimensionnement des fondations. - Fournir les détails des scellements au sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Fournir platines d'ancrage pour scellement. - Etre en contact pour une éventualité de livraison. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réceptionner les scellements pour mise en place de la charpente.
Couverture Etanchéité	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir le type de fixation sur charpente pour faire les plans. - Doivent fournir le type de fixation des gardes corps permanents. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer la fixation sur la charpente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent réceptionner le support pour mettre en place la couverture.
Bardage	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir les besoins en ossatures (lisses horizontales ou verticales). 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer le bardage sur la charpente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent réceptionner le support pour mettre en place le bardage.
Menuiserie extérieure	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir les types de fixation des menuiseries pour mise en place de chevêtre 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer les menuiseries extérieures sur la charpente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent réceptionner le support pour mettre en place les menuiseries extérieures.
Faux Plafond Cloison	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir l'implantation des faux plafonds. - Vérifier le positionnement des menuiseries extérieures. - Vérifier le volume après mise en place de l'isolant. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer les faux plafonds et les cloisons de charpente. 	
Serrurerie	<ul style="list-style-type: none"> - Vérifier maintien de la serrurerie sur les ossatures. 		
Electricité	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir la charge des appareils et le réseau pour le dimensionnement de la structure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer les appareils et les réseaux. 	
Plomberie Sanitaire	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir la charge des appareils et le réseau pour dimensionnement de la structure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer les appareils et les réseaux. 	
CVC	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir la charge des appareils et le réseau pour dimensionnement de la structure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer les appareils et les réseaux. 	
Ascenseur	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir le type de fixation pour dimensionnement de la structure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer les équipements. 	
Réseau Protection Incendie	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fournir la charge des appareils et le réseau pour dimensionnement de la structure. 	<ul style="list-style-type: none"> - Doivent fixer les appareils et les réseaux. 	

3.10. La réhabilitation en CM

3.10.1. Généralités

La réhabilitation doit tenir compte de contraintes techniques, réglementaires, esthétiques, économiques et environnementales.

Une auscultation de la composition du bâtiment doit être réalisée pour évaluer l'ampleur des travaux à mener et commencer la phase d'étude.

3.10.2. Les avantages de l'acier en réhabilitation

L'acier propose plusieurs avantages par rapport aux autres matériaux pour la réhabilitation des bâtiments :

- **Facilité de mise en œuvre et rapidité d'exécution** : Le montage rapide des ossatures métallique, grâce à l'assemblage en atelier, permet de réhabiliter des structures dans des délais courts (par rapport au béton). Les structures métalliques sont aussi économes en matériel et en main d'œuvre.
- **Variété et liberté architecturales** : L'utilisation de l'acier offre une souplesse architecturale (grandes portées) au bâtiment, mais aussi des possibilités d'adaptation et de transformation selon les besoins et les usages du bâtiment.
- **Pérennité des structures en acier** : Les structures acier sont faciles à entretenir, sans interrompre la vie de l'ouvrage. De plus, les protections de l'acier contre corrosion et incendie passe par des procédés connus et sûrs.
- **Respect de l'environnement** : Les réhabilitations en acier provoquent peu de perturbations pour l'entourage : les délais sont courts et les nuisances sont réduites. L'acier est aussi recyclable à l'infini, ce qui permet un recyclage effectif des bâtiments acier en fin de vie.
- **Légèreté** : Les structures acier sont plus légères que les structures béton, ce qui permet de limiter les charges sur les structures existantes (voir un éventuel renforcement des fondations), mais aussi de réduire le nombre de poteaux ou des planchers longue portée, ce qui offre un gain d'espace.

La réhabilitation en acier est possible sur tout type de structure, contrairement à la réhabilitation béton, qui n'est pas compatible avec les structures acier par exemple.

3.10.3. Particularité des travaux de réhabilitations

Les travaux de réhabilitation posent de nouvelles contraintes au niveau du montage de la charpente métallique, notamment au niveau du levage.

La chose à faire est d'évaluer les possibilités de levage dans les différentes zones d'intervention.

Dans le cas de chantier en « intérieur », où les grues fixes ou mobiles ne peuvent pas intervenir, des moyens de levages particuliers doivent être prévus, pour le montage comme pour la manutention des éléments. Plusieurs solutions peuvent être envisagées :

- Treuil : Adaptable à toutes les zones. Inadaptée aux lourdes charges.
- Manitou : plus maniable qu'un treuil, mais vérifier les accès aux zones d'intervention et les problèmes de surcharges causés par l'engin.

Les deux moyens sont mal adaptés à la charpente lourde, qui nécessite des moyens de levage plus performants.

Pour la manutention des éléments de charpente, l'utilisation de rouleurs est préconisée.



3.10.4. Chiffrage en réhabilitation

Le surcoût apporté par la réhabilitation par rapport à un chantier classique est difficile à évaluer. Il dépend beaucoup :

- du type de bâtiments à rénover.
- De la possibilité de levage.
- La difficulté d'accès aux zones d'interventions.
- Du type de réhabilitation (extension, renforcement de structure etc.).

Il est aussi très difficile à chiffrer précisément en phase d'étude.

Pour estimer ce coût, utiliser une **plus-value au kilo** peut être un moyen simple de chiffrer le surcoût de la réhabilitation par rapport à un projet en neuf.

IV.Chiffrage d'un lot CM

4.1. Décomposition d'un prix global

4.1.1. Méthodologie de chiffrage

Le chiffrage du lot Charpente Métallique se calcule en suivant les phases de réalisation de la CM :

- Etude.
- Fourniture.
- Fabrication en atelier.
- Protection anticorrosion.
- Transport.
- Montage.

Les estimations de prix de structures métalliques se font en général avec des prix au kilo d'acier, pouvant aller de 2 €/kg pour les structures très simples à plus de 4 €/kg pour les structures les plus complexes.

Les prix descendent très rarement en dessous de 2 €/kg, du fait du prix de la fourniture et du coût de la main d'œuvre en France. C'est envisageable pour les très grandes structures (plusieurs centaines de tonnes) composées d'éléments très simples (IPE par exemple).

La répartition d'un prix de charpente métallique se fait comme suivant :

- Fourniture de l'acier : de 25 à 35 %.
- Fabrication + protection anticorrosion : de 25 à 50 %.
- Pose de la structure : de 15 à 35 %.
- Etude : de 5 à 10 %.

La protection contre le feu et le levage ne sont pas traités par ce lot. Cependant, ces parties sont traitées par la suite, du fait de leur connexion avec le lot, et que les charpentiers les incluent souvent dans leurs devis.

4.1.2. Décomposition d'un prix

Etude

Le chiffrage de l'étude se fait en fonction de TU d'étude. Le coût horaire d'étude est estimé à 45 €/h.

Les TU d'étude vont de 2 h/t pour les structures répétitives à 7 h/t pour les structures complexes. Les structures classiques sont à 4h/t.

Fourniture des matériaux

Les prix de fourniture de matériaux varient fortement en fonction du type de profilés demandés. ArcelorMittal fournit chaque année la liste de prix de fourniture de ses profilés standards, prix variant selon la classe et la portée du profilé, la nuance d'acier, les additifs etc.

Les prix peuvent varier en fonction de l'aciérie, mais cette liste de prix donne une bonne base de données de prix.

Les prix sont très variables en fonction du cours de l'acier.

Fabrication en atelier

Les TU de fabrication sont détaillés dans la partie 3.4.3. Le coût horaire de fabrication est de 37 €.

Protection anticorrosion

Le calcul du coût de la protection anticorrosion se fait au kg pour la galvanisation et la métallisation et au m² pour la peinture anticorrosion.

La galvanisation coûte de 0,2 à 0,4 €/kg selon la taille et le nombre de pièces à galvaniser, auquel il faut ajouter le prix de la préparation des surfaces, allant de 0,05 à 0,1 €/kg.

Le coût de la peinture est plus volatile, en fonction du degré de protection à avoir, et donc du nombre de couche à passer. De plus, une finition peut être demandée. Les prix peuvent varier de 5 à 20 €/m² selon le système de peinture voulu. Cependant, en général, le **prix ne dépasse pas 9 €/m²**, e qui en fait une protection moins chère que la galvanisation.

Ces prix viennent des bases de données du service ainsi que des retours de précédents chantiers.

Protection contre l'incendie

Le prix de protection antifeu se calcule au m². Les variations de prix sont dues à deux facteurs : le degré de stabilité au feu requis, et le prix de la peinture intumescente (de 30 à plus de 100 €/ m² selon le degré voulu).

Transport

Le coût du transport se calcule au camion. Le prix d'un camion 25 tonnes varie de 600 à 1000 euros selon la distance du chantier et les entreprises. Des surplus peuvent se rajouter en fonction des convois exceptionnels. Le foisonnement (30 % en moyenne) doit être pris en compte : on peut considérer que les camions transportent en moyenne 17 tonnes chacun.

Montage

L'analyse des TU de montage sont détaillés en partie 3.8.2. Le coût horaire de montage est de 37 €.

Marge

La marge varie classiquement de 10 à 20 % selon les entreprises. Aujourd'hui, les affaires CM se traitent à 13 %.

Phase	Min €/kg	Max €/kg
Etude	0,15	0,5
Fourniture des matériaux	0,5	1,7
Fabrication en atelier	0,45	0,92
Protection anticorrosion	0,2	0,5
Protection contre l'incendie	0,3	2,5
Montage (transport compris, levage non compris)	0,35	1
Marge et FG	13 %	

TABLEAU 17: FOURCHETTE DE PRIX DES DIFFERENTES ETAPES DE REALISATION D'UNE CHARPENTE METALLIQUE

Analyse de l'influence du poids sur la variation du prix global

Le prix peut fortement varier selon le tonnage global de la prestation.

Une analyse des chantiers de l'entreprise sur une période de 10 ans permet d'évaluer les écarts moyens de prix selon le poids global de l'affaire. L'analyse des retours de chantiers a permis de trouver pour chaque chantier les poids et les prix totaux, et donc de déterminer le ratio €/kg.

Les variations de prix sont calculées par rapport à une base zéro correspond aux chantiers de 60 à 200 tonnes.

Poids de la structure (tonne)	Prix (€/kg)	Variation moyenne de prix/kg	Poids moyen des affaires (tonne)	Nombre de chantier depuis 2005
Supérieur à 500	2,54	-11 %	1050	3
Entre 200 et 500	2,70	-5%	375	3
Entre 60 et 200	3,07	0 %	95	10
Entre 30 et 60	3,26	+6 %	42	9
Inférieur à 30	3,71	+13 %	16	10

TABEAU 18 : ANALYSE DES PRIX AU KILO DES CHANTIERS OPB SELON LE POIDS TOTAL

Comme dans tout secteur d'activité, des grosses productions permettent de faire baisser les coûts unitaires des prestations.

Beaucoup des chantiers réalisés comprennent un lot CM dont la structure est petite. Cependant, sur les 6 chantiers où le tonnage est supérieur à 200 tonnes, 4 sont en cours et un seul date d'avant 2009.

Ces prix représentent des moyennes sur un panel de chantiers. Des disparités existent au sein de chaque regroupement, en fonction du type de structure voulue, des problématiques posées par le CCTP.

4.1.3. Estimation rapide

Un moyen plus rapide de calculer un coût de charpente métallique est de raisonner selon le type de structure.

Chaque type de structure entraîne des surcoûts dans différentes phases du projet.

On peut donc estimer des prix moyen de réalisation par structure, qui donnent une première idée du coût de la charpente.

Structure	Prix moyen de réalisation (marge comprise)	Nuance d'acier	Type de construction (cf 7.1.2.)	Poids total de la structure (rabais ST / taille de la prestation)
Profilé du commerce	2,4 €/kg	+ 0,1 € pour S355 +0,2 € pour acier haute performance	-0,1 € pour construction légère	De -11 % pour les grosses structures (> 500 tonnes) à +13% pour les faibles structures (< 30 tonnes)
PRS	2.8 €/kg		+0,2 € pour construction lourde	
Treillis	3,25 €/kg			
Tubes	3,7 €/kg			

TABLEAU 19 : PRIX MOYEN DE REALISATION DES PRINCIPALES STRUCTURES ACIER

Ces prix moyens sont calculés pour une structure classique :

- Structure de 100 tonnes d'acier galvanisé de nuance standard (S 235).
- Construction moyenne, type immeuble (voir 7.1.2) en neuf.
- Marge comprise.
- Ne tient pas compte de la protection contre le feu et du levage.

4.2. Outil de chiffrage CM

4.2.1. L'onglet Chiffrage

L'outil a pour but de chiffrer un lot CM en phase étude. Il prend en compte les points spécifiques influençant le prix de la structure :

- Le type de structure et d'assemblage, ainsi que la nuance d'acier.
- La complexité de l'étude.
- Les cadences de fabrication et de montage, ainsi que les points particuliers de fabrication/montage.
- Le type de protection contre la corrosion et le feu.

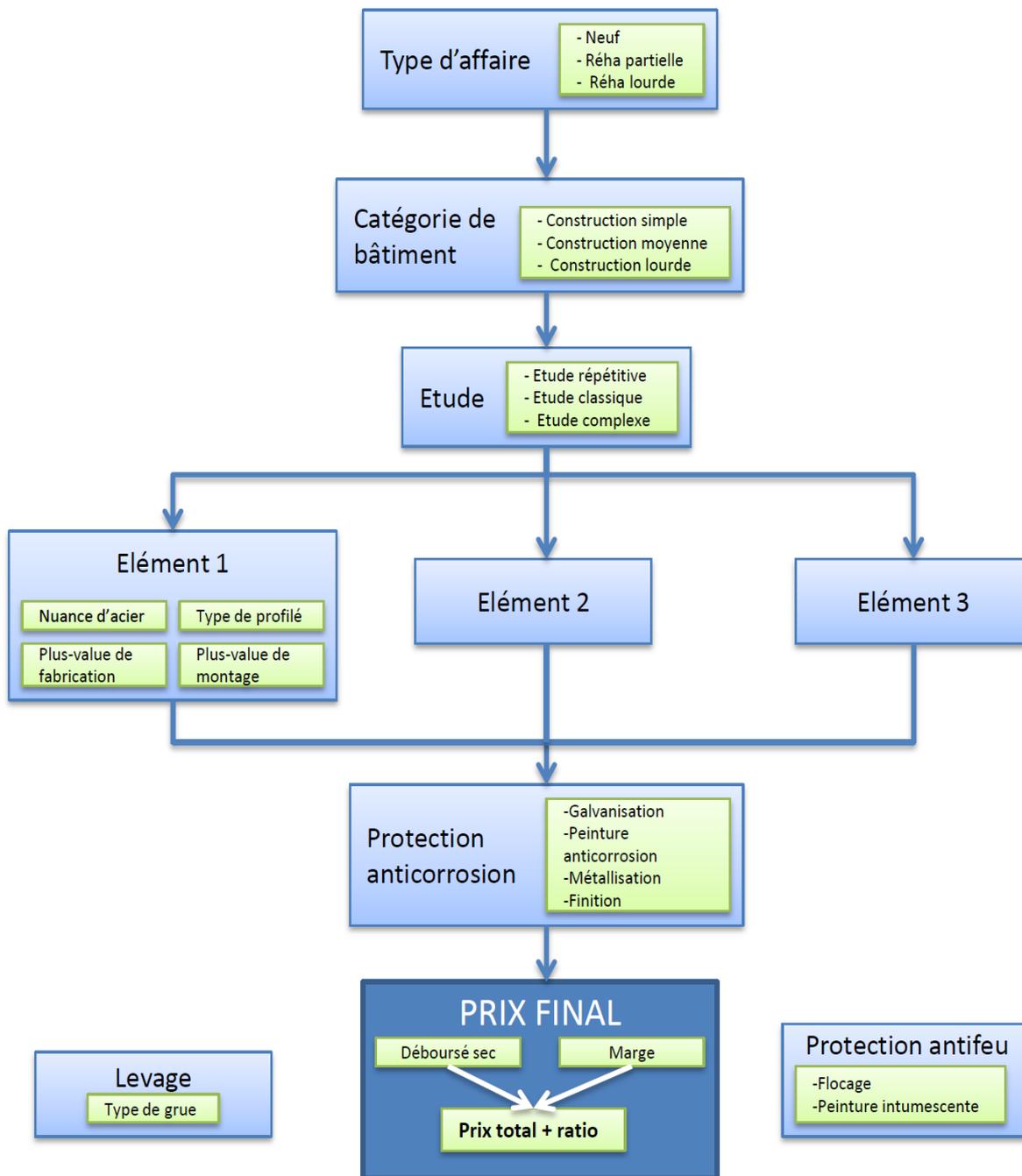


FIGURE 14 : SCHEMA EXPLICATIF DU FONCTIONNEMENT DU LOGICIEL

4.2.2. Exemple d'utilisation du logiciel

Dans cette partie, le fonctionnement précis du logiciel va être détaillé, en prenant pour exemple une structure classique reprenant une affaire traitée en 2007, le marché de Draveil.

Descriptif de la structure

Le bâtiment étudié pour l'exemple est une halle de marché dont la structure est entièrement en métal. Le bâtiment est un rectangle de 70 m sur 30 m, en RDC, et la hauteur sous plafond est de 6,5 m. La structure est composée :

- D'une couverture en poutre-treillis. Les poutres sont disposées selon la largeur du bâtiment, elles sont donc isostatiques et ont une portée de 30 m.
- Des poteaux en acier haute performance soutiennent la couverture sur l'ensemble du bâtiment. Ils font une longueur de 6,5 m.
- Des profilés placés à 3 m du sol relient les poteaux entre eux, pour créer un système de contreventement limitant les déformations horizontales et prévenant le flambement des poteaux.

La structure pèse au total 145 tonnes.

Type de bâtiment et étude

La première partie sert à décrire le type de bâtiment, avec :

- Le type de travaux : neuf, réhabilitation partielle ou lourde.
- Le type de bâtiment : Construction simple, moyenne ou lourde (pour calculer les cadences de montage : cf partie montage).

Ici, le bâtiment est un bâtiment neuf, et du fait tu treillis, du montage en grande hauteur (6,5 m et des portées), on peut considérer une construction moyenne.

La ligne « poids total » est juste un récapitulatif des poids entrés dans la partie « détail de structure ».

Du fait de la prépondérance des éléments treillis (50 % du tonnage global), le choix d'une étude « structure treillis » a été fait.

		Poids (kg)	Quantité	PU €	PU corrigé	Prix au kilo	Total HT
Dénomination	BAT 1						
Poids total		145000					
Réha/neuf	Neuf						
Type de bâtiment	Construction moyenne		1740 h				69 600
Total Etude	Structures treillis		5 h/t			0,23	32 625

Détail de structure

Le choix a été fait de rentrer la structure par type de profilé. Cela permet de retrouver l'ensemble de la structure sans rentrer trop en profondeur dans le détail, ce qui est difficile en phase d'étude. Les trois premières lignes servent à rentrer les caractéristiques des éléments (poids, nuances et type de profilé).

Les deux dernières permettent de chiffrer des spécificités de montage ou de fabrication (grande portée, structure cintrée, usinage lourd etc.).

Détail de la structure								
Solives (contre le flambement)	Poids		25000					
	Nuance d'acier	S 235			0,5			12500
	Type de profilé	Profilé commerce			0 €/kg			0
	Fabrication	Classique		300 h	37 €/h			11 100
	Plus-value montage	Classique		0 h	40 €/h			0
Poteaux à acier haute performance	Poids		25000					
	Nuance d'acier	HISTAR 460			0,7			17500
	Type de profilé	Profilé commerce			0 €/kg			0
	Fabrication	Classique		300 h	37 €/h			11 100
	Plus-value montage	Classique		0 h	40 €/h			0
Couverture en poutre treillis	Poids		95000					
	Nuance d'acier	S 235			0,5			47500
	Type de profilé	Treillis			0,1 €/kg			9 500
	Fabrication	Classique		2660 h	37 €/h			98 420
	Plus-value montage	Grande portée		902,5 h	40 €/h			36 100

Protection anticorrosion

Sur ce projet, la structure treillis est galvanisée, tandis que le système « poteaux-solives » est protégé avec de la peinture anticorrosion.

Pas de « finition » à entrer ici : le treillis galvanisé est laissé « brut », tandis que le système de peinture des poteaux sera complété par de la peinture intumescente, qui assurera le rôle de couche de finition.

Protection corrosion	Galvanisation à chaud	95000 kg	0,3 €/kg			25 650
Prépa. Surface cpis	Peinture anticorrosion 80 µm	1500 m²	7,1 €/m²			10 650
Finition		m²	5,5 €/m²			
Total corrosion					0,25	36 300

Transport et montage

Les cadences et prix de montage ont été calculés dans les parties précédentes.

Le transport est calculé automatiquement à partir du tonnage global, en tenant compte du poids moyen de chargement (foisonnement de 30 % -> 17 tonnes) et du prix unitaire du camion.

Transport	Par camion	17 t	800 €			6 824
Montage	Durée de montage	16,1 j				
Total montage					0,78	112 524

Levage

Une grue mobile 50 tonnes a été mise pour l'ensemble du montage (quand la case n'est pas remplie, est prise la durée de montage – ici 16 jours). Une grue supplémentaire est requise pour la pose des poutre-treillis.

Levage	Moyen de levage	Grue mobile 50 T		j	8t/j			16 675
	Moyen de levage	Grue mobile 35 T		7 j	8t/j			5 810
Total levage								22 485

Protection contre le feu

Seul le système poteau-solive est doté d'une stabilité au feu 1 h. Les poutres seront visibles ; le choix a donc été d'assurer la stabilité avec de la peinture intumescente.

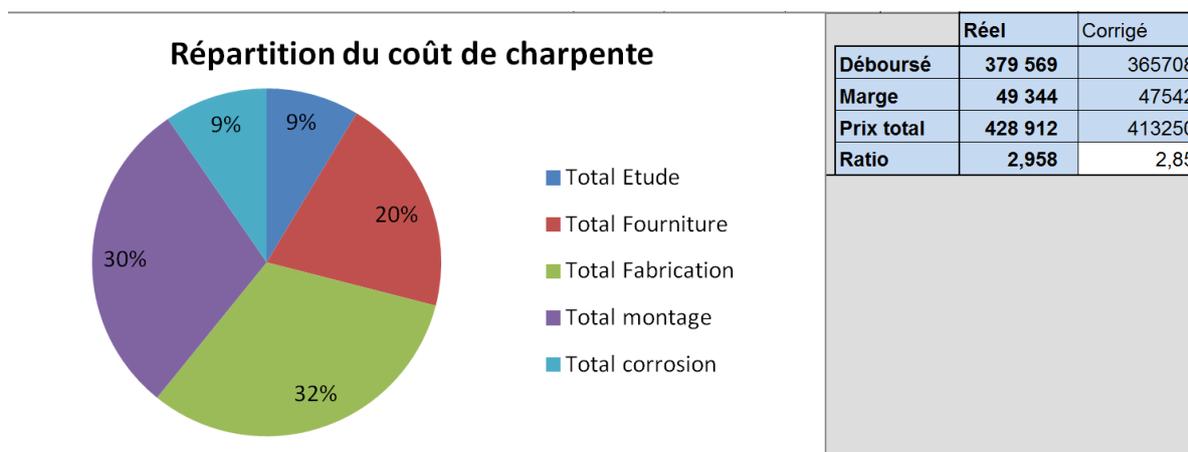
Protection feu	Type d'antifeu	Peint, intumescente 1 h		1500 m ²	65 €/m ²			97 500
Total antifeu								97 500

Données de sortie du logiciel

Le logiciel donne le déboursé sec de la structure (hors levage et protection contre le feu) : ici 379 569 €. La marge sous-traitants est rajoutée (ici 13 %), ce qui donne un prix total de 428 912 €, et un ratio de 2.958 €/kg.

Le logiciel ne gère pas lui-même les éventuels rabais causés par la taille de la commande ou autres, il est par contre possible de rentrer soit même un ratio corrigé.

Ici, on peut corriger le prix en passant à 2,85 €/kg (correspondant au prix traité remis au cours du jour), ce qui correspond à 3,5% de diminution du prix. Cette diminution de prix est cohérente avec l'analyse des prix selon le tonnage sur les chantiers OPB (4.1.2.).



La page complète de l'onglet Chiffrage est disponible en ANNEXE 5.

4.3. Onglet Métré

Le but de l'onglet « Métré » est, à partir d'une quantité d'acier profilé du commerce (en kg ou en ml), de déterminer les surfaces de peinture et de flocage.

L'onglet calcule ces surfaces à partir d'une base de données comprenant les dimensions des profilés du commerce : IPE, IPN, HE, ACB, profilés hexagonaux et octogonaux, UPE, UPN, U, L, creux ronds et creux carrés.

L'onglet est disponible en ANNEXE 6.

CONCLUSION

En travaillant pendant ces 4 mois sur la construction métallique au sein du service Etude de Prix, j'ai pu en comprendre les spécificités et les problématiques propres au lot, mais aussi plus globalement sur le déroulement des études.

Ce PFE a donc mené à la réalisation d'un mémoire technique recueillant tous les points techniques sur la charpente, de l'étude au montage de celle-ci, mais aussi d'une base de données de prix et de cadence des prestations associées à ce lot ainsi qu'un logiciel de calcul de coût de structures métalliques.

La construction du mémoire s'est faite en prenant compte de plusieurs éléments. Le premier a été d'insister sur la nécessité d'avoir une approche propre à la CM, différente de l'approche classique des structures béton. Le deuxième est l'analyse des problèmes et des spécificités techniques aux différentes étapes de réalisation, et à leurs influences sur la conception même de la charpente.

Le chiffrage du lot CM a été la deuxième grande partie de mon projet. Les prix de charpentes sont très volatiles en fonction des caractéristiques de charpente. L'étude doit donc être précise, en détaillant pour chaque étape le coût selon le type de structure, les protections mises en œuvre et les caractéristiques du bâtiment, on obtient une estimation fiable du prix global d'une structure acier.

Le développement du logiciel a donc été fait dans cette optique, en offrant à l'utilisateur un panel de choix de structures suffisant pour une phase étude, tout en donnant une liberté au niveau des choix techniques et des prix unitaires.

Personnellement, ce stage m'a permis de développer mes connaissances sur la construction métallique. L'école avait principalement axé l'apprentissage de la charpente métallique d'un point de vue structurel, tandis que j'ai pu développer avec cette étude mes connaissances techniques et en terme de coût.

Plus généralement, de part les études d'affaires traitées par l'entreprise auquel j'ai participé, j'ai pu découvrir le monde de l'étude de prix et de l'étude de projet en général ?

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Tableau

Tableau 1 : Activité des filiales de Bouygues Ile-de-france	10
Tableau 2 : Avantages et inconvénients des charpentes métalliques	21
Tableau 3 : Utilisation d'un profilé selon la nuance d'acier	22
Tableau 4 : Comparaison des assemblages par soudage et boulonnage.....	29
Tableau 5 : Comparaison des ossatures articulées et encastrées.....	29
Tableau 6 : Nombre d'heures productives de fabrication par type d'element.....	34
Tableau 7 : Cadence de fabrication des principales structures.....	35
Tableau 8 : Classification de l'agressivité du milieu environnant	36
Tableau 9: Avantages et inconvénients de la galvanisation.....	37
Tableau 10 : Avantages et inconvénients de la peinture anticorrosion.....	38
Tableau 11 : Avantages et inconvénients de la métallisation	38
Tableau 12 : Exigence de stabilité des principales structures acier	40
Tableau 13 : Avantages et inconvénients du flochage fibreux.....	42
Tableau 14 : Avantages et inconvénients de la peinture intumescente	42
Tableau 15 : Temps unitaire de montage selon le type de bâtiment	48
Tableau 16 : Comparatif grue fixe / grue mobile	49
Tableau 17: Fourchette de prix des différentes étapes de réalisation d'une charpente métallique....	58
Tableau 18 : Analyse des prix au kilo des chantiers OPB selon le poids total.....	59
Tableau 19 : Prix moyen de réalisation des principales structures acier	60

Figures

Figure 1 : Organigramme de Bouygues	8
Figure 2 : Répartition du CA selon les entités	9
Figure 3 : Répartition du CA selon les regions.....	9
Figure 4 : Organigramme de Bouygues Ouvrages Publics.....	11
Figure 5 : Etapes de réalisation d'un projet de Charpente métallique	17
Figure 6: Structure en treillis - Vélodrome de Saint Quentin.....	24
Figure 7: Structure tubulaire - Zoo de Vincennes	25
Figure 8 : Déroulement des études d'exécution	32
Figure 9 : Etapes d'élaboration et de fabrication de la charpente.....	33
Figure 10: Poteaux mixte acier/béton.....	43
Figure 11 : Elément assemblé au sol	50
Figure 12 : Quelques systèmes de stabilité provisoire.....	51
Figure 13: Boulonnage.....	52
Figure 14 : Schéma explicatif du fonctionnement du logiciel	61

BIBLIOGRAPHIE

- Bouygues Bâtiment International (2006) – *Mémento Charpente Métallique*
- Bouygues Bâtiment Habitat Social (2007) – *La Charpente Métallique pour les nuls*
- Bouygues Bâtiment Ouvrages Fonctionnels (1997) – *Histoire d'une Etude Metallique*
- OTUA (2005) – *Sécurité Incendie et Charpente Métallique*
- Guy Murry (2006) – *Aciers de construction métallique*
- Infosteel (2012) – *La protection contre la corrosion des constructions en acier.*
- CCTG (2012) – *Fascicule 4 – Fourniture d'aciers*
- DTU 32.1(2007) – *Travaux de construction métallique pour le bâtiment : charpente en acier*

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : Exemple de liaisons en CM

ANNEXE 2 : Rappel des notions de stabilité au feu

ANNEXE 3 : Analyse de la résistance au feu de l'acier et du béton

ANNEXE 4 : Règlementation dans les bâtiments publics

ANNEXE 5 : Onglet « chiffrage » du logiciel

ANNEXE 6 : Onglet Métré