



**Mémoire de fin d'études réalisé en vue de l'obtention
du grade d'Ingénieur Civil Architecte par Rahhal
Anabelle.**

**Relation entre la conception architecturale et la
conception structurelle.**

Vers une méthode d'analyse collaborative de la
constructibilité dans un projet de bâtiment.



Présenté par
Anabelle RAHHAL

Promoteur
Sylvain KUBICKI

Jury
Pierre LECLERCQ
Dimitri SCHMITZ
Thibaut BROGNEAUX

Membre extérieur
Koenraad NYS



Deuxième année du master en ingénieur civil architecte
Université de Liège – Faculté des sciences appliquées
Année Académique 2009 – 2010





Remerciements

Depuis le choix de nos études d'Ingénieur Civil Architecte, nous avons été confrontés à une association de deux mondes : l'ingénierie et l'architecture. En effet, nos études nous ont fourni un bagage important en matière de construction d'un projet de bâtiment et nous ont permis de combiner une compréhension de la construction au sein d'une architecture. Ainsi que de nombreux travaux pratiques nous ont aidés à se plonger dans la réalité du travail sur un projet en association avec des ingénieurs de construction, des ingénieurs architectes ou des architectes. Comment procédons-nous au sein d'une équipe pour faire aboutir un projet ? Une fois ce projet est abouti et construit répondra-t-il toujours aux attentes de l'architecte ? Ce travail de fin d'étude s'est inspiré de ces questions qui m'interpellaient.

M. Kubicki m'a soutenue à formaliser mes idées en axant l'étude de ce travail, d'une part, sur l'analyse du travail collaboratif menant à la constructibilité d'un projet et d'autre part, vers l'utilisation de l'outil informatique.

Je tiens à remercier sincèrement mon promoteur M. Kubicki pour son temps, sa disponibilité et son suivi de près de l'évolution de ce travail qui, en grande partie, est mené à bien grâce à lui.

Je tiens également à remercier M. Leclercq qui m'a orientée et m'a aidée pour bien cadrer le sujet depuis le début.

Merci aussi à M. Schmitz qui a participé aux discussions et à la mise en place du sujet.

Je remercie tout particulièrement M. Brogneaux qui m'a aidée à cerner le sujet depuis les premières phases de son élaboration et qui, par son expérience, m'a donnée des remarques déterminantes pour l'évolution du travail.

Je suis profondément reconnaissante à Mme. Janssen pour sa disponibilité, son aide pour le choix du cas d'étude, pour la documentation et surtout les explications qu'elle m'a fournies.

Un grand merci à M. Nys de sa disponibilité, son aide et ses explications concernant l'outil informatique du travail.

Je n'oublie pas mes amis et ma famille qui m'ont énormément soutenue durant toute la phase d'élaboration de ce travail.





Table des matières

Remerciements	3
1. Introduction.....	8
2. La collaboration.....	13
2.1 L'objet commun	13
2.2 Exemple	15
2.2.1 Centre Georges Pompidou	17
2.2.2 Synthèse	27
2.3 Expérimentations.....	30
2.3.1 Studio Digital Collaboratif	31
2.3.2 Le défi bois 2010	34
2.3.2 Synthèse	36
3. La constructibilité	42
3.1. Contexte & approches.....	43
3.2. Objectifs & barrières.....	46
3.3. La constructibilité dans le processus de conception construction	51
3.4. Synthèse	55
4. Etude de cas :	59
PROJET - Liège Cathédrale Saint-Paul	59
4.1. Introduction.....	59
4.2. Etude selon les critères de constructibilité.....	63
A. La conception architecturale souple & collaborative	63
B. La conception structurelle collaborative.....	66
C. Un dimensionnement correct.....	70
D. Une focalisation commune sur les nœuds cruciaux du projet	71
E. L'étude du site et de la faisabilité	83
F. La planification de la construction	88
4.3. Synthèse	92



5. Vers la simulation de la construction	97
5.1. Collaboration fondée sur un modèle 3D	98
5.1.1. Outil 3D de communication	98
5.1.2. Définition du niveau de détail au stade de la conception.	100
5.1.3. Modèle 3D descriptif.....	101
5.1.4. Autres aspects.....	103
5.2. De la 3D à la modélisation 4D	106
5.2.1. Contexte.....	106
5.2.2. Apport de la 4D.....	108
5.3. Utilisation de Google SketchUp- 4D virtual builder	110
5.3.1. La méthodologie	110
5.3.2. Les outils.....	111
5.3.3. La modélisation 3D	112
5.3.4. La simulation 4D.....	120
5.4. Synthèse	132
6. Conclusion	136
Table des illustrations.....	140
Bibliographie.....	144



INTRODUCTION



1. Introduction

Généralement, la notion d'œuvre architecturale ou de projet architectural englobe « le travail de conception de l'architecte et la réalisation sur le chantier, c'est-à-dire précisément là où se joue la caractérisation de l'objet architectural. » (Gaff, 2007) . Tout travail de conception d'un projet architectural est le plus souvent suivi d'une phase de réalisation qui peut être considérée comme l'aboutissement du processus de conception de l'ouvrage.

Un projet peut se définir, au départ par « un programme provenant d'une personne ou d'un organisme, que nous appelons dans les deux cas *maître d'ouvrage*, en opposition à *maître d'œuvre* qui désigne l'architecte. L'architecte partant de ces données, élabore une esquisse qui évoluera en avant-projet sommaire, puis en avant-projet définitif. Ce sera alors l'étape du permis de construire, au terme duquel le projet sera déclaré conforme ou non conforme aux prescriptions réglementaires. À ce stade, le projet est fixé dans ses grandes lignes, il peut alors être précisé techniquement, ne l'étant pas jusqu'à présent, de manière à préparer la phase de consultation des entreprises et la phase de réalisation. Le projet au stade final, est composé de plans d'exécutions.» (Gaff, 2007)

Souvent dans ces différentes étapes d'un projet, l'architecte a sa grande part du travail, il conçoit l'idée directrice du projet, il introduit les notions de spatialité architecturale, il élabore des plans, il essaie de défendre ses choix architecturaux et surtout il prend les responsabilités découlant de ses choix tout le long du projet. Cependant, la complexité des projets d'aujourd'hui et leurs ampleurs dimensionnelles nécessitent des spécialistes dans différents domaines. Ces experts peuvent aider



l'architecte dans ses décisions, ainsi qu'à trouver des réponses aux les questions possibles dans la phase de conception.

Souvent ces différents acteurs d'un projet ont différents points de vue et différentes compétences et n'interviennent pas de la même façon pendant l'évolution du projet. (Hanrot, 2010)

Un des spécialistes dans le monde de la construction est l'ingénieur de construction ou même le bureau d'étude constitué d'une équipe d'ingénieurs. Ces derniers traitent le projet d'architecture à leur tour, ils précisent structurellement et techniquement le projet et le préparent convenablement à la phase d'exécution.

Diverses sortes de liaisons sont entretenues entre les architectes et les ingénieurs. Comment les architectes et les ingénieurs collaborent-ils ? Il existe différentes catégories qui peuvent décrire les différents schémas de collaborations possibles. Mais dans le fond, il y a en général un schéma habituel, il est formé de quatre étapes principales:

« Parti architectural :

Assimilation des paramètres du projet par l'architecte sur le programme, les caractéristiques de l'environnement, les particularités du site, ... De ces informations sont tirés les principes qui guideront l'ensemble du projet.

Concept structurel :

Première(s) rencontre(s) entre les intervenants des domaines de l'architecture et de l'ingénierie... c'est à ce moment que les décisions les plus importantes se prennent.

Développement du concept structurel :

Sur les considérations établies ensemble à l'étape précédente, un principe structurel est mis au point et il y a suffisamment d'éléments pour que l'ingénieur puisse vérifier la pertinence du concept structurel imaginé et réaliser son pré-dimensionnement. Des échanges réguliers sur l'état d'avancement sont réalisés...

Etude finale :



Le principe structurel est achevé... A cet instant, les deux parties se concentrent séparément sur la formalisation des principes...»
(Kessels, 2008)

Par suite, la collaboration peut commencer plus ou moins tardivement, avec le concept de l'architecte qui peut être peu ou très avancé, l'ingénieur qui peut s'impliquer peu ou fortement dans la phase conception architecturale et même l'architecte qui a déjà des notions structurelles, il les introduit déjà dès les esquisses de son projet.

La collaboration prend souvent tout son sens dans la deuxième étape du processus pour les projets de dimension conséquente où une importance particulière est accordée à la fois à l'architecture et à la structure. (Kvan, 2000)

Quelle est le but de toute collaboration ? Une bonne collaboration mêle des objectifs communs, l'architecte s'investit pour voir son imagination se concrétiser et l'ingénieur relève le défi de créer une structure qui « tient » mais aussi qui remplit les fonctions demandées ; les deux ensembles et tout intervenant s'investissant dans un projet se laissent emporter par le désir de faire naître une nouvelle réalité non existante.

« Concevoir, en architecture, signifie construire une représentation de quelque chose qui n'existe pas encore. » (Scaletsky, 2003)

Plus la représentation et la perception de cette réalité en phase de conception est améliorée, mieux la phase d'exécution et de concrétisation peut être efficace et sans erreurs.

Cependant, comment donner de la confiance à l'architecte, dès la phase de conception et de l'assurer que son projet est réalisable ? Quelles informations et outils fournir à l'architecte pour garantir plus d'assurance au niveau de la conception structurelle, ainsi que pour pouvoir valider celle-ci ?



Ce travail de fin d'étude aborde une problématique qui semble essentielle pour le réel aboutissement de tout projet : *Comment savoir si un projet est constructible tout en répondant aux intentions architecturales?*

Le travail de fin d'étude présenté dans ce manuscrit comporte quatre parties essentielles :

La première partie décrira la notion de collaboration entre les ingénieurs et les architectes au sein d'un projet existant et deux expérimentations, où la question de constructibilité s'avère comme un défi à être relevé.

La deuxième partie comportera, quant à elle, une analyse de la notion de constructibilité sous ses différents aspects.

Ensuite, la troisième partie sera consacrée à l'étude d'un cas réel de projet, et comportera la description de l'étude de constructibilité de ce projet.

Enfin, la quatrième partie, plus expérimentale, décrira l'apport de l'outil informatique à l'étude de constructibilité dans un projet de bâtiment.



LA COLLABORATION



1. La collaboration

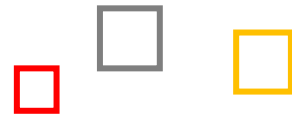
2.1 L'objet commun

Nous nous intéressons avant tout à l'objet architectural qui est au centre de toutes les discussions. C'est cet objet commun qui est en même temps l'aboutissement du projet et qui sera défini au fur et à mesure de l'évolution d'un projet. Il est le résultat d'une démarche complexe, avec l'intervention de plusieurs acteurs (architectes, ingénieurs et autres).

L'objet doit répondre à des dimensions diverses : spatiales, physiologiques, esthétiques, constructives, économiques, etc.... Souvent cet objet est un « tout », qui remplit une certaine fonction, mais qui exprime aussi une qualité architecturale.

D'après M. Salvadori, il y a « des composants fonctionnels et des composants structuraux de l'architecture et en général, ces des composants sont distincts » (Salvadori, 1980) . Plus précisément, quelquefois, la structure reste visible ou constituera l'œuvre même et devra être esthétique, mais souvent elle reste cachée et ne semble pas contribuer à l'architecture qu'elle supporte.

La structure est souvent l'origine des problèmes entre l'architecte et l'ingénieur d'un projet. Aujourd'hui, le travail de l'ingénieur consiste à assurer la stabilité d'un bâtiment, en général, il travaille en respectant les exigences conceptuelles de l'architecte. L'ingénieur est pragmatique dans sa méthode de travail et il est souvent spécialisé dans certains aspects spécifiques de la technique. Alors que l'architecte lui est un artiste qui exprime souvent ses goûts personnels, mais qui maîtrise la distribution de l'espace ; aujourd'hui les architectes ont aussi des connaissances dans les techniques de construction, et tout ce qui concerne les équipements



électriques et mécaniques, de même que des connaissances en matière d'économies de la construction, d'immobilier, de relations humaines ou de sociologie.

Le dialogue entre l'architecte et l'ingénieur peut se révéler difficile, chacun de ces acteurs ayant ses points de vue. Sans prendre en compte, la complexité supplémentaire du dialogue quand d'autres acteurs dans le projet interviennent à leur tour, comme le maître d'ouvrage, l'entrepreneur, ou d'autres, une chose est certaine : sans la structure, l'architecture ne peut pas exister. Pour l'ingénieur Cecil Balmond, les meilleurs projets sont réalisés par un bon ingénieur et un bon architecte, c'est-à-dire que ces bâtiments sont le résultat d'un vrai partenariat entre ces deux protagonistes de la conception.

Par conséquent, cette première partie du travail se penche sur la notion de collaboration et insiste sur la nécessité d'une collaboration efficace ne prenant pas seulement en considération les points de vue des architectes et des ingénieurs mais ceux de tout autre acteur dont l'expertise est importante dans le projet, en évaluant les convergences, les divergences de ces points de vue depuis la phase de conception du projet.



2.2 Exemple

Le schéma classique de développement de tout projet d'architecture est le suivant :

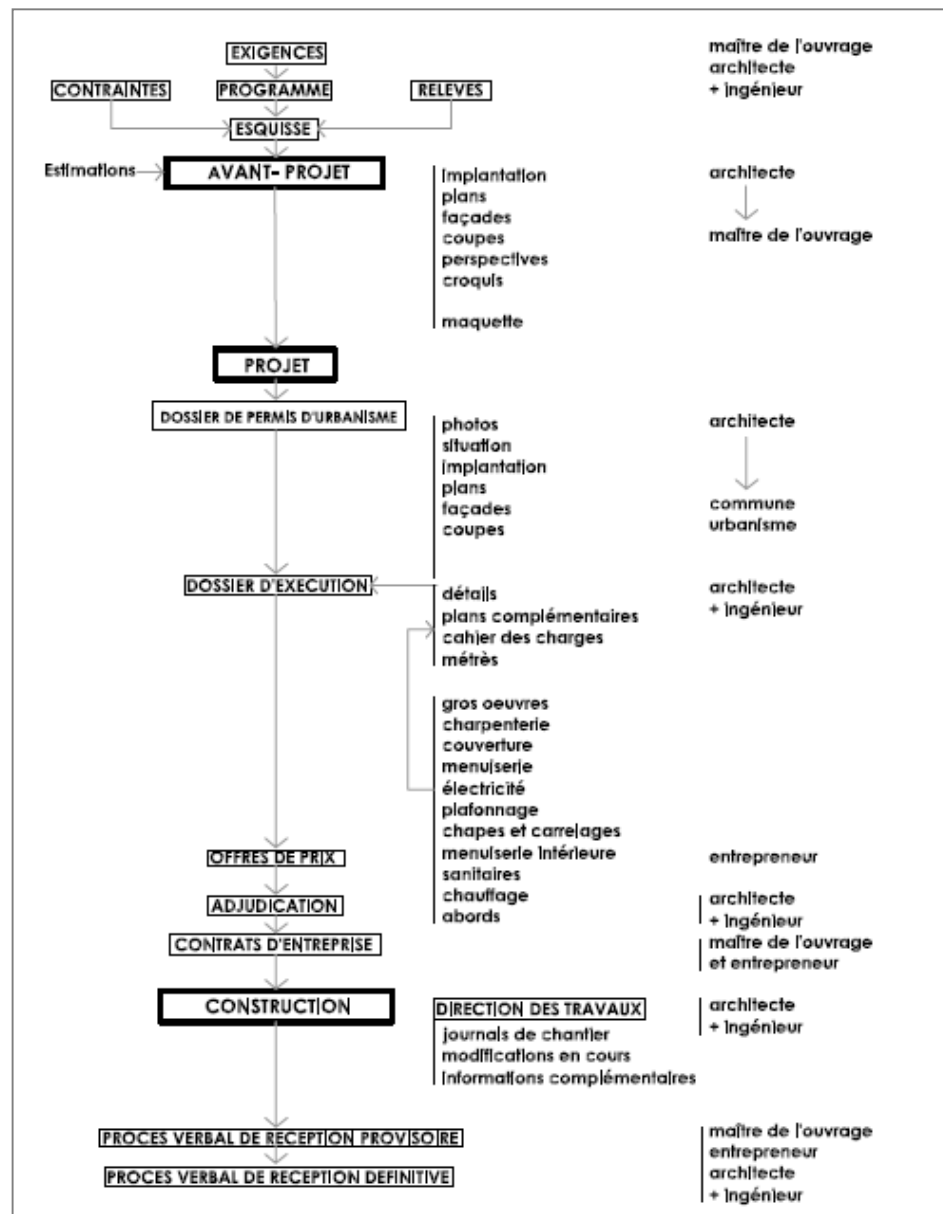


Figure 1 : Le schéma classique de développement d'un projet (HAUGLUSTAIN, 2007)



Dans le schéma précédent, la conception dans un projet englobe la naissance de l'idée, sa mise en place et la visée constructive, donc elle prépare le terrain pour la construction. Elle constitue l'essentiel de la phase de « pré-construction ». Un grand nombre de paramètres rentrent dans la conception, ces paramètres sont liés à l'architecture, à la structure et à l'exécution.

Ces paramètres de conception sont au centre des discussions entre les acteurs du projet, plus la collaboration de ces derniers est efficace meilleure sera la conception, plus riche et prévoyante au niveau du déroulement de la construction. On peut parler de conception collaborative pour la phase de « pré-construction ».

D'après Jean-Jacques Terrin, « la conception architecturale, fait appel à un nombre grandissant d'acteurs, aux compétences et aux expertises variées... Les objets à concevoir sont eux-mêmes devenus de plus en plus complexes... Les responsabilités collectives et individuelles des décideurs sont plus lourdes, et la prévention de ces risques pèsent sur les processus de décision. Cette complexité accrue pousse les différents acteurs de la conception à collaborer de façon plus efficace. »

(Terrin, 2009)



2.2.1 Centre Georges Pompidou

Si nous prenons l'exemple du projet du Centre Georges-Pompidou à Paris, nous examinons une façon de collaborer entre les membres d'une équipe formée d'architectes et d'ingénieurs. Cet exemple est choisi car il montre le travail en matière de réflexions collaboratives en phase de conception pour avoir le meilleur aboutissement possible du projet et s'assurer de sa constructibilité du projet avant le début de la phase construction.



Figure 2 : Centre Georges-Pompidou à Paris ([Insecula](#))

L'histoire de ce centre commence par un concours lancé par le gouvernement français au début de 1971. Le projet retenu était celui du groupe formé par les architectes Richard Rogers - Renzo Piano et l'équipe Structure 3 dirigée par Ted Happold et dont Peter Rice était un des associés.



L'idée de départ est lancée par les architectes : une structure très souple, flexible et formée d'une grande ossature métallique ouverte. Les architectes voulaient donner l'image d' « une machine à information » (Rice, 1990), avec un environnement accueillant où l'information et la culture est ouverte à tous.

Le parti architectural étant fixé par ses grandes lignes, le défi structurel lui avait toute son importance. L'équipe entière collabore ensemble en cherchant des solutions et des idées pour répondre aux intentions de l'architecture. Le projet était défini par les participants comme une exploration des idées et « pour voir si une collaboration entre Structure 3 et Piano & Rogers méritait d'être poursuivie » (Rice, 1990). La volonté d'avoir d'espaces vastes dégagés de poteaux a conduit à l'idée d'une structure avec des poutres à grandes portées. Cette solution constituait la solution la plus simple et la plus facile à mettre en œuvre mais elle ne répondait pas parfaitement aux intentions des architectes, le but étant d'explorer de nouvelles idées même si celles-ci semblent irréalistes.

La collaboration comprend une part essentielle de communication. Cette communication est nécessaire pour une compréhension parfaite de l'idée directrice du projet par tous les intervenants sur le projet. De plus, la collaboration est utile dans cette phase de conception, où le principe architectural est défini de façon souple et le principe structurel commence à se fixer à partir d'objectifs communs à atteindre entre les ingénieurs et les architectes. Le but est la recherche des idées nouvelles et inhabituelles, de faire enflammer l'imagination chez les concepteurs.

Par suite, les concepteurs ont adopté une solution s'appuyant sur l' « idée de planchers mobiles » (Rice, 1990) avec une importance particulière donnée à l'assemblage qui supporte le plancher.



Le projet gagne le concours et une nouvelle phase commence, celle de la préparation de son exécution... Comment ce projet peut être construit ? Est-ce qu'il est constructible ?

Deux exigences techniques apparaissent dans cette phase de conception structurelle : d'une part, « une grande portée de quarante-quatre mètres quatre-vingt supportait une lourde bibliothèque, qui devait pouvoir se trouver n'importe où dans le bâtiment. » D'autre part, « la structure s'étend d'une façade à l'autre, en incluant des zones de circulation sur l'avant et l'arrière. » (Rice, 1990)

La tâche était de trouver la structure adéquate. Les ingénieurs et les architectes ont adopté une solution qu'ils trouvaient la meilleure : « une poutre suspendue à un court porte-à-faux d'appui, ce que l'on appelle une « gerberette ». (Rice, 1990)

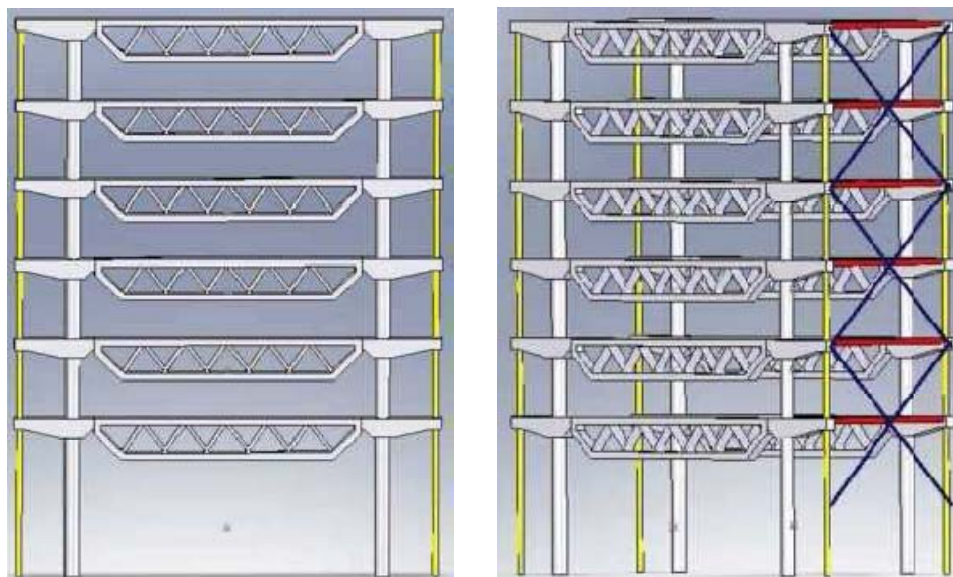


Figure 3 : Deux sections montrant les relations entre la poutre, la gerberette et le poteau.

Des portiques sont formés en enfilant les gerberettes dans les poteaux, en les fixant aux poteaux, avec la poutre treillis centrale posée entre les poteaux puis des tirants qui servent de contrepoids, les poutres centrales supporteront les planchers en béton et enfin, des contreventements placés en façade pour assurer la stabilité horizontale. Les tirants sont en jaune et les contreventements sont en bleu et l'espace de circulation prévue est en rouge.

L'ossature est une trame régulière d'éléments assemblés par travée.

(Bastin, Janssen, Matagne, & Derwa)

Dans cette partie, la collaboration aide dans le choix de la structure, le niveau de détail peut être poussé assez loin, celui d'un assemblage ou d'un élément particulier de la structure. Le choix structurel répond en première approche à une volonté formelle et spatiale.

Peter Rice a choisi l'acier moulé comme matériau, pour lui ce projet est une réalisation d'exception et le matériau utilisé doit avoir cet aspect chaleureux et subjectif et qui exprime « la vision singulière de son concepteur et de celui qui l'a réalisée, nous rappelant que ces assemblages de fer furent conçus et érigés grâce au travail des hommes dont elles portent la marque... Dans le bâtiment, les structures d'acier sont en général



réalisées à partir d'éléments standards, IPN, UPN, tubes ou cornières d'angle. Ces éléments sont laminés et extrudés de façon linéaire et continue, ce qui garantit leur qualité ainsi que leur uniformité visuelle géométrique mais, en revanche, ne laisse que très peu de place à l'expression personnelle.» (Rice, 1990)

La collaboration a joué moins son rôle à ce niveau, car le choix de l'acier moulé était la contribution personnelle de Peter Rice, donc cette décision provenait d'un seul membre de l'équipe. Même si cette décision a été fortement critiquée, surtout que le choix du matériau était venu avant de définir la façon avec laquelle il va être utilisé, cet ingénieur a voulu concrétiser l'idée de départ de Piano & Rogers de réaliser un « palais de la culture qui soit populaire, où l'homme ordinaire ne se sente pas intimidé. »

Le travail d'équipe s'accroît par la suite, l'équipe soutient le choix de ce matériau et un travail collectif commence pour s'assurer de la faisabilité, la notion de construction de ce projet débute par la conception de l'élément central du projet : la gerberette.

La première étape du travail constitue la recherche des informations et la consultation des experts dans le domaine de la fonderie, pour savoir ce que l'acier moulé impliquait comme problèmes et contraintes au niveau structurel. Après la récolte des informations qui a duré quelques mois, une phase de conception de la forme commence, Peter Rice précise que « certaines décisions ne pouvaient être prises que par les ingénieurs... les caractéristiques physiques de la gerberette et la nature des efforts qui s'exerçaient sur elle, ne devaient pas dépasser la charge que l'acier moulé est capable de supporter... Dans une telle situation la responsabilité de l'ingénieur est très claire : la structure doit fonctionner et ce, quelles que



soient les conditions de charge », d'où découle la forme de la gerberette :
« effilée du côté du tirant, là où la charge était reprise en tension, pleine et massive au niveau du poteau, là où le moment était le plus grand, et effilée à nouveau, là où venait s'accrocher la poutre. » (Rice, 1990)

Les architectes ont donné la forme finale de la gerberette en la redessinant plusieurs fois et en la mettant en volume, pour intégrer tout les paramètres étudiés. La pièce à force d'être travaillée commence à prendre la forme complète avec les bonnes épaisseurs, les bonnes ouvertures, etc.... Donc « la pièce était une œuvre singulière du groupe qui a travaillé à sa mise au point. » (Rice, 1990)

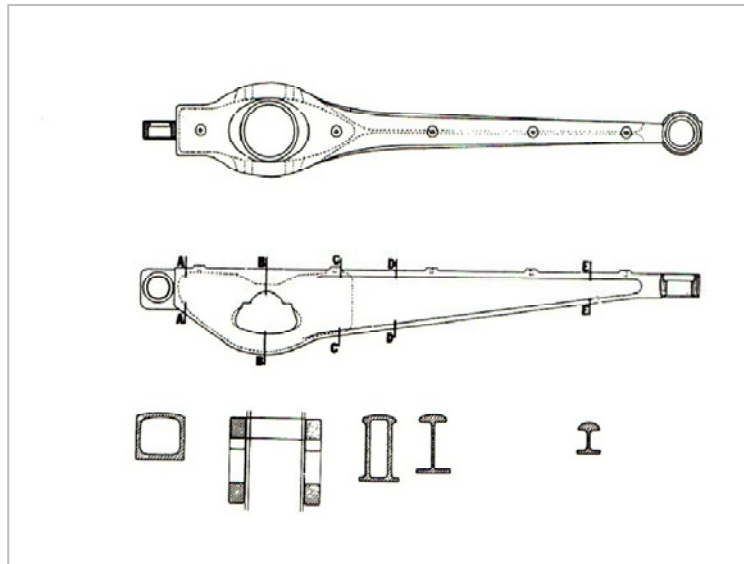


Figure 4 : « Plan, coupe longitudinale et coupe transversale de la gerberette, montrant les différentes sections. » (Rice, 1990)

Le principe de conception étant déterminé, il fallait procéder aux appels d'offres et donc il fallait définir le dessin et l'ensemble de la structure.

Le travail des ingénieurs ne s'arrêtait pas à ce niveau, la visée constructive d'un élément ne prend pas en considération, dans ce cas, juste sa bonne conception, mais sa réalisation et son fonctionnement exacte au moment de son positionnement dans la structure réelle.



Une fois que la conception semblait correcte, il fallait s'assurer et vérifier cette conception et les caractéristiques physiques réelles de cet élément en acier moulé, une étape en plus pour s'assurer que ce projet par ses éléments de base est réalisable.

Dans le cas de ce projet, la visée constructive englobe aussi cette partie de la vie d'un projet, il a fallu défendre le projet contre les critiques face aux experts et les représentants de l'industrie française. Le travail de collaboration se trouve à son apogée, car le projet jugé comme impossible par le bureau de contrôle, ce dernier ne croyait pas du tout à l'aboutissement du projet et il fallait prouver le contraire, il fallait prouver que le projet est réalisable.

La collaboration au sein de ce projet a créé une solidarité dans l'équipe qui a essayé de se reprendre et de s'attaquer aux critiques point par point pour trouver des solutions, les ingénieurs proposent un test à la résistance à la charge de tous les éléments principaux et donc utiliser « la mécanique de la rupture », nouvelle technologie pour l'époque qui se révélait une « idée remarquablement intelligente, qui s'avéra décisive lorsque la fabrication commença. » (Rice, 1990)

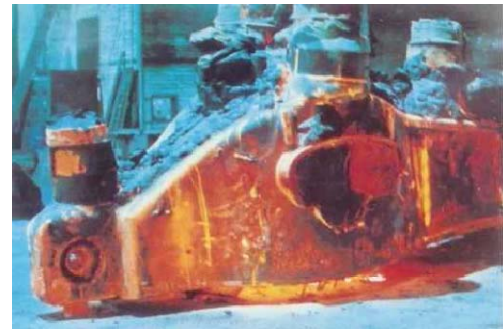
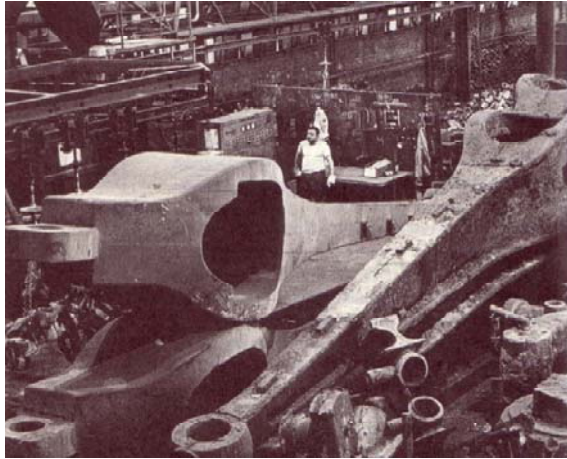


Figure 5 : « Gerberettes moulées dans la fonderie » (Rice, 1990)
(Bastin, Janssen, Matagne, & Derwa)

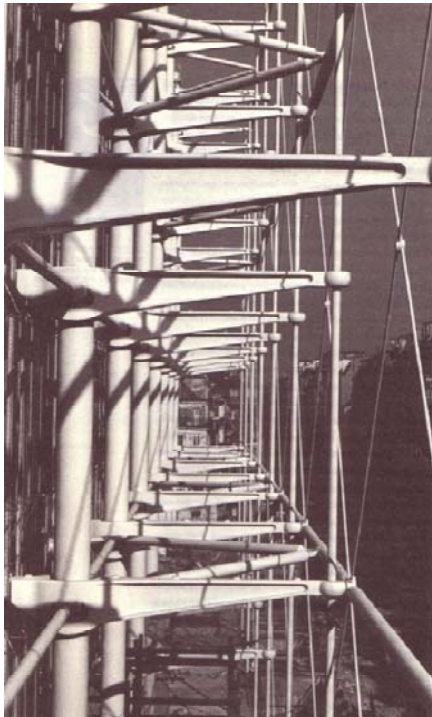


Figure 6 : « Vue des gerberettes » (Rice, 1990)
(Bastin, Janssen, Matagne, & Derwa)



D'après Peter Rice, en 1973, le Krupp de la Grosse Bertha est l'entreprise qui signera le contrat pour la réalisation de la structure telle que pensée par l'équipe de travail. Cependant en les testant, les éléments ne résistaient pas convenablement et cette phase de vérification était essentielle pour s'apercevoir que ces éléments ne sont pas convenables malgré toute la réflexion basée sur les normes allemandes. Ces tests ont montré le problème et une solution a été cherchée pendant des mois par des experts.

Finalement, un professeur Kussmaul de l'université de Stuttgart a donné la solution qui consistait à réchauffer les pièces déjà fabriquées.



Figure 7 : « Traitement de l'acier par échauffement »
(Bastin, Janssen, Matagne, & Derwa)

Encore une fois, d'après ces événements, l'aboutissement à des éléments bien conçus par toute l'équipe, les architectes et les ingénieurs ont mis toute leur connaissance dans leur élaboration, la validation du travail intrinsèque correcte de ces éléments de la structure avant leur emplacement sur site, l'importance d'une confrontation de connaissance et d'expertise nécessaire pour trouver une solution à un problème avant son arrivée sur chantier, avant même que le projet ne soit en exécution, ces trois critères peuvent être définis sous la notion de la constructibilité de ce projet.



Une notion importante, qui vient s'ajouter, à la série de réflexions sur la construction, c'est le respect des délais fixés. Dans ce projet en particulier, une réflexion est faite sur ce délai de cinq ans qui risquait de ne pas être respecté avec les problèmes rencontrés en phase de vérification structurelle.

La division des tâches et la gestion au sein d'une équipe et la relation avec l'entrepreneur sont aussi des critères influençant la constructibilité d'un projet.

Dans ce projet en particulier, sous l'équipe principale formée des architectes et des ingénieurs, il y avait des équipes secondaires qui eux sont chargés de tel ou tel élément du projet.

Le dialogue et la confiance qui peuvent exister entre les membres d'une équipe aident pour la prise des décisions, et ils permettent un meilleur aboutissement du projet et une meilleure résolution des problèmes.

La relation avec l'entrepreneur est aussi à signaler car elle n'est pas toujours facile, car souvent l'entrepreneur cherche la facilité et n'est pas forcément intéressé par les enjeux du projet.

Sous l'esprit d'une bonne collaboration, une relation avec l'entrepreneur doit principalement se baser sur une bonne communication qui pourra sensibiliser l'entrepreneur en le faisant prendre part au projet plus tôt dans la phase conception, pour que lui aussi, apporte le meilleur de son expérience et de sa connaissance dans le domaine.



2.2.2 Synthèse

« Ce qui fonctionna le mieux, finalement, fut la communication entre l'architecte et l'ingénieur- un dialogue pourtant réputé difficile. » (Rice, 1990). L'aboutissement réel d'un projet est précédé de toutes ces phases de discussion et de questionnement et de communication entre les membres de l'équipe, surtout entre les ingénieurs et les architectes qui sont en général au centre de toutes décisions. Chacun de l'équipe apporte son bagage différent en matière de connaissance dans son domaine. Les différents aspects de la constructibilité tirés de ce projet peuvent être résumés à ces différentes notions :

- **Une conception architecturale** du projet de départ de façon souple, admettant des changements, avec des grandes lignes directrices du parti architecturale.
- **Une communication efficace** au sein de l'équipe pour une appréhension précoce de l'idée directrice du projet et de tous ses enjeux.
- **Une recherche et une discussion pour le choix de la structure** qui répond aux intentions de toute l'équipe avec des schémas de base des éléments principaux de la structure, pour définir le niveau de détail et évaluer l'importance à donner à chaque élément pour une meilleure visualisation de l'intention des concepteurs et la validation de ce choix par les architectes .
- **Une focalisation sur les éléments les plus importants du projet**, la définition de leurs caractéristiques, leurs positionnements au sein de la structure, leurs comportements, la précision de leurs dimensions, de leurs



formes et leurs influences sur la spatialité et les intentions architecturales.

- **Un dimensionnement** proprement dit des éléments structurels pour s'assurer que la structure remplit bien sa fonction portante et la validation de la convenance de ces éléments (standardisés ou non) sous les charges réelles.
- **Une recherche importante et efficace d'informations et de solutions aux problèmes possibles** et les résolutions de tous les nœuds susceptibles de poser problèmes au niveau de l'exécution sur chantier. Dans certains cas de projets compliqués, comme celui étudié plus haut, l'appel d'experts extérieurs qui ont une base plus large et plus fiable en matière de connaissance de construction afin de contrôler des points importants qui ont pu échapper aux membres de l'équipe.
- **Le respect des délais** et l'évaluation des durées des tâches à prévues sur chantier.
- **La bonne gestion des tâches** au sein de l'équipe et avec l'entrepreneur par la suite.

La lecture du chapitre de Peter Rice, nous permet d'évaluer les contributions des acteurs (architectes et ingénieurs de construction) dans les différents aspects cités précédemment. Nous proposons de schématiser les points de vue relatifs de ces acteurs, en s'inspirant des schémas radar établis par Stéphane Hanrot et qui reprennent différents points de vue de différents acteurs (Hanrot, 2010).

L'échelle est la suivante : 0 = Aucune contribution | 1 = Apport non négligeable | 2 = Apport important | 3 = Apport dominant.

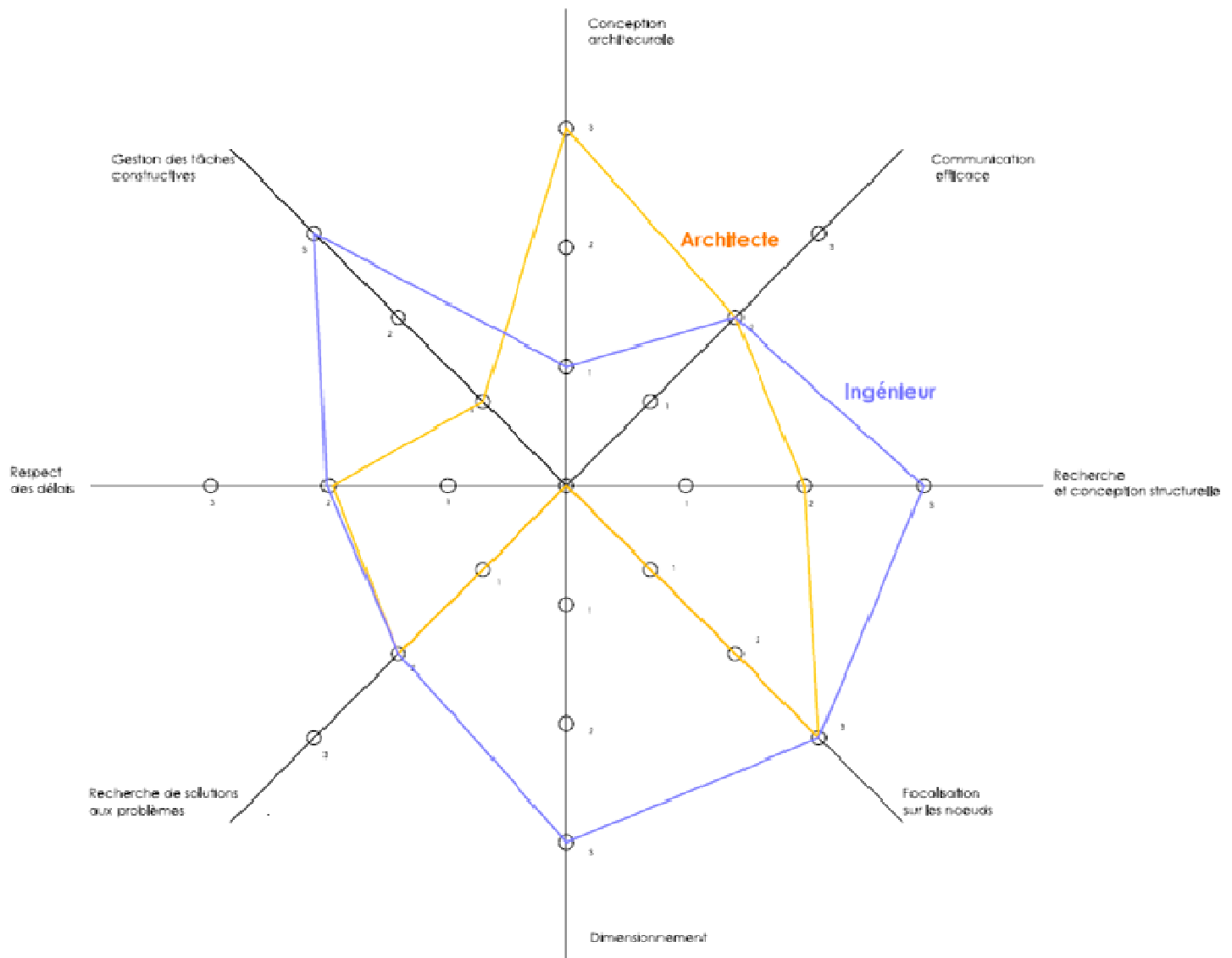


Figure 8: Schéma radar - Comparaison relative de la contribution de l'architecte et de l'ingénieur dans les différents aspects de la constructibilité, pour l'exemple du Centre Georges-Pompidou.



2.3 Expérimentations

Comme l'exemple précédent, « la conception peut être considérée comme un processus d'organisation » ou plutôt une « co-conception » (Terrin, 2009).

En effet, pour J.Terrin, les étapes du projet ne sont plus successives par couches séquentielles d'informations, mais la conception se définit par des tâches qui sont mises en parallèles contribuant à un enrichissement progressif depuis un document de base avec des données directrices initiales, pour intégrer la logique d'intégration multidisciplinaire.

Est-ce que, plus précisément, nous ne nous attendons pas à un architecte *leader-collaborateur* avec les ingénieurs et les autres acteurs, dans le but d'une visée constructive réussie du projet architectural?

« C'est au sein d'une équipe projet élargie que l'architecte devra insérer ses compétences de créateur, d'inventeur. Il mettra ses qualités de concepteur, de médiateur, d' « agent d'information », au service d'un projet collaboratif, creuset de compétences multiples, moteur de l'innovation. » (Terrin, 2009)



2.3.1 Studio Digital Collaboratif

L'architecte n'a pas toujours cette compétence de chef de projet, de gérer les débats, de favoriser les négociations et de prendre des décisions nécessaires au bon moment, cependant l'idéal est d'avoir vécu plusieurs collaborations dans sa vie professionnelle, même sa vie étudiante à plus petite échelle, et d'avoir eu cette expérience de collaboration avec d'autres professionnels du milieu de la construction.

Pour vous donner une idée, voici une analyse brève de deux expériences personnelles au sein du sujet d'une conception collaborative à la petite échelle de la vie d'étudiant.

La première expérience s'est déroulée dans le cadre du cours du « Studio Digital collaboratif » qui était une expérience marquante pour la plupart des étudiants de ma promotion. Pour la première fois, nous avons travaillé en équipe de projet, nous étions un groupe de cinq étudiants de deux universités différentes ayant deux façons de concevoir très distinctes.

Notre conception du projet depuis le départ se résumait à des mots et des idées récoltées avec des dessins, les membres de l'équipe étant tous des architectes, nous n'avons pas le choix, chacun de nous a compris que chaque décision prise devait être acceptée par tous les membres de l'équipe, au moins dans les premiers pas de la conception.

L'architecture est un monde très subjectif et faire un débat autour de notions abstraites ne faisait pas avancer le projet. Ce qui a fait avancer le projet c'est le travail d'équipe, les grandes lignes du projet se sont définies après des discussions, souvent pas très faciles, le but étant de trouver un compromis et une solution riche.

Ce travail commun n'était pas dans une visée constructive réelle, mais l'étude de la structure, des techniques spéciales, de la gestion de l'énergie,



en faisaient partie également. Par suite, un des avantages de cette collaboration est que très tôt dans le projet, nous avons pu discuter de la structure, avant même que tout plan précis soit défini, nous avons évoqué les différentes possibilités de structure. La structure n'a pas défini l'architecture, mais un choix de structure a été précisé en fonction de la qualité architecturale souhaitée et de la spatialité visée. L'architecture et la structure se complétaient depuis les premières lignes du projet.

Il fallait chercher les informations nécessaires en matière de structure portante et superposer plusieurs essais et plusieurs idées qui combinaient l'architecture et la structure. Une phase de créativité est suivie par une phase de gestion, où la division des tâches est nécessaire pour pouvoir aller plus loin dans la précision du projet. A un moment, le travail d'équipe apprend la solidarité et le fait de faire confiance à l'autre. Les tâches sont faites séparément par chacun des membres du groupe, mais une communication continue était présente entre nous et à distance, de même que nous disposions d'une plate-forme électronique efficace pour nous aider à partager nos documents de différents formats, ce qui rendait la consultation et la critique des documents faciles.

Finalement, cette expérience reste à petite échelle, bien encadrée et elle ne représente pas forcément la réalité des projets d'aujourd'hui, mais au moins elle permet à des étudiants comme nous, de pousser la réflexion loin, de ne pas se limiter à certains choix, alors qu'une optimisation des choix et des solutions face aux contraintes imposées est possible en s'ouvrant vers des personnes compétentes dans leurs domaines.

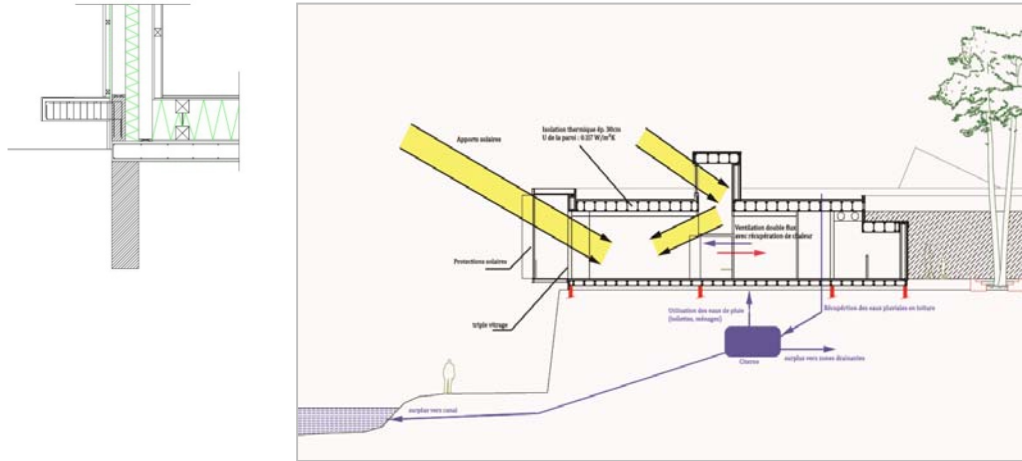


Figure 9 : Le résultat de la collaboration : Réflexions dans divers domaines ; architecture, structure, HQE, accessibilité, ambiances, etc....



2.3.2 Le défi bois 2010

La deuxième expérience est plus intéressante par son aspect « exécution réelle ». Le défi en 2010 portait sur la réalisation d'une structure en bois symbolisant une galerie palimpseste sur le site du château d'Epinal en France. Nous étions un groupe de cinq personnes, à la fois d'ingénieurs et d'architectes, provenant de plusieurs universités européennes.

La conception a commencé comme une discussion, les architectes comme les ingénieurs avaient leurs idées de cette structure, chacun à sa façon. Le site nous était imposé et il fallait bien en tenir compte également.

La confrontation des idées n'était pas facile, un effort particulier devait être exercé pour repasser en vue toutes les idées avec le groupe et ne prendre que l'essentiel de la multitude des idées, classer ces idées en deux ou trois lignes directrices, celles qui sont les plus évidentes pour tout le groupe.

Une fois que les idées directrices étaient acceptées par tout le groupe, la phase suivante constituait en une recherche d'une forme plus concrète.

L'affrontement est là, la créativité des architectes était difficilement acceptée par les ingénieurs, ce n'était pas une question d'exécution de la structure mais une question de compréhension et de points de vue totalement différents.

Pour une meilleure compréhension globale, chaque idée était traduite par une maquette en carton provisoire, il fallait absolument un support commun, un objet de discussion. La maquette restait très basique, mais elle a servi à trouver une solution optimale, après beaucoup de discussions.

Une fois que la maquette semblait répondre aux objectifs initiaux et englober nos idées communes, la phase de conception n'était pas encore finie. L'objet est créé mais il n'existe pas encore, il faut le définir.

La maquette en carton trop fragile, trop petite, très peu précise pour être manipulée, il nous a fallu un autre support beaucoup plus précis.



La solution est une modélisation 3D, avec des hauteurs précises et une vue beaucoup plus réaliste qui nous aidera à finir notre conception convenablement, et à aider tout le groupe à appréhender complètement la forme.

Après la 3D, tout le groupe avait bien en tête à quoi ressemblerait cette structure. Ainsi, nous avons débuté la conception des nœuds de la structure et des éléments structuraux, nous nous sommes divisés les tâches de cette conception structurelle : le maintien de la structure primaire, l'encastrement des colonnes à la base, l'assemblage des colonnes, les planchers, etc.

Le dimensionnement proprement dit est resté de la spécialité des ingénieurs, la confiance dans leurs calculs était une évidence car la collaboration apprend à faire confiance aux autres, surtout quand les délais sont courts et que le travail ne peut pas être vérifié plusieurs fois.

Le choix des sections, des quantités, des dispositions précises, même le choix des boulons et des vis, constituaient tout le travail préparatif avant l'exécution.

L'ordre dans lequel la structure était montée a nécessité une planification pour préciser la succession des tâches et parfois la mise en parallèle de certaines. L'encombrement des éléments n'étant pas le même et le site étant étroit, une attention particulière était donnée pour ne pas bloquer l'accès à certaines parties de la structure. Le site jouait aussi bien que mal son rôle pour la construction de cette structure qui a été baptisée : « Vertige Ligneux ».

Malgré la phase de conception bien détaillée, nous nous sommes retrouvés avec des détails oubliés et des éléments de finition à définir au moment même de l'exécution.



Figure 10 : Inspiration, idée et exécution.

2.3.2 Synthèse

Ces deux expériences d'envergure restreinte par rapport à un projet réel permettent d'appréhender, plus concrètement, la collaboration d'une équipe de travail, ainsi que la notion de conception collaborative, d'organisation, la réflexion sur la construction future et la planification d'un projet réel à une échelle très restreinte.

Dans ces deux expériences de collaboration, la prise en considération depuis la phase de conception, des différents points de vue a pu réduire les désaccords et problèmes et surtout pour dans le deuxième diminuer les risques en phase d'exécution.

Si nous prenons le premier exemple, nous pouvons tirer une série de tâches principales accomplies par le groupe et qui ont aidé à l'avancement du projet :

- **La conception architecturale collective**, qui était un mélange des mises en commun des idées.
- **La communication** principalement basé le dialogue.



- **La conception structurelle** qui a fait l'objet de discussions nombreuses.
- **Le dimensionnement** de la structure et des techniques spéciales.
- **La division de certaines tâches et leur gestion** entre les membres du groupe, pour un meilleur aboutissement dans les différents domaines (implantation, détails plans, structure, éclairage, HQE, ambiances intérieures, etc. ...)
- **L'échange de documents de travail** sur la plate-forme et de façon bien précise.

De la même façon, que précédemment, nous élaborons un schéma radar qui reprend la contribution, cette fois-ci, des architectes et des ingénieurs-architectes, dans les différentes tâches.

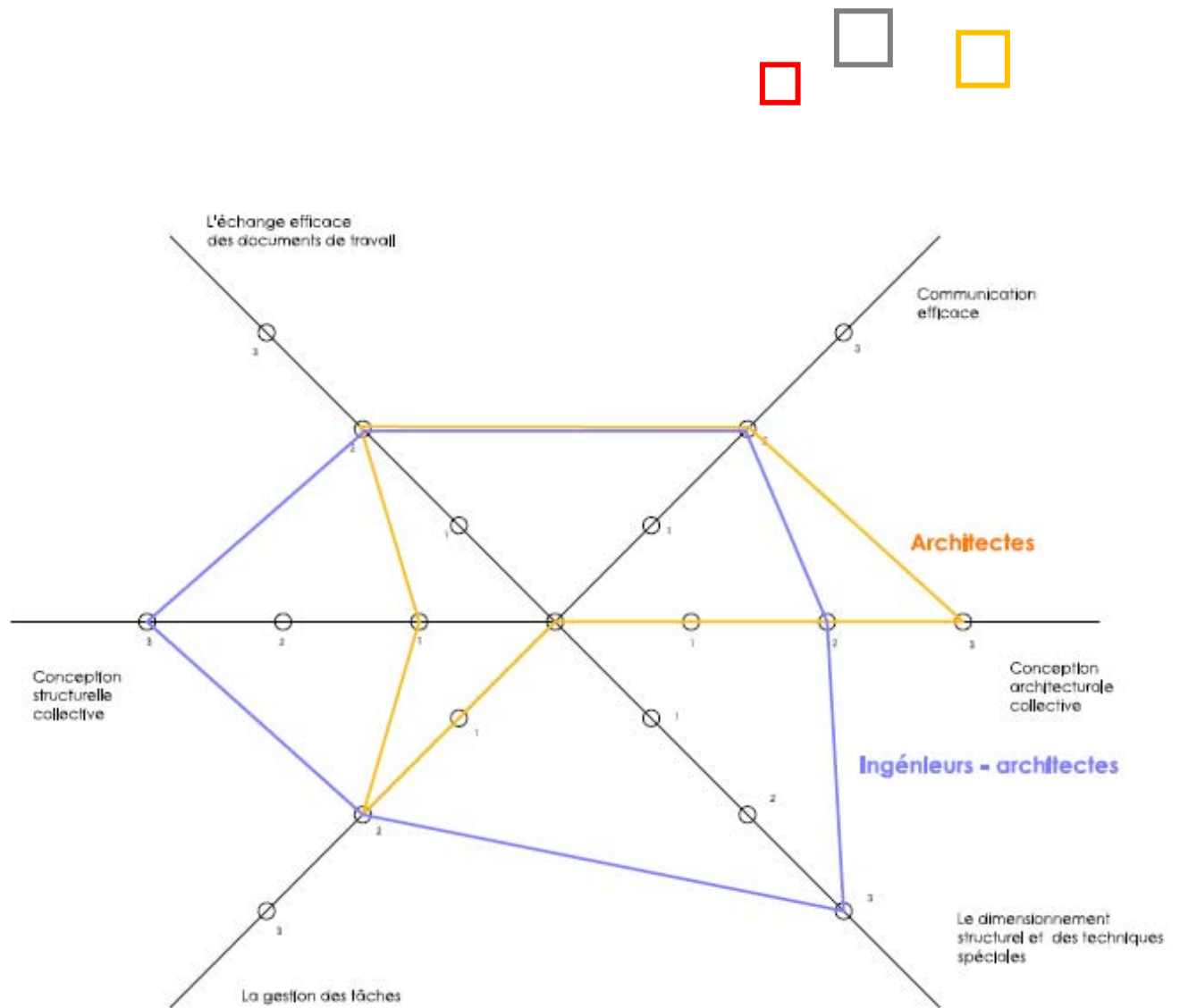


Figure 11 : Schéma visualisant les contributions relatives des architectes et des ingénieurs architectes dans les différentes tâches principales effectuées pour le développement collaboratif du projet.



A travers le deuxième exemple, nous pouvons également en tirer une série de tâches de travail collaboratif qui ont aidées non seulement à l'élaboration du projet mais à son exécution, nous avons eu l'occasion de concrétiser nos réflexions et le travail de conception.

En résumé, voici les critères d'aboutissement principaux du projet:

- **La recherche collective des idées.**
- **La recherche d'une forme** plus ou moins correspondante aux différentes idées, par des esquisses.
- **Le travail sur maquette** en carton et le choix commun de la forme directrice.
- **La définition de l'objet** de façon plus précise par la modélisation en maquette numérique 3D.
- **La conception structurelle**, définissant les éléments à utiliser.
- **Le dimensionnement** et la vérification de la résistance.
- **La planification des tâches de construction** en prenant compte de l'acheminement des éléments de construction sur le site.
- **Le travail d'exécution**, y compris la préparation des éléments à monter et les outils de travail.



Enfin, la schématisation de cette deuxième expérience, avec la contribution d'une part des ingénieurs de construction et de l'autre des ingénieurs-architectes et architectes.

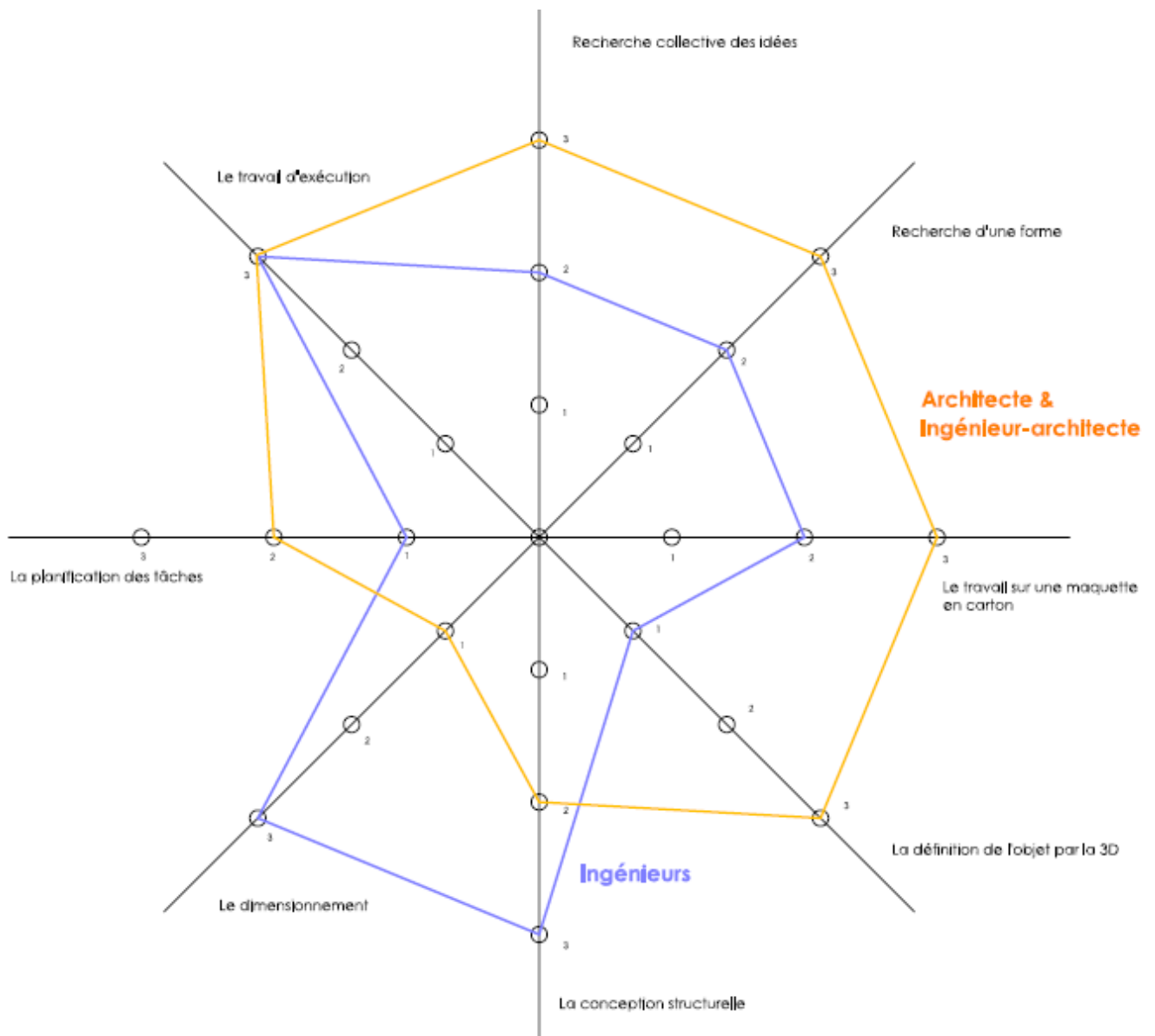


Figure 12 : Schéma visualisant les contributions relatives des ingénieurs et des ingénieurs architectes dans les différentes étapes effectuées pour la conception et l'exécution du projet.



LA CONSTRUCTIBILITE



3. La constructibilité

Nous avons vu l'exemple du Centre Georges Pompidou et les deux expérimentations, dans lesquels la notion de collaboration aide pour obtenir une vision constructive depuis la conception du projet. Cependant, cette notion de constructibilité existe déjà sous différents aspects. Qu'est-ce-que la constructibilité ou plus exactement « constructability » en anglais ?

D'après l'Encyclopédie pratique du droit et des contrats, « la constructibilité est définie comme une étude visant à définir, dès le lancement du projet, la meilleure stratégie de construction de l'ouvrage. Elle prend en compte le plus de données et de paramètres possibles d'une construction et les expériences nécessaires pour atteindre les objectifs du projet afin d'optimiser les moyens, les coûts et les délais ».

L'idée directrice de l'étude de la constructibilité est l'anticipation des difficultés résultant de l'exécution d'un projet de construction et l'identification des obstacles avant que le projet soit effectivement construit, de manière à prévenir les erreurs techniques, les retards et les dépassements de coûts.

En d'autres termes, « c'est une technique de gestion de projet pour examiner les processus de construction du début à la fin lors de la phase de pré-construction. » (Wikipédia)



3.1. Contexte & approches

La notion de « constructibilité » est apparue mondialement dans la moitié des années septante, dans « Building and Technology Bulletin » et « Constructability – It works » (Proctor and Gamble, 1976 et 1977). Dix ans après, une étude de NSF- ASCE (National Science Foundation – American Society of Civil Engineers) a identifié la constructibilité comme un besoin spécifique en génie civil pour les études structurelles. Cette étude a montré qu'il y a un lien manquant entre la conception structurelle et les entrepreneurs. (Edward & P.E., 1994)

Le « Guide de la constructibilité » donne cet exemple : des colonnes en béton qui sont dimensionnées pour satisfaire aux normes, mais le but étant d'avoir une faible épaisseur pour ne pas occuper trop de place dans un espace. Au moment de la fabrication des colonnes sur chantier, le design avec les armatures ne laisse pas beaucoup de place pour placer le béton et ça peut créer des problèmes pour une bonne vibration du béton dans le coffrage.

A plusieurs reprises, la notion de constructibilité des plans de construction et la possibilité de résolution des problèmes de chantier depuis la phase de conception ont fait l'objet de discussions nombreuses.

Il semble, en effet, « une nécessité récurrente dans les projets où il y a une étude de la constructibilité, que les experts de construction (entrepreneurs ou autres) soient inclus dans le projet depuis les premières phases de conception du projet, pour assurer une influence sur les concepteurs et les planificateurs. » (Edward & P.E., 1994)



En effet, une intervention préliminaire des acteurs de la construction procure un « feed-back » pour les concepteurs et peut aider à un examen des erreurs risquant de se produire dans la suite.

Mais cette intervention ne se produit que rarement car ces acteurs sont souvent exclus de la partie conception et n'interviennent que pour examiner ce qui est déjà établi complètement ou partiellement par le concepteur.

« Les commentaires sont alors limités à des détails car des énormes changements à ce stade du projet ne sont pas faisables et ceci est dû à plusieurs raisons :

- Un budget significatif a déjà été dépensé sur la conception et des changements majeurs peuvent causer des retards et augmenter les dépenses.
- Le concepteur est souvent défenseur de sa conception et il s'est engagé publiquement avec ses choix de conception et un changement peut affecter sa crédibilité. » (Edward & P.E., 1994)

Dans divers lectures et articles traitant de ce sujet, le terme «constructibilité» se réfère à plusieurs aspects qui sont résumés dans les points suivants:

- La conception du bâtiment qui facilite la construction, comme nous l'avons vu dans les exemples précédents. (définition CIRIA)
- Un système de planification en matière de succession des tâches de construction. (définition CII)
- La gestion des opérations sur le site, comprenant l'accessibilité au site, l'approvisionnement et l'acheminement des matériaux, le stockage, leurs manipulations et leurs positionnements au sein de la construction. (définition CII)



- La prise de considération des contraintes environnementales et de tout facteur externe. (définition CIIA)
- Les détails de mise en œuvre pour s'assurer du bon achèvement de la construction. (DAVID Bassir)

Encore une fois le « Guide de la constructibilité » (Edward & P.E., 1994), précise qu'un projet qui prend en compte la constructibilité présente les quatre caractéristiques suivantes :

- Les gestionnaires de la conception et de la construction sont tout les deux concernés par la rentabilité du projet. Ils reconnaissent l'influence importante des décisions dans les premières phases du projet sur le coût.
- Ces gestionnaires utilisent la constructibilité comme un outil majeur dans un objectif concernant la qualité, le coût, et le temps prévu pour un projet.
- Les gestionnaires du projet ont des expériences personnelles, car ils ont une compréhension meilleure de la planification et de la construction d'un projet.
- Les concepteurs collaborent et sont réceptifs dans le but d'améliorer la constructibilité. Ils pensent à la constructibilité, ils demandent librement des données sur la construction et les évaluent objectivement.

En résumé, il semble nécessaire d'encourager une participation efficace des ingénieurs et des entrepreneurs durant la phase de pré-construction, visant une conception collaborative. Si une attention particulière est donnée par les différents acteurs de l'équipe d'un projet à la conception, certains problèmes dans la construction future peuvent être réduits.



3.2. Objectifs & barrières

Dans quels buts, parlons-nous de constructibilité ?

La constructibilité est destinée principalement à examiner les projets lors de la conception pour vérifier les questions relatives à sa construction.

Voici quelques objectifs de la constructibilité fournis par le « Guide de la constructibilité » (Edward & P.E., 1994) :

- Initier une planification précoce dans le projet.
- Minimiser les changements inattendus dans le projet.
- Diminuer l'ordre des changements relatifs dans la conception.
- Améliorer la productivité des entrepreneurs.
- Développer une ambiance de spécifications sur la construction.
- Optimisation de la qualité de la construction.
- Diminuer les retards et respecter les échéances
- Promouvoir la sécurité de la construction.
- Diminuer les conflits et les disputes.
- Diminuer les coûts de construction et de maintenance.

D'autres articles scientifiques citent de nombreux autres objectifs de la constructibilité, d'après « **Pre-construction Review** » :

« L'expérience réelle et l'expertise de la communauté de la construction doivent être consultées au cours de la phase de conception afin de produire des projets plus constructibles ». Ils définissent des objectifs supplémentaires d'un processus amélioré de constructibilité, comme les suivants :

- Améliorer la sécurité du public et de la construction.
- Réduire le travail supplémentaire sur chantier.



- Développer la connaissance en matière constructibilité au niveau de la conception.
- Réduire les violations du permis d'environnement ou la non-conformité.
- Minimiser l'intrusion du public.
- Augmenter la compatibilité aux prescriptions environnementales.

Une analyse de constructibilité peut entraîner de légères augmentations dans les coûts préliminaires mais ces coûts devraient être minimes par rapport au temps et aux économies dues à moins de revendications dans la construction.

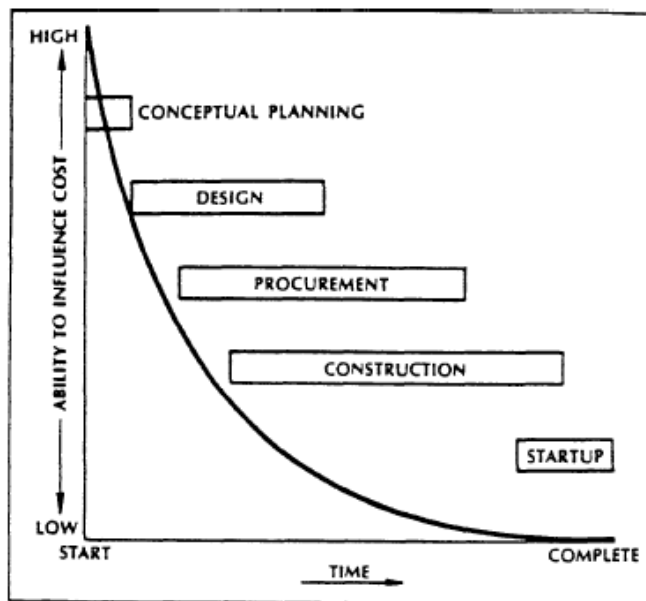


Figure 13 : Graphique « reflétant l'influence des efforts en matière de constructibilité sur le coût, dans les différentes phases du projet. » (Edward & P.E., 1994)

Cependant, l'étude de la constructibilité n'est pas toujours évidente. Quelles sont les barrières qui empêchent d'introduire un programme de constructibilité dans l'organisation d'un projet?

Nous proposons une synthèse des problèmes les plus fréquents :



- Certains concepteurs considèrent les efforts apportés par d'autres acteurs comme une intrusion dans leur conception et un compromis est difficile entre les acteurs.
- Il existe une divergence remarquable dans les points de vue et dans la méthode de travail des acteurs, chacun ayant ses outils de travail, ses méthodes, ses modèles et son savoir-faire.
- Inciter les personnes, avec différentes formations, différents bagages culturels et différents buts, à travailler ensemble de façon efficace, ce qui n'est pas facile.
- Le manque d'expérience et de connaissance en matière de construction du côté du personnel responsable de la conception architecturale ou structurelle.
- La relation tendue entre les architectes et les ingénieurs d'une part et la relation contractuelle souvent tendue avec l'entrepreneur.
- Une incompréhension des objectifs initiaux du projet par tous les acteurs qui ne se sentent pas investis dans le projet et qui défendent leur propre stratégie pas toujours alignée avec celle du projet de construction.
- Des supports d'informations compliqués, très diversifiés et des échanges peu efficaces.

Pour éviter ces barrières, comment le « Guide de constructibilité » prévoit-il le travail au sein d'une équipe collaborative à visée constructive ?

Chaque projet peut être associé à une équipe de travail. La taille de l'équipe peut varier en fonction de la complexité du travail de construction.

L'équipe de base peut être composée d'un chef de projet, des unités spécialisées, et des spécialistes de construction. Les unités sont



spécialisées dans plusieurs domaines comme la structure, les routes, les matériaux, l'environnement, la géotechnique, le trafic, etc. Les spécialistes de construction eux sont là pour divers autres domaines de la construction (techniques spéciales, électricité, ventilation, éclairage, chauffage, peinture, etc.)

L'équipe doit se rencontrer et discuter de la constructibilité du projet, à travers un planning établi des interventions claires aux différentes étapes de la construction.

Durant le développement du projet, il faut repérer des points critiques de constructibilité, des points qui sont souvent spécifiques à chaque projet. Le rôle de l'équipe et surtout celui du chef de projet, c'est de s'assurer que chacun des problèmes éventuels trouvés a suscité l'attention nécessaire et a pu être résolu ou anticipé.

Les études montrent aussi que la majorité des changements dans la conception s'effectuent à travers la modification des plans avec des problèmes spécifiques associés aux plans. Un effort important par les membres du projet peut être effectué pour comprendre les problèmes possibles et donner une approche plus réfléchie au niveau de la conception.

De cette façon, nous pouvons agir sur la série des plans de conception et des détails spécifiques relatifs à chaque projet.

Les choix ou les changements sont transcrits dans la documentation technique suivant la phase à laquelle ils interviennent : esquisse, plans, cahier des charges, plans d'exécution, etc. La cohérence de ces documents, et leur bonne diffusion sont donc un point critique dans la gestion de la collaboration. (Turk, 1994)



Les représentants de la construction en intervenant depuis la première phase d'intention peuvent être sensibilisés au projet et ils peuvent mieux comprendre l'approche des concepteurs. Leurs apports seront surtout bénéfiques durant la phase de construction où les changements à cette phase pourront se limiter à des changements mineurs sur chantier, souhaités par l'entrepreneur ou le concepteur en phase finale d'exécution.



3.3. La constructibilité dans le processus de conception | construction

Une fois les objectifs de la constructibilité clairement établis, les moyens nécessaires employés pour y arriver et la gestion d'une équipe collaborative, nous pouvons nous interroger plus exactement sur la phase de conception et le travail effectué dans le but de réduire l'écart entre la conception et la construction.

Dans le schéma général de l'évolution d'un projet, nous retrouvons la conception qui précède la phase de concrétisation du projet : sa construction.

Un article intitulé « *Design/Construction Integration through Virtual Construction for Improved Constructability* » rédigé par Walid Thabet (Thabet, 2009) traite en effet ce sujet et propose un schéma représentant les phases de construction d'un projet :

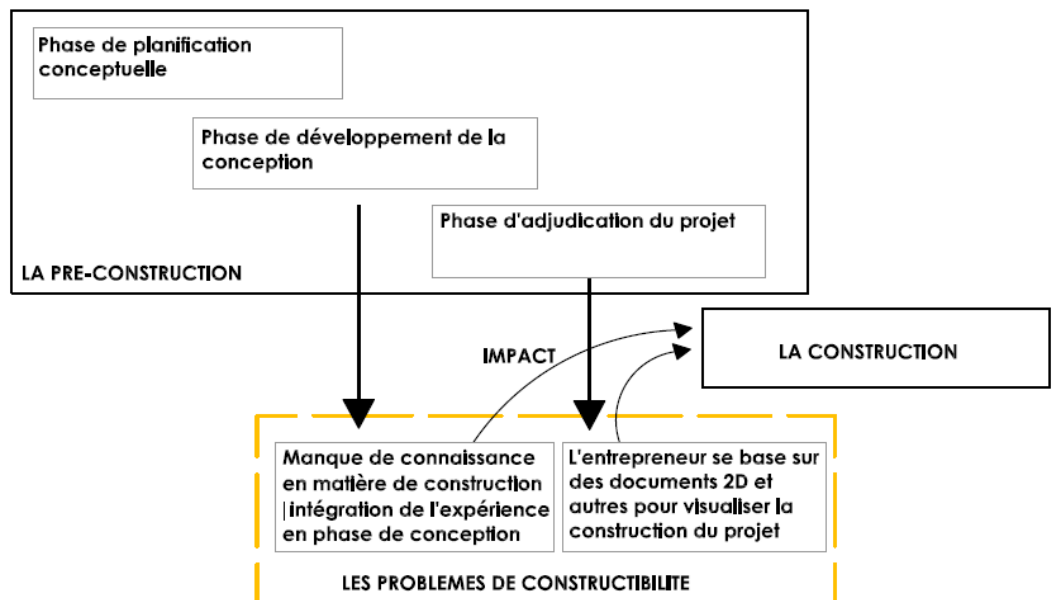


Figure 14 : Les phases de construction d'un projet, traduit de (Thabet, 2009).



Le schéma montre deux phases essentielles : la pré-construction et la construction. Pendant la pré-construction, une étude de constructibilité basée sur des critères et une série de questions est proposée. La réponse à ces questions de constructibilité et les solutions trouvées ont un impact important sur la phase de construction.

La phase de pré-construction correspond à la conception globale, comme vue précédemment dans le travail, qui comprenait la naissance de l'idée du projet, le développement ou la mise en espace, et la visée constructive.

En d'autres termes, les auteurs de cet article définissent aussi cette phase de « pré-construction | conception » à leurs façons. Ils précisent qu'elle se compose de trois phases : la phase de planification conceptuelle, la phase de développement de la conception et la phase d'acquisition du projet et ils décrivent de la façon suivante :

- *Phase de planification conceptuelle :*

Elle commence par la sélection du projet, du site, et l'élaboration d'une estimation de l'ensemble, plan et programme.

- *Phase de développement de la conception :*

Principalement, le travail se fait sur les dessins schématiques où l'équipe de conception examine quelques solutions de conception, mais aussi ils élaborent une recherche de matériaux et des systèmes structurels.

La conception détaillée débute lorsque l'équipe de conception évalue, sélectionne et met au point les principaux éléments du projet.

Ainsi commence la préparation de documents techniques, cahier des charges et le début du développement du calendrier et du budget du projet.



□ *Phase d'adjudication du projet :*

Transition de la préparation des projets en préparation de la construction. Cette phase comprend les appels d'offres et d'attribution. Le calendrier du projet et le budget sont finalisés dans cette phase.

Enfin, La phase de construction présente la préparation de la construction physique du projet. Cette phase commence avec la mobilisation sur le site, puis la mise en œuvre, et la clôture du projet.

Encore une fois dans cet article, nous retrouvons des éléments à prendre en considération pour la réussite de la construction, ces critères sont plus généraux que ceux tirés de l'exemple du Centre Georges Pompidou (voir partie 2.2.2 page 27) :

- **La connaissance approfondie de toutes les phases du projet** et l'intégration de tous les paramètres de construction au cours de la phase de pré-construction.
- **La visualisation de plusieurs problèmes de construction** ou d'obstacles au cours de la phase de pré-construction.
- **Un processus de planification bien élaboré**, surtout que de nombreux architectes et ingénieurs ont peu d'expérience dans la construction pratique sur terrain et ils ont peu d'information sur les considérations à prendre en compte sur le chantier, sur la disponibilité des ressources différentes et ils ne sont pas nécessairement des experts.

Pendant la phase des appels d'offres, les documents de visualisation du processus de construction, décidant des méthodes de construction



appropriées sont souvent limités aux dessins en 2D. Cette approche limite la capacité de l'entrepreneur d'être plus familier avec le projet, avant le début de la construction proprement dite.

Certains problèmes sont propres à la phase de construction mais font aussi partie de la liste de questions de constructibilité à se poser :

- **Les accès au site**, les accès au stockage, la sécurité du site et du personnel, la qualité de la construction avec un système de contrôles réguliers envisageant la possibilité de mise à jour automatique, pour surveiller l'état d'avancement de la construction et respecter les délais fixés dans le calendrier.



3.4. Synthèse

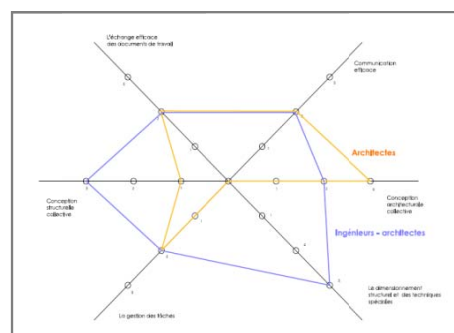
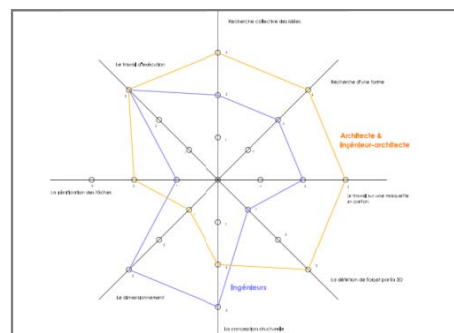
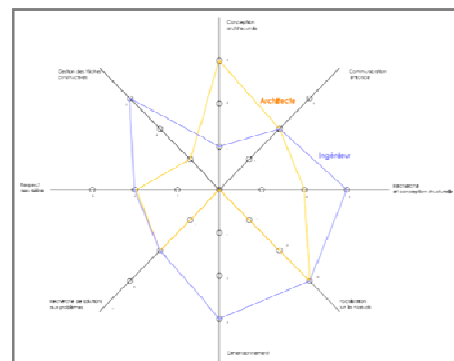
Pour clôturer cette partie, l'élaboration d'une liste de critères de constructibilité bien définie semble essentielle, surtout que les discussions sur ce sujet sont nombreuses.

Cependant, d'après les exemples traités précédemment et les lectures sur la constructibilité, si nous reprenons les 3 schémas radar établis auparavant, nous remarquons que les schémas se différencient avec :

Le rôle et les compétences de chaque acteur : un ingénieur, un architecte, ou un ingénieur architectes joue chacun un rôle différent dans un projet.

La nature du projet qui aussi influencera énormément la démarche de travail adoptée et la nature des relations contractuelles entre les acteurs.

Par suite toute «check-list» que nous essayons d'établir ne comportera qu'une liste de famille de critères. Nous ne pouvons pas établir une «check-list» standard avec des critères bien définis, étant donné que cette liste doit s'adapter à la nature du projet, aux points de vue et à l'organisation des acteurs.





Cette «check-list» servira pour l'étude d'un cas réel de projet dans la suite de ce travail de fin d'étude, plus précisément, pour analyser son étude de constructibilité selon ces familles de critères.

Si nous prenons un projet de l'étape de base qui est la connaissance du site et des exigences, nous pouvons définir la « check-list » composée des familles de critères de constructibilité suivantes:

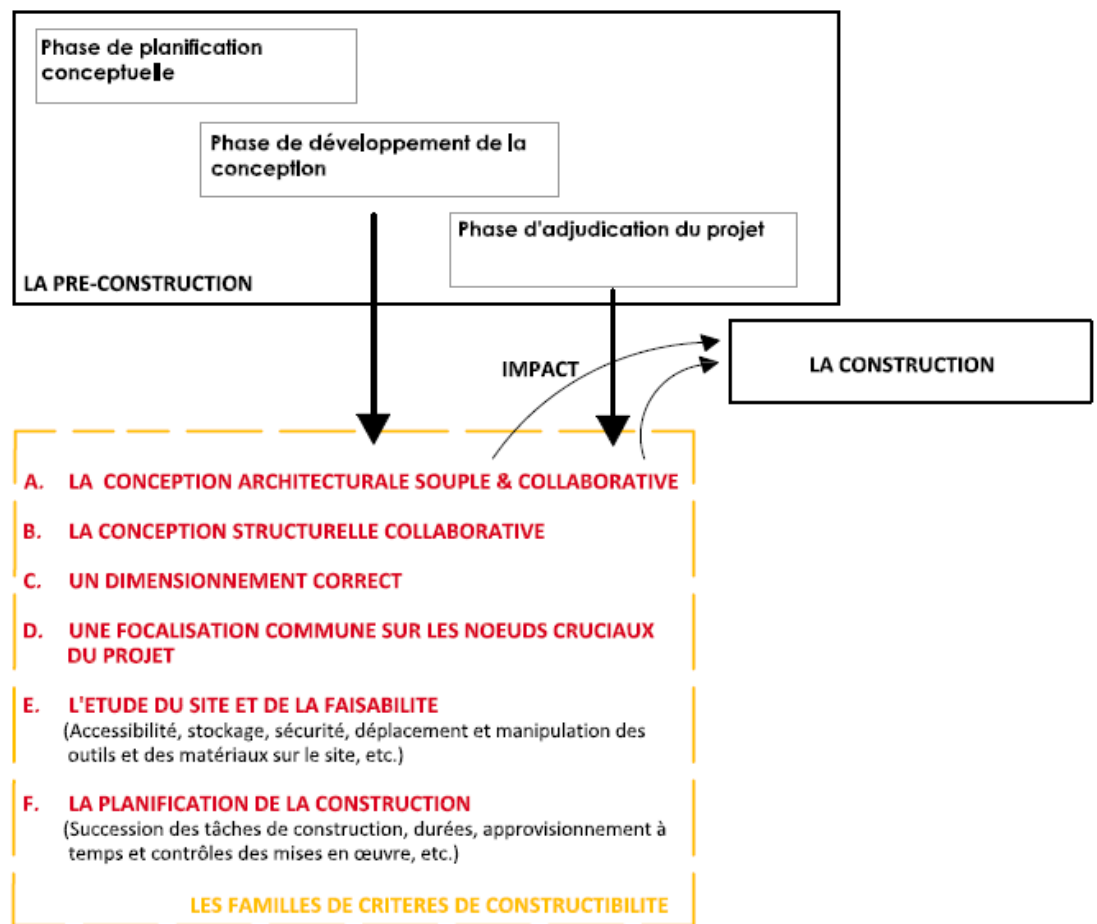


Figure 15 : Les familles de critères de constructibilité, basée sur le schéma de (Thabet, 2009)

Selon ces différentes familles, nous reprenons les points essentiels qui y correspondent dans chaque projet que nous avons décrits précédemment,



afin de montrer que ces familles de critères répondent à une partie essentielle de l'étude de la constructibilité.

Les familles de critères	Centre Georges Pompidou (chapitre 2.2.1)	Studio digital Collaboratif (chapitre 2.3.1)	Défis bois (chapitre 2.3.2)
A. LA CONCEPTION ARCHITECTURALE SOUPLE & COLLABORATIVE	Lignes directrices de l'architecture du projet	Recherche d'idées	Recherche formelle
B. LA CONCEPTION STRUCTURELLE COLLABORATIVE	Recherche d'une structure Personnalisée, et qui répond aux intentions des architectes	Discussion de plusieurs possibilités de structure et le choix commun	Recherche collective d'une structure répondant à la forme voulue
C. UN DIMENSIONNEMENT CORRECT	Etabli	Etabli	Etabli
D. UNE FOCALISATION COMMUNE SUR LES NOEUDS CRUCIAUX DU PROJET	Principalement la conception de la gerberette et son fonctionnement au sein de la structure bien définie	Etude de l'architecture et de la structure en détail	Assemblages, encrage au sol, et les détails d'exécution.
E. L'ETUDE DU SITE ET DE LA FAISABILITE	Eléments préfabriqués et monter directement par des grues	Implantation et abords	L'encombrement des éléments
F. LA PLANIFICATION DE LA CONSTRUCTION	Ordre de montage de la structure	Aucune	Ordre de montage de la structure

Figure 16: Résumé des éléments validant les familles de critères de constructibilité, dans le projet du Centre Georges Pompidou et dans les deux expérimentations.



ETUDE DE CAS



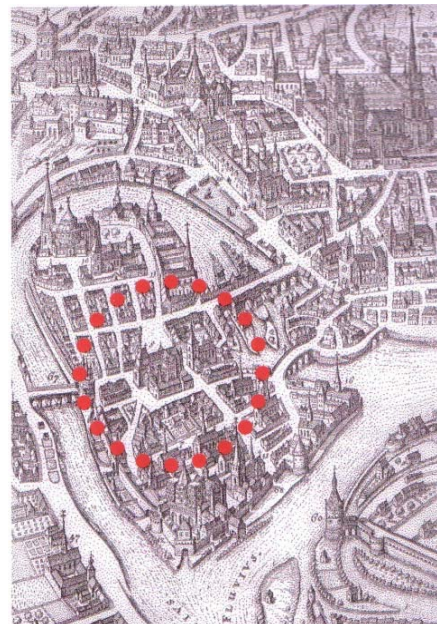
4. Etude de cas :

PROJET - Liège | Cathédrale Saint-Paul

4.1. Introduction

Le projet de notre cas d'étude s'intitule : « Restauration des combles des galeries Ouest et Sud du cloître » (Janssen, 2009).

Grâce à la subside de la Région Wallonne (Commissariat général au Tourisme et Division du Patrimoine de la DGATLP), du Fonds d'aide européen (FEDER) et de la Province de Liège, un projet se développe dans les combles des galeries Ouest et Sud du cloître de la Cathédrale Saint-Paul. Le projet consistait en une extension des salles d'exposition du trésor de la Cathédrale de Liège.



et

Figure 17 : Cathédrale Saint-Paul Liège (Janssen, 2009)

Les bâtiments du cloître de la Cathédrale sont classés Patrimoine exceptionnel par AR du 24/07/1936. Ils datent principalement du XVe et XVIe siècle et ils ont été restaurés au XIXe siècle et au début du XXe siècle.



Le chantier dans les combles des ailes Ouest et Sud du cloître a entamé en début année 2008 et la première phase des travaux s'est achevée en mars 2009.

« Cette intervention a permis de rénover les espaces et d'assurer la stabilité du bâtiment, gravement compromise. » (Janssen, 2009).

Une deuxième phase de travaux de restauration et un raccord futur avec l'aile Sud sont prévus pour l'aile Est du cloître.

L'aile qui nous intéresse pour cette étude est l'aile Ouest, elle se trouve en bordure de la place Saint-Paul.

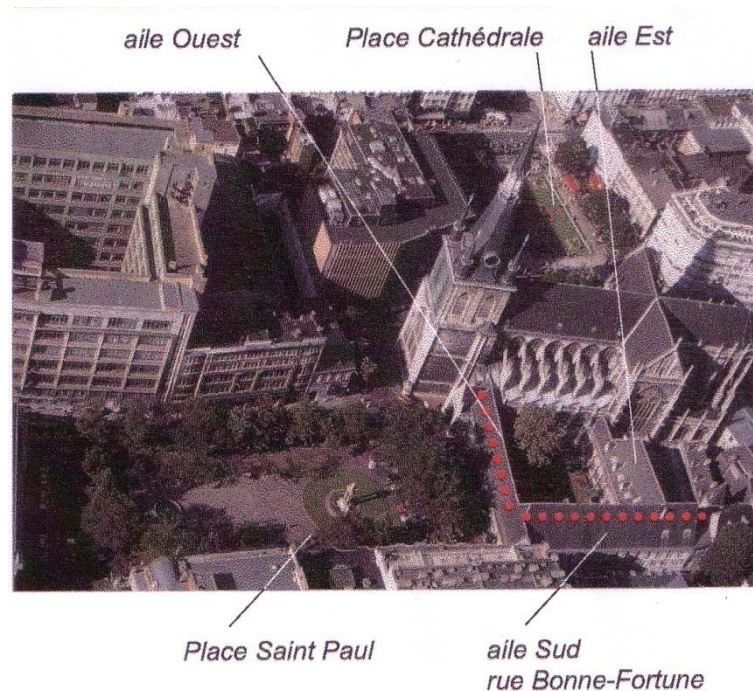


Figure 18 : Localisation de l'aile Ouest (Janssen, 2009)

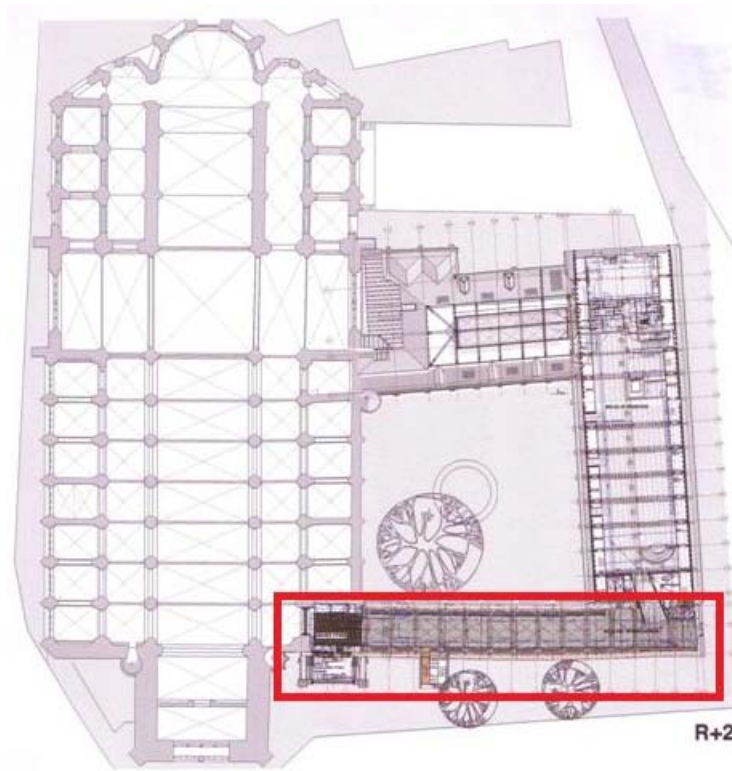


Figure 19 : Plan correspondant aux ailes du cloître, en rouge l'aile Ouest (Janssen, 2009)

Le défi technique à relever dans ce projet est la base de toute la démarche de conception effectuée. En effet, nous sommes dans un cas spécial d'un bâtiment classé et où le but principal du projet est de contrarier le dévers impressionnant de la galerie, Place Saint Paul.

« Il suffit de se promener sous les cintres majestueux de la galerie ouest du cloître, (ouverte à tous les promeneurs), pour constater l'important déséquilibre de l'édifice. Depuis longtemps observé, ce dévers notoire (44 mètres de long, 30 cm maximum de hors-plomb sur 8.50 mètres de hauteur) a déjà suscité au fil du temps des projets de remédiation, soigneusement conservés dans les archives, mais jamais exécutés. » (Janssen, 2009).



- Deux entreprises chargées de la construction.

« Il a fallu la ténacité d'une équipe solide d'ingénieurs et d'architectes pour proposer une solution de stabilisation qui sera enfin réalisée. » (Janssen, 2009).

3.1. Etude selon les critères de constructibilité

L'étude analysera le projet et son déroulement en se basant sur les critères de constructibilité établis précédemment. Pour chaque critère nous essayons d'estimer à quel point ce critère était dominant dans l'élaboration du projet.

A. La conception architecturale souple & collaborative

« Avant d'entreprendre quoique ce soit, il a fallu retirer du fond des larges combes offertes par l'extrados des voûtes 25 tonnes de poussière, de débris, de charbon...

Un minutieux relevé des lieux et une soigneuse observation de l'état sanitaire du bâtiment ont permis d'établir les plans et les descriptifs qui ont conduit à la restauration des combles. » (Janssen, 2009)

La première étape réalisée par l'équipe d'architecture est le relevé de l'état du bâtiment, comprenant l'étude de la charpente existante, fragilisée par des dégâts.

Cette étape est importante car dans le cas de ce projet il faut concevoir en fonction de l'existant et surtout respecter le lieu qui est un bâtiment classé Patrimoine exceptionnel.



Toute intervention architecturale dans cet édifice faisait partie du domaine de sa restauration. En effet, les architectes ont été convoqués pour la restauration des combles dans le but de la création d'une salle d'exposition.

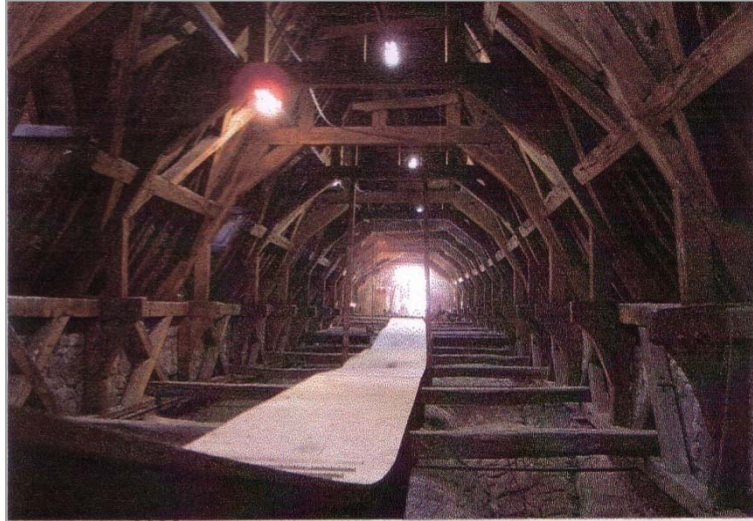


Figure 21 : Etat des combles après nettoyage et avant toute restauration (Janssen, 2009)

La conception architecturale est au départ définie par ses grandes lignes avec « une charpente de qualité spatiale exceptionnelle et une recherche de liaison en lumière. » (Janssen, 2009) , le but était de garder cette qualité spatiale de la charpente, de concevoir un éclairage naturel et artificiel adéquat, pour créer une liaison lumineuse très présente avec la charpente et de créer une dalle qui permettra de parcourir cet espace.

Cette réflexion de départ des architectes n'avait rien de structurel, la conception architecturale est bien fixée dans ses grandes lignes avant toute réflexion structurelle. Nous pouvons estimer que cette conception architecturale était bien souple mais pas du tout collaborative en première phase, car les idées découlaient que des architectes et de leur volonté en terme de spatialité recherchée.



Cependant, les architectes dans leur aménagement du volume étaient vite affrontés aux contraintes patrimoniales, aux exigences incendie et aux défis techniques.

Des désordres importants se manifestaient dans le bâtiment: le dévers de la muraille était accompagné d'un mouvement de déformation qui a affecté la charpente ancienne « dont la bizarrerie de conception ouvre le champ à toutes les interrogations : pour quel motif 15 des 17 fermes de charpente ont-elles été privées d'un entrant qui aurait minimisé la déformation dont elles souffrent ? A l'heure actuelle, il n'y a pas d'explication à cette anomalie... » (Janssen, 2009)

La réelle collaboration commence à ce moment là où les architectes devaient définir leur conception en fonction de ces contraintes.

Comment garder l'équilibre face aux charges supplémentaires vu les modifications de la fonction du lieu ?

Tous les désordres du lieu peuvent-ils être réparés par cette restauration, en respectant la spatialité souhaitée ?

Les architectes sont alors confrontés à la nécessité d'une réelle collaboration avec les ingénieurs pour l'étude de la stabilité et surtout la recherche d'une solution structurelle qui répond aux contraintes patrimoniales, techniques et qui soutiendra l'élaboration du parti architectural et la définition des détails d'architecture.



B. La conception structurelle collaborative

Le Bureau d'étude GREISCH reprend l'idée de la dalle et il proposa une solution structurelle qui comprenait les deux éléments principaux suivants :

- Une dalle en béton sous tendue pour la stabilisation de la galerie.
- Un contrefort de la longue muraille bordant la place Saint-Paul.

Ces deux éléments sont nécessaires à la stabilité future de l'édifice, cependant la réflexion est poussée plus loin par les architectes, en matière de créativité spatiale mais tout de même de façon collaborative :

- La dalle s'est transformée en une galerie décollée des murs en maçonnerie, bordée par la lumière qui lui donnera cet aspect léger et flottant.
- Le contrefort de la muraille a servi pour une autre fonction, en effet, il a constitué la nouvelle tourelle en béton armé, sobre et raffinement éclairée, avec un escalier de secours en acier corten qui est un produit symbolique de la sidérurgie locale.

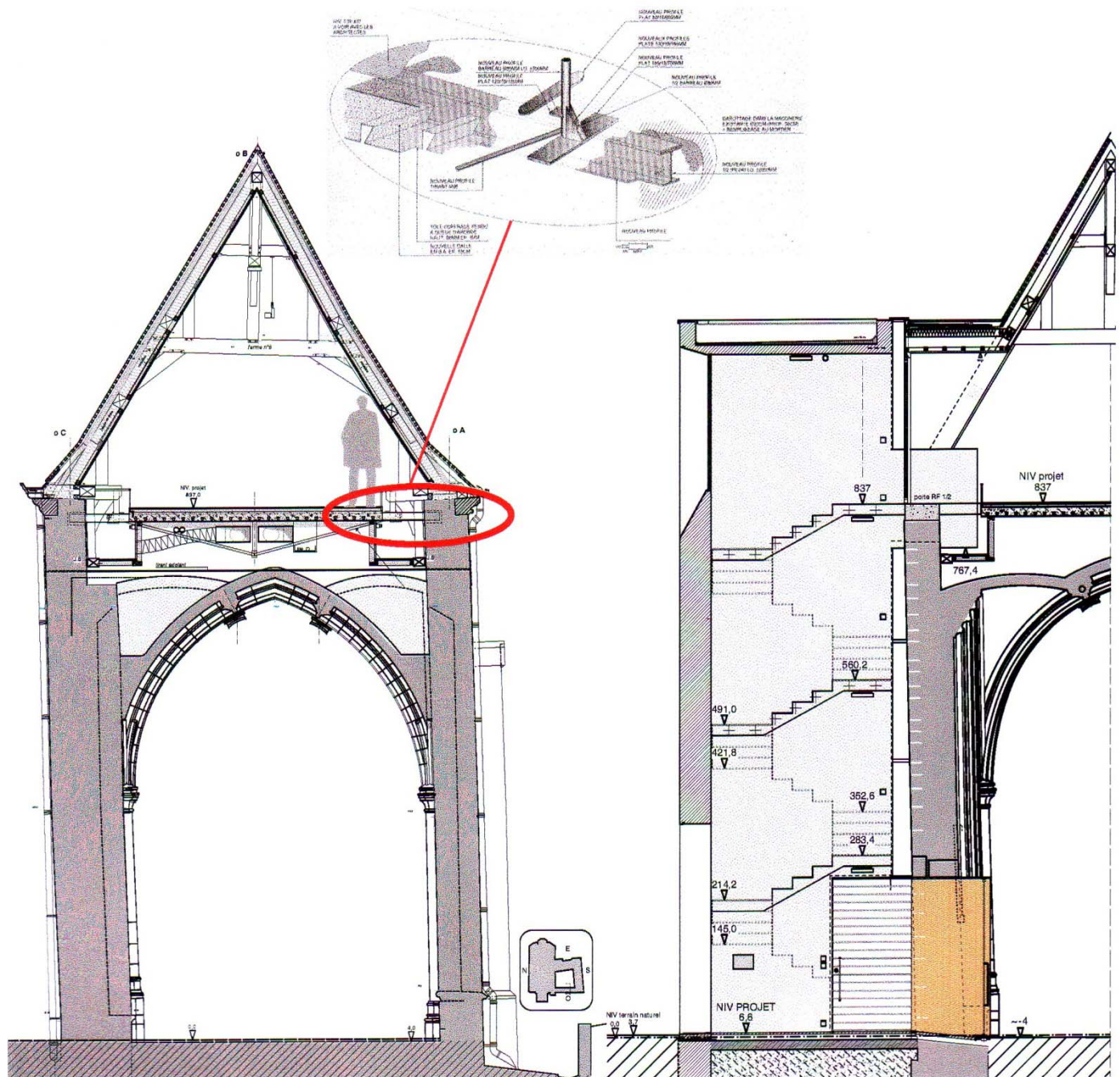


Figure 22: La stabilisation par la dalle en béton sous tendue et la tourelle d'escalier de secours comme contrefort de la muraille. (Janssen, 2009)



Voici une des descriptions donnée à cette solution finale:

« Elle s'écarte des projets précédents de contreforts multiples et met en place deux facteurs qui concourent à la stabilisation : une dalle et un contrefort unique. Solidement ancrée dans les murs, la dalle en béton armé, telle un ponton en lévitation sur l'extrados des voûtes, s'étend sur toute la longueur de l'espace et fait office de poutre-diaphragme de stabilisation.

Elle est reliée par deux boutons à la tourelle d'escalier de secours extérieure en béton armé et forme avec elle un tandem qui office de contrefort. »
(Janssen, 2009)

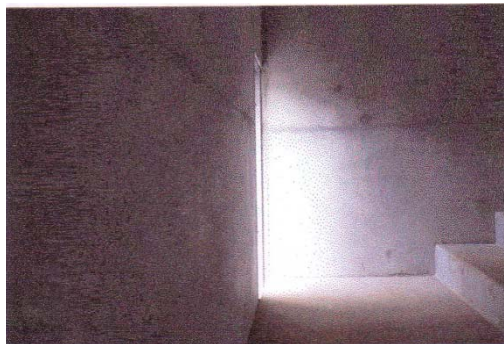


Figure 23 : (Janssen, 2009) L'intérieur de la tourelle d'escalier raffinement éclairé reflétant une recherche structurelle accompagnée d'une créativité spatiale.

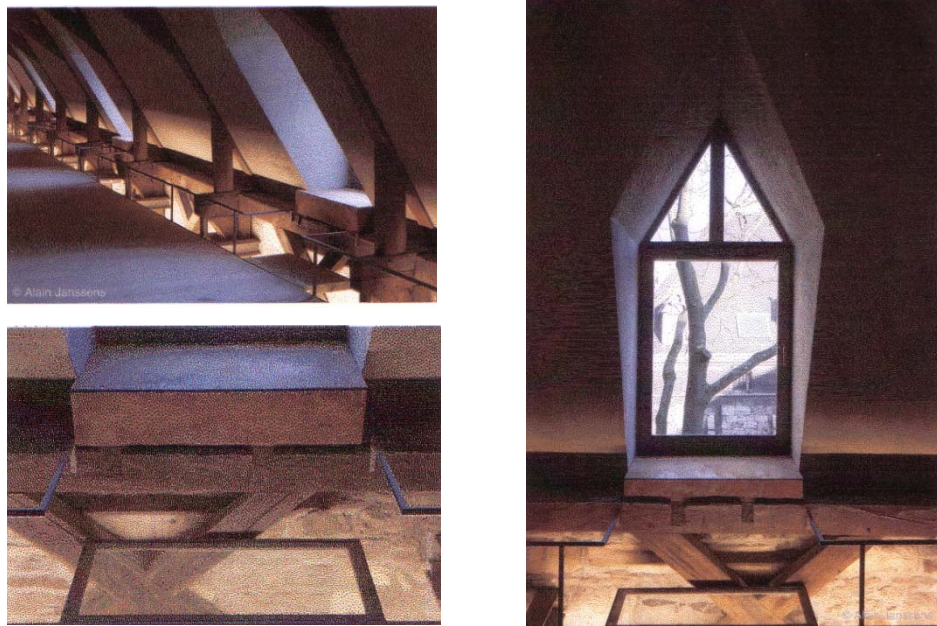


Figure 24: La dalle (Janssen, 2009)

Elle garantit structurellement la stabilité de la galerie et l'épinglage des maçonneries, mais spatialement, elle se détache de la base de la charpente, avec une lumière intégrée aux bords de cette dalle créant un effet de passerelle légère.

En résumé, la nécessité structurelle se combine à une recherche d'ambiance spatiale, reflétant la collaboration nécessaire en phase de conception pour créer un « tout » répondant à toutes les exigences de départ.

Les problèmes techniques étaient réellement prédominants, mais une collaboration a permis de donner vie à ces combles et à nécessiter un souffle d'architecture même si cette architecture était bien conditionnée par les contraintes techniques, patrimoniales et par les normes incendies.



« L'aménagement du volume est un tour de force dans lequel toutes les contraintes patrimoniales et techniques ont trouvé une solution convergente : créativité spatiale, virtuosité de la stabilité et ingéniosité des techniciens en équipements ont permis, dans une collaboration parfaite, de mettre au point une solution synthétique. »

(Janssen, 2009)

C. Un dimensionnement correct

Le dimensionnement des nouveaux éléments structurels intégrés au volume existant, ainsi que les nouveaux équipements techniques de traitement de l'air a été effectué par le Bureau d'étude GREISCH. Le dimensionnement proprement dit reste le domaine propre aux ingénieurs de stabilité. Il est important comme critère de constructibilité, mais à part les ingénieurs qui sont chargés de dimensionner la structure, les autres acteurs n'interviennent pas dans cette étape.

Cependant, il est une étape de calcul essentielle et indispensable, non seulement pour répondre aux exigences des normes en matière de stabilité de l'édifice, mais également en fournissant les dimensions, les épaisseurs, la forme des éléments et leur agencement, il définit le détail réel de la réalisation, donc de toutes les parties visibles de la structure qui influencent la lecture de l'espace architectural.



D. Une focalisation commune sur les nœuds cruciaux du projet

▪ Les nœuds traités du projet :

Dans ce projet, la focalisation sur les nœuds est à l'échelle du détail d'exécution et elle est basée sur l'élaboration d'un nombre important de détails techniques par les ingénieurs, les architectes et l'entrepreneur. Ces documents étaient nécessaires pour la précision des points essentiels à l'aboutissement de la solution structurelle et architecturale choisie. Tous ces détails sont en format traditionnel 2D: plans détaillés, coupes et élévations. Nous reprenons la liste des objectifs à atteindre, en précisant pour chaque objectif, le travail de préparation à l'exécution qui a servi à garantir la constructibilité de la solution choisie :

▪ La restauration de toute la charpente de toiture :

Un relevé est effectué de la charpente existante, travée par travée, il y a des fissures, des déformations, des pièces manquantes, pourries, découpées, déboîtées ou présentant des insectes en surface qui ont été identifiées, ainsi que des découpes pour le passage de certains tirants métalliques existants, la localisation de petits massifs en maçonneries posés parfois en partie sur les pièces de bois de la charpente et des calages en pierre ou en bois ont été découverts.

Ce relevé a permis de prévoir les méthodes de réparation et les endroits d'intervention directe.

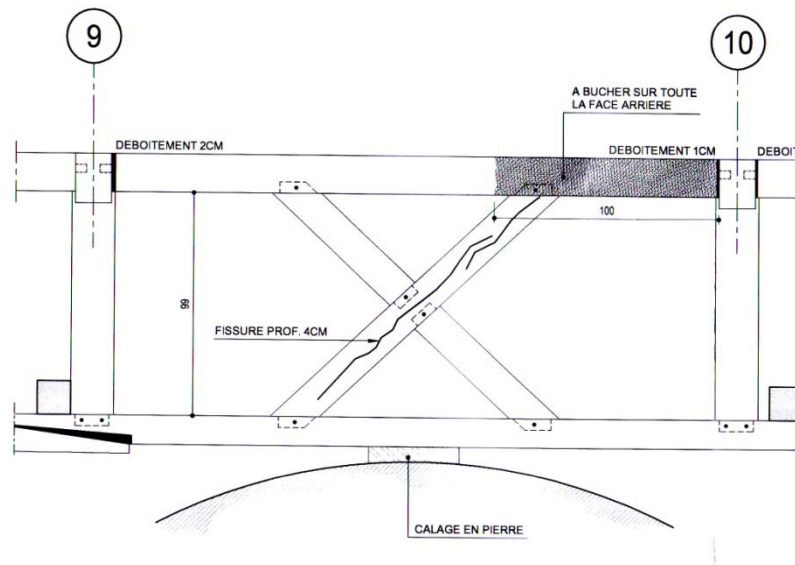


Figure 25 : Un exemple de relevé, pour une travée, du bas de la structure verticale de la charpente. (Plans-d'exécution, 2007)

▪ La stabilisation et la restauration des maçonneries anciennes :

Cet objectif est atteint principalement par l'étude des détails d'exécution du plancher des combles.

D'après les documents techniques que nous trouvons dans les plans d'exécution du projet, les grandes lignes de la structure de la dalle sous tendue se résument ainsi:

- Un carottage dans la maçonnerie existante (remplissage au mortier)
- Des nouveaux profilés métalliques IPE240 qui sont ancrés aux extrémités dans la maçonnerie existante.

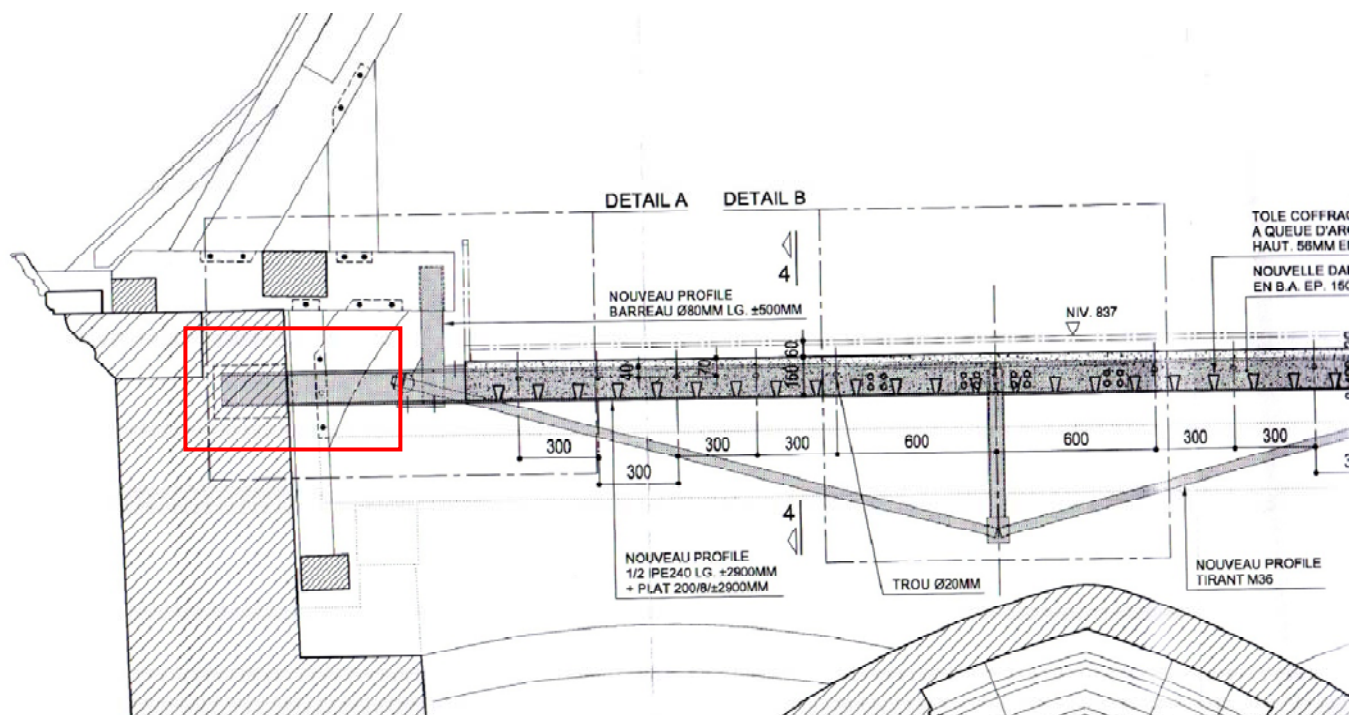


Figure 2 : Nouveaux profilés métalliques ancrés dans la maçonnerie (Plans-d'exécution, 2007)

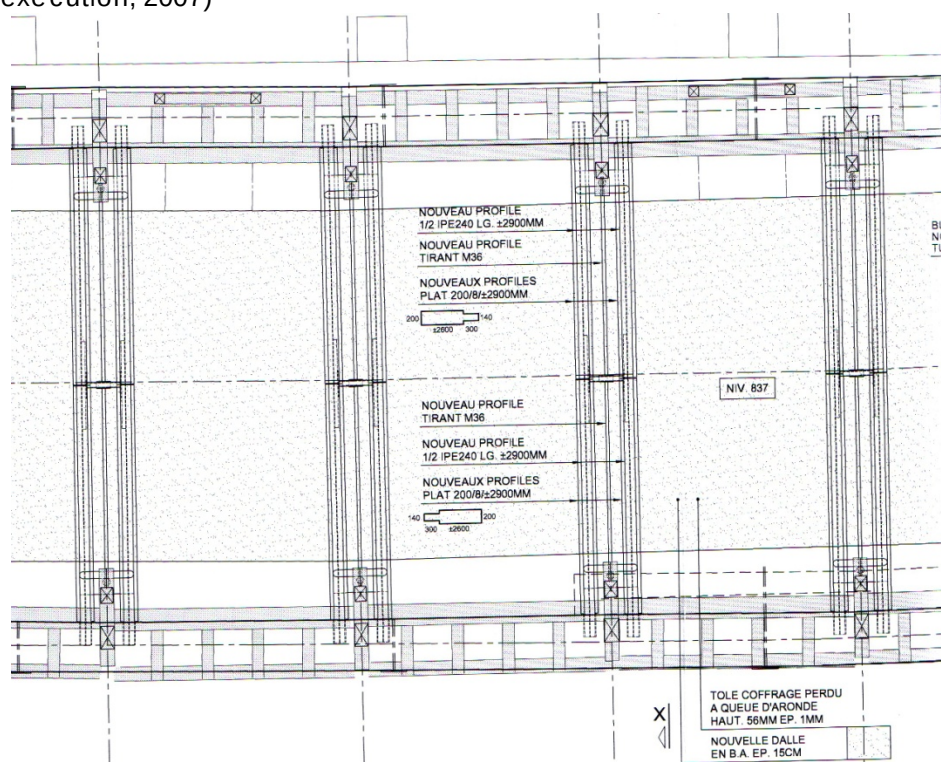


Figure 3 : Vue en plan des travées formées par les nouveaux profilés (Plans-d'exécution, 2007)



- Un deuxième profilé vient soutenir les profilés métalliques IPE (du bas et du haut des profilés) il est formé par deux plats métalliques reliés à un profilé barreau verticale situé à chaque fois entre ces profilés.

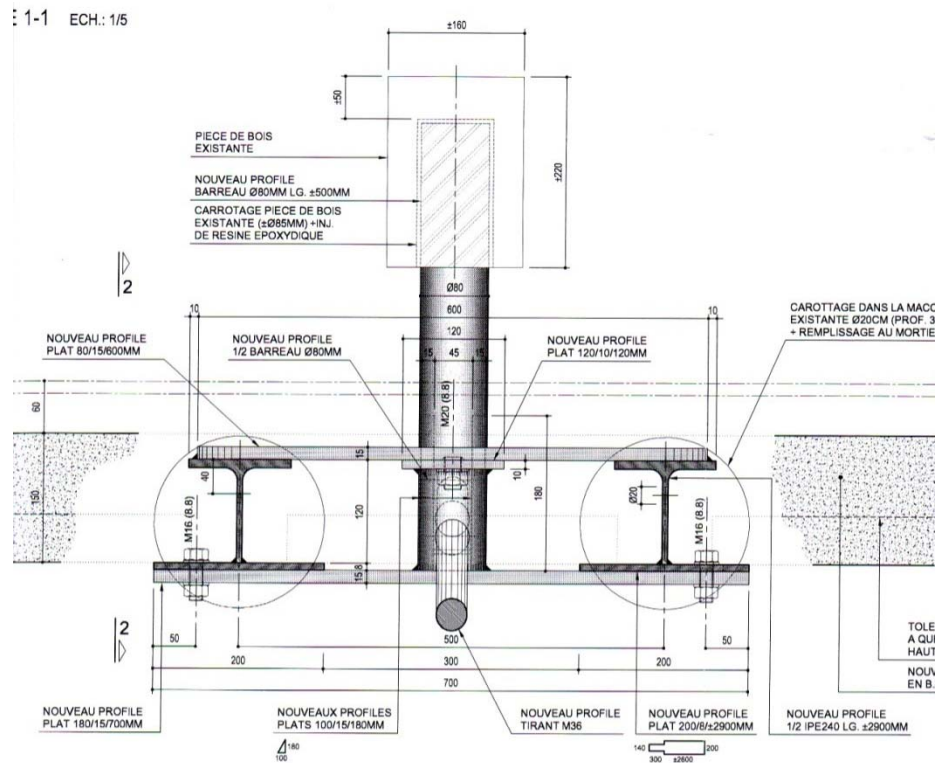


Figure 28 : Le profilé barreau reliant le plancher à la charpente. (Plans-d'exécution, 2007)

- Le profilé barreau rentre dans les pièces de bois existantes de la charpente (pièces résultant des entrails coupés de la charpente) qui eux sont carottées et remplies de résine époxydique.

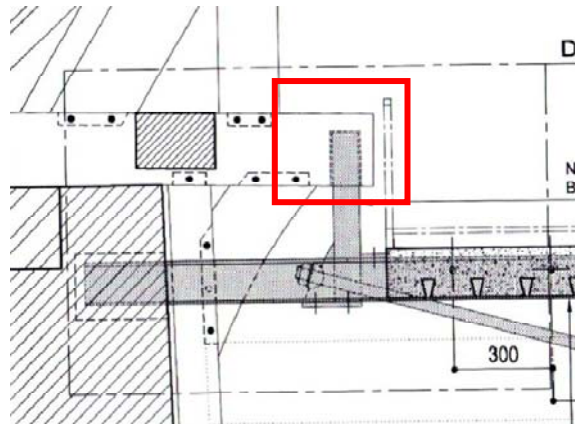


Figure 29 : La liaison du plancher aux entrails coupés
(Plans-d'exécution, 2007)

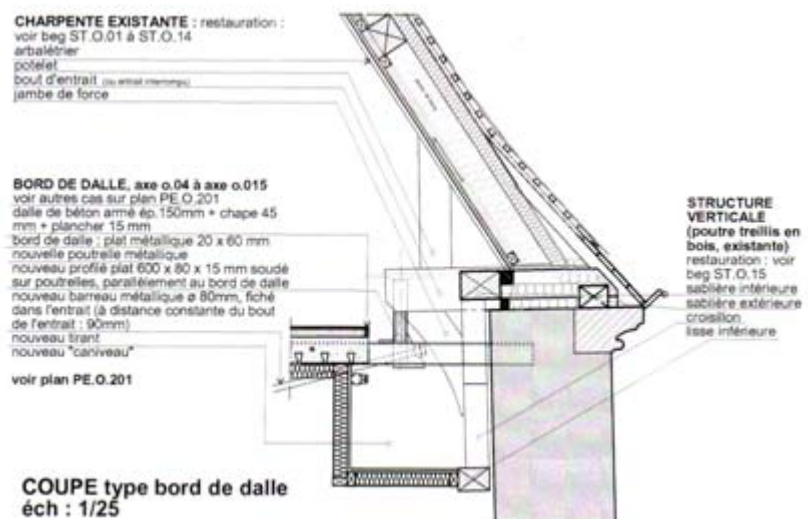


Figure 30 : Détail de liaison entre le nouveau plancher et la charpente existante. (Plans-d'exécution, 2007)

- Des profilés tirants sont fixés aussi aux profilés barreaux aux deux extrémités de la dalle, et au centre ils sont fixés à un nouveau profilé tube qui fait à son tour la liaison avec un système de profilé tube, profilé barreau et profilés plats connectant les poutres IPE entre elles au milieu de la dalle.

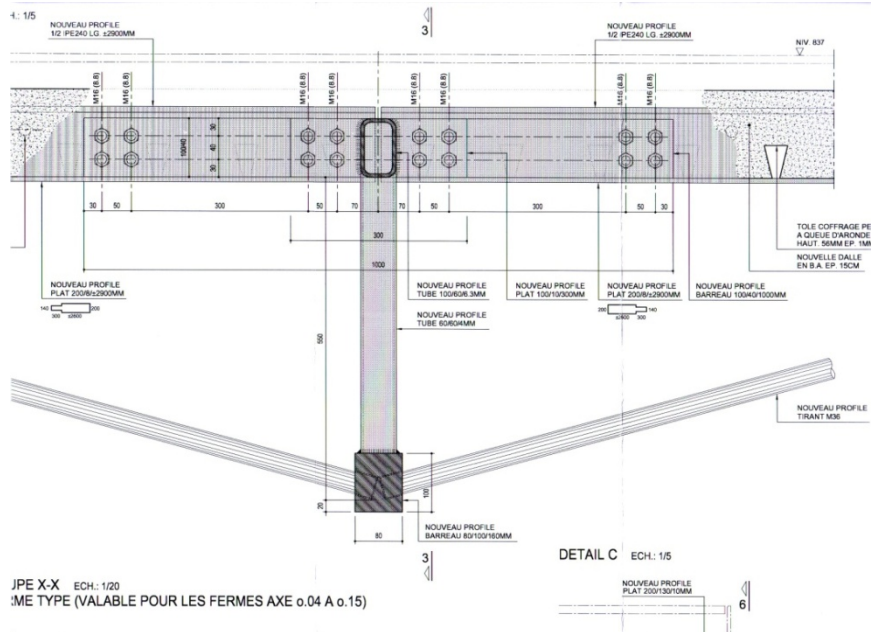


Figure 31 : Les profilés tirants raccordés à un profilé tubulaire
(Plans-d'exécution, 2007)

- Des tôles de coffrage perdu sont placées entre les profilés IPE, en laissant un certain écart par rapport à la maçonnerie et donc il y a des vides entre les IPE le long de la maçonnerie.
- Une dalle en béton armée d'épaisseur 15 cm est coulée sur les tôles de coffrage.

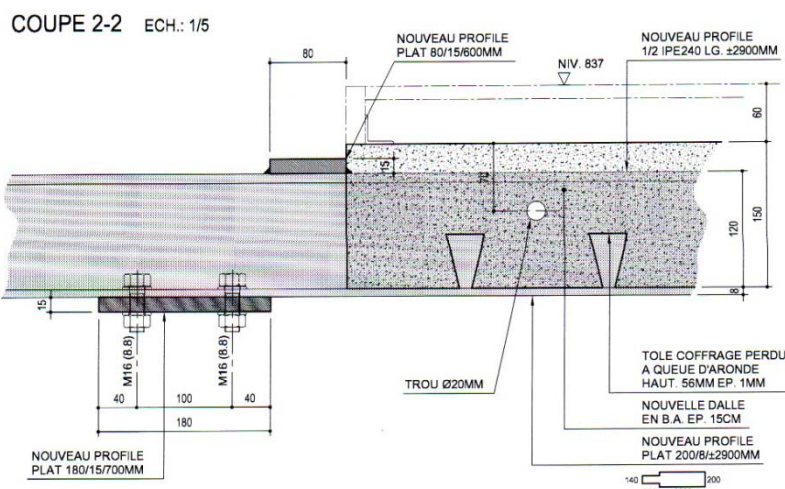


Figure 32 : La dalle coulée sur les tôles de coffrage avec les IPE visibles en partie. (Plans-d'exécution, 2007)



- La finition du plancher est accompagnée de gardes corps et de petits pontons vitrés aux extrémités de la dalle, juste devant les lucarnes.

Le système structural de la dalle est compréhensible d'après les détails techniques d'exécution 2D dont quelques exemples figurent précédemment, mais ce n'est pas toujours évident vu la multitude des documents et les correspondances mentales à faire entre, en essayant d'imaginer l'assemblage réelle entre les éléments.

Cependant, la vue d'emboîtement 3D semble la plus lucide et elle facilite énormément la compréhension du système structural complet du plancher avec une meilleure visualisation des liaisons des éléments entre eux.

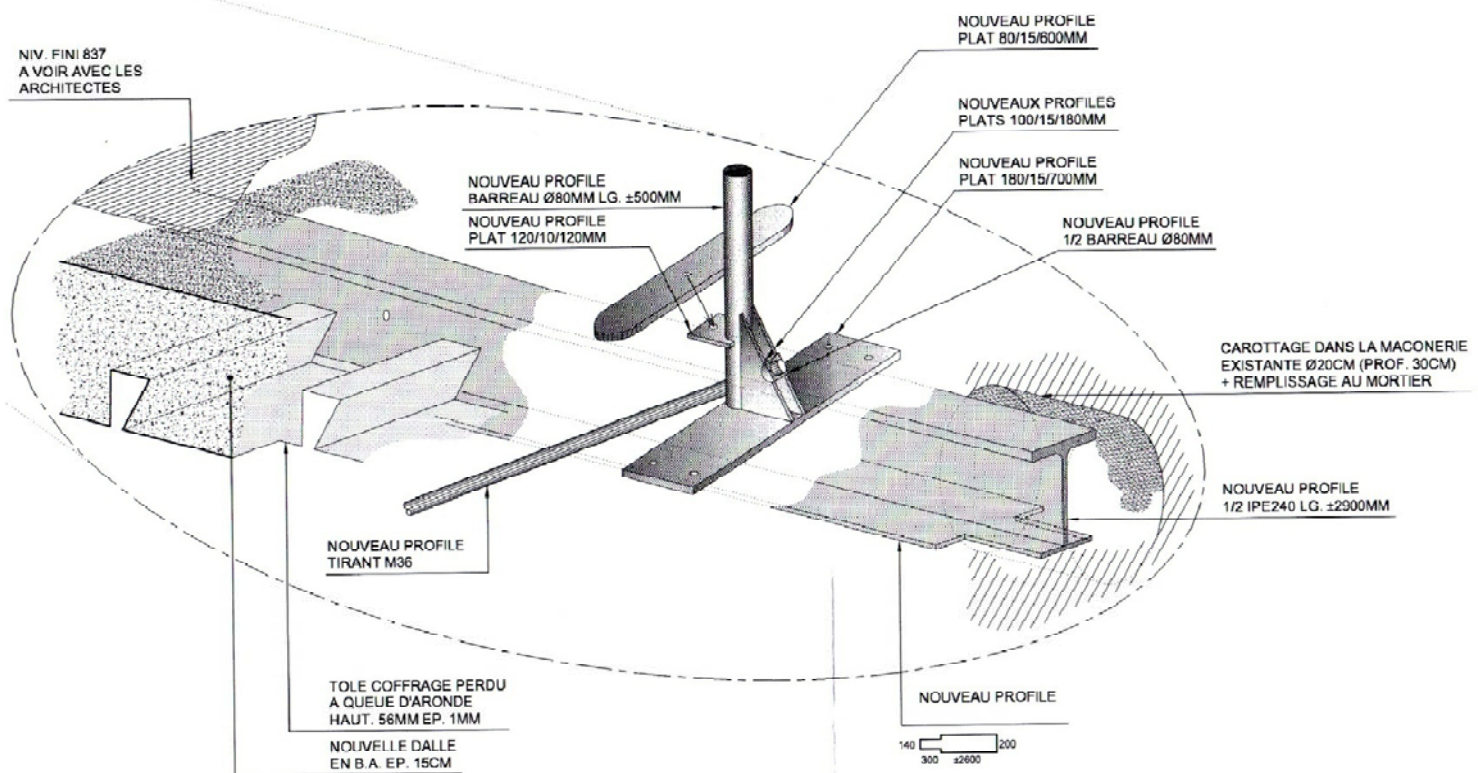


Figure 4 : Système structural du plancher des combles restaurés.
(Plans-d'exécution, 2007)



La tourelle d'escalier en béton armé (coffrage en voliges) qui sert de contrefort pour la muraille a nécessité aussi une attention particulière dans l'étude de cette restauration.



Figure 34 : La tourelle d'escalier en béton armé. (Janssen, 2009)

Des plans d'exécution 2D sont réalisés à cette fin : ils comprennent les plans, les façades, les coupes avec les niveaux et le système d'attache détaillé de l'escalier à la dalle de la galerie.

L'escalier est préfabriqué en acier corten avec une main courante et une dalle coulée au dernier niveau de cet escalier avec un système de profilé tubulaire accompagné d'un profilé plat, encre dans celle-ci vient faire le raccord avec la dalle de la galerie.

Voici quelques documents que nous trouvons relatifs à ce nœud traité du projet :

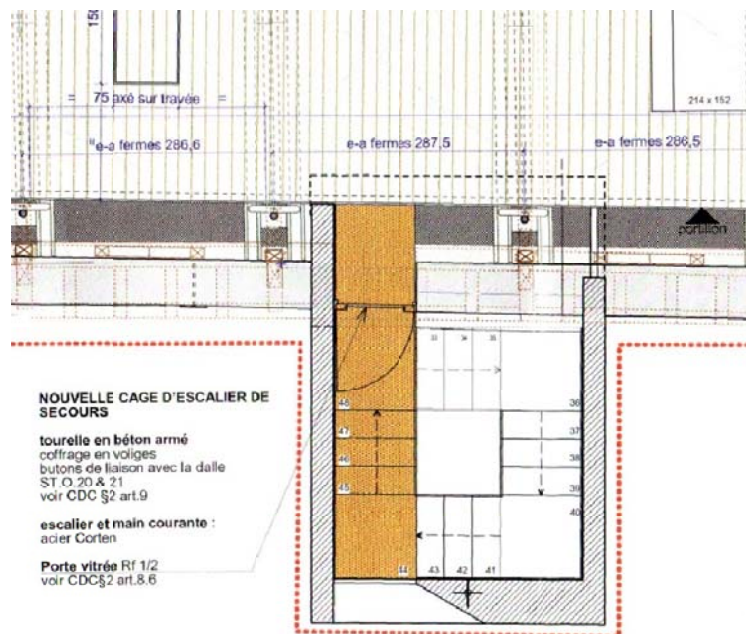


Figure 35 : Vue en plan de la tourelle d'escalier (Plans-d'exécution, 2007)

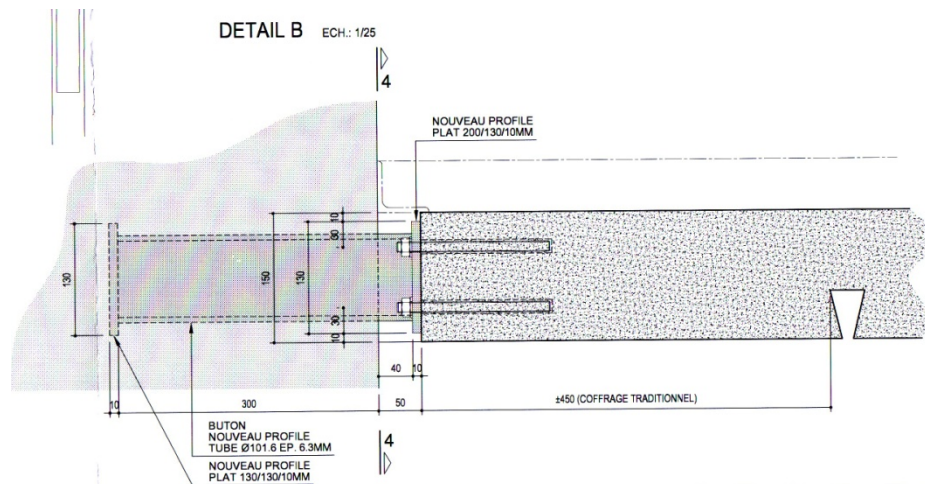


Figure 36: Détail de la connexion de la dalle de la galerie avec la dalle de l'escalier. (Plans-d'exécution, 2007)

La compréhension et la focalisation sur cet élément est relativement importante, mais encore une fois, aucun schéma ou vue globale n'est créée pour montrer un agencement réel et surtout pour faciliter la lecture de tout ces documents techniques.

▪ L'intégration des techniques de traitement de l'air :

Les conduits HVAC, les circuits d'électricité, de gaz et les générateurs des fibres optiques, figurent sur les plans d'exécution. Certains passent dans un mur qui a du être adapté à cette fin et repartent dans l'espace disponible entre le nouveau plancher et les voûtes, pour desservir tout le volume de l'exposition.

D'autres réseaux comme le réseau de détection-incendie, de détection-intrusion, de vidéo surveillance et de contrôle de l'atmosphère, sont encastrés sous le plancher ou sous plafond de la toiture.

« Les équipements techniques de traitement de l'air essentiels à la bonne conservation des œuvres anciennes ont été intégrés dans les



aménagements architecturaux, et nul ne peut soupçonner le grouillement des machines et des conduits nichés sous les faîtes et sous les dalles... » (Janssen, 2009)

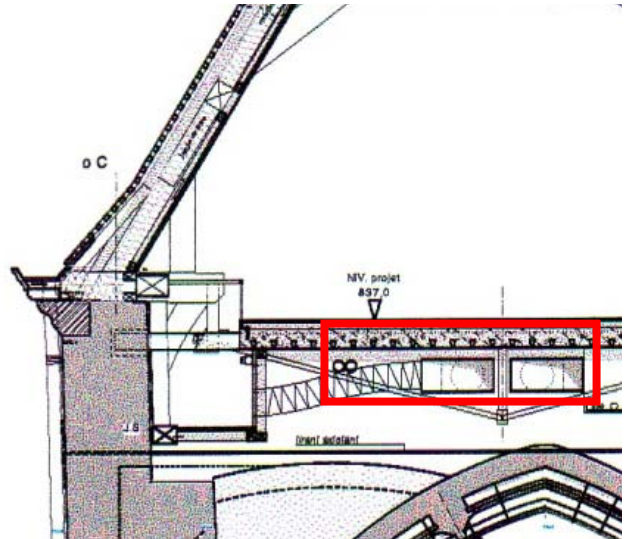


Figure 37 : Des équipements techniques intégrés.
(Plans-d'exécution, 2007)

▪ **Le renouvellement complet de la couverture de toiture :**

La toiture a été complètement isolée, la couverture en ardoises naturelles a été remplacée et les corniches réparées.

Un relevé détaillé des lucarnes de toiture existantes est effectué pour pouvoir les démonter, ainsi que tous les autres documents nécessaires pour la définition des nouvelles lucarnes de toitures sont élaborés, détails châssis, vitrage et connexion à l'existant.

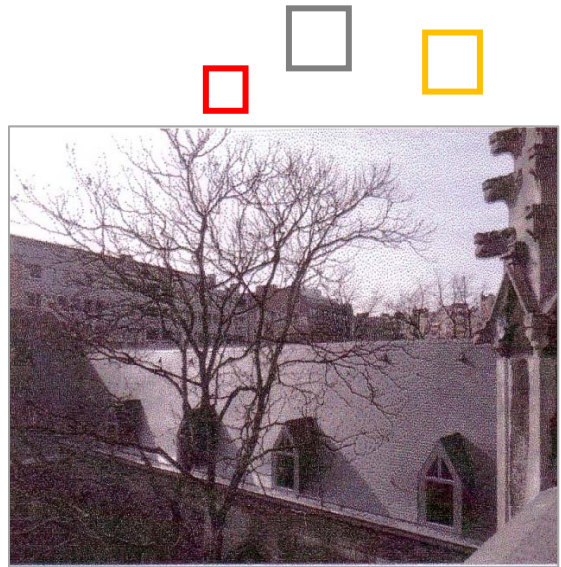


Figure 5 : Vue de la toiture
(Janssen, 2009)

- **la stabilisation des voûtes fissurées du cloître** : Les voûtes ont été soigneusement analysées et réparées également.

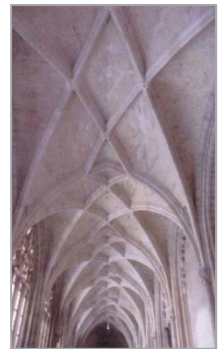


Figure 39: Les voûtes restaurées
(Janssen, 2009)

- **L'articulation sud ouest**

Pour créer cette liaison entre les deux ailes sud et ouest, un relevé était nécessaire pour prévoir des démolitions nécessaires de certaines parties de l'existant, afin de créer du nouveau.

Un tunnel est prévu par les architectes pour relier les deux ailes et des locaux techniques sont intégrés des deux côtés du tunnel.

Un ancien escalier est aussi rénové et aménagé pour issue de secours à l'angle des ailes sud et ouest.

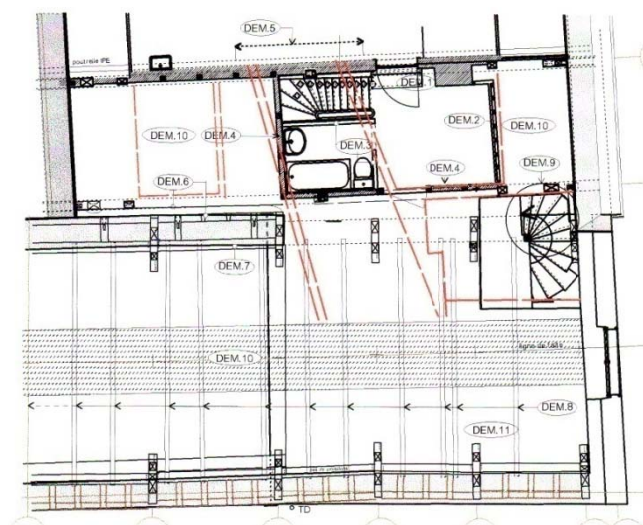


Figure 40 : L'articulation sud ouest et la précision des travaux nécessaires.
(Plans-d'exécution, 2007)

« Pour rejoindre l'aile Ouest à l'aile Sud, un tunnel rouge se fraie un passage dans le foisonnement des charpentes.

Les interventions nécessaires pour donner un second souffle à l'aile Sud ont été plus légères que dans l'aile voisine : il a fallu reconsidérer les techniques de traitement de l'air, remplacer le revêtement de linoleum par un dallage de pierre du pays et raviver le ton des murs et plafonds...»

(Janssen, 2009)



Figure 41 : Le tunnel entre les ailes sud ouest
(Janssen, 2009)



Nous trouvons tous les détails nécessaires à la compréhension de cette intervention dans les plans d'exécution qui ne sont pas si évidents à être analyser, surtout pour mettre le point sur les points délicats de l'intervention.

3.1.1. Synthèse

D'après la liste des points abordés dans cette partie, la focalisation se fait convenablement, par l'équipe entière chargée du projet (architectes, ingénieurs et entrepreneur), sur chacun de ces points.

Cette démarche aide à définir le projet concrètement et son exécution, une étape fondamentale dans la vision constructive du bâtiment et sa constructibilité. Même si, certains points ont été la spécialité de l'architecte ou de l'ingénieur, cependant au final, l'apport en matière de réflexion commune sur les différentes parties du projet est important.

Ces points ont du être discutés, point par point, pour en savoir la finalité architecturale voulue (discussions des architectes entre eux, discussions entre ingénieurs et architectes, discussions entre les architectes et l'entrepreneur, etc..), mais aussi discutés techniquement pour approfondissement de chaque détail.

E. L'étude du site et de la faisabilité

(Accessibilité, stockage, sécurité, déplacement et manipulation des outils et des matériaux sur le site, etc.)

Pour ce projet, l'importance du site est capitale, non seulement parce que le bâtiment est classé patrimoine exceptionnel, mais car il se trouve en plein centre ville, sur le croisement de deux rues assez fréquentées et relativement étroites.



D'après les premiers rapports de réunion de chantier, (Réunion n° 01 du 08/01/2008.) et (Réunion n° 02 du 16/01/2008.), nous trouvons les informations suivantes relatives à une étude de l'organisation du chantier.

La différence par rapport aux critères précédents est que dans ces parties de l'étude du projet, les entreprises y interviennent directement, car elles seront chargées de l'exécution du projet. En effet, cette étude a porté sur une série de points que nous résumons l'essentiel ici :

- **La définition de la zone de chantier**

Les entreprises ont prévu un plan d'installation du chantier et une toiture provisoire surplombant le volume de toiture pour pouvoir travailler à l'abri qui n'a jamais été réalisée.

Ainsi que des limites de chantier en voirie selon l'approbation des services d'incendie et la location des emplacements véhicules longeant la place St-Paul.

La zone parking le long de la façade Ouest est vidée pour l'installation du chantier et une protection de la clôture en fer forgé, des barrières et des deux hêtres pleureurs semblait nécessaire dans cette zone de chantier en terrain privé.

La clôture de chantier est en panneaux de tôle nervurée comme exigée par la ville de Liège.

- **Les accès au bâtiment**

Deux accès définis dans le cas de ce projet : L'accès de travail au chantier et l'accès public au bâtiment.

Le premier accès est prévu via une tourelle d'escalier et une plateforme associées à l'échafaudage sur le pignon Bonnefortune via une baie tire-ballots existante. Cet accès est prévu aussi pour les matériaux.



L'entrée Bonne-fortune par le porche est restée une zone d'accès pour les usagers du bâtiment en prévoyant une signalisation convenable de la zone des travaux.

Les accès des camions est au niveau du parvis situé devant le portail Saint Paul, ce dernier servira de zone de déchargement « chantier ».

Le deuxième accès sera par le porche St Paul qui a du être aménagé pour permettre, le plus longtemps possible, l'accès public au cloître. Cet espace a été prévu d'être divisé en deux zones : une zone de chantier séparée du passage public avec un auvent de protection pour sécuriser le passage public.

La galerie ouest était prévue de rester fermée pendant les durées des travaux pour des questions de sécurité.

▪ Les locaux de chantier

L'entreprise avait remarqué l'exiguïté de la zone de chantier et elle a prévue d'implanter de locaux préfabriqués et conteneurs de chantier superposés le long de la façade n°6 rue Bonne Fortune. Pour la sécurité, les locaux préfabriqués sont implantés en gardant une distance par rapport au mur, pour éviter toute intrusion dans le bâtiment via les toits



Figure 6 : Implantation de la cathédrale st Paul à Liège (Google Earth)

D'autres paramètres étaient pris en considération aussi dans cette étude, comme la signalisation du chantier, les cloisons de fermeture anti poussières et pour la limitation du bruit, à l'intérieur du bâtiment, ainsi que l'étude des réseaux aériens et enterrés au voisinage et le raccord à l'électricité du chantier, etc....

L'étude du site englobe plusieurs points comme nous venons de le voir, certains points fondamentaux étaient bien respectés mais d'autres points prévus ont pu ne pas être réalisés ou respectés comme le montage de toiture provisoire.



Cependant l'étude du site et de l'organisation réfléchie du chantier à l'avance et non en phase finale (juste au début du chantier) peut se révéler prévoyante de problèmes et éviter des décisions de dernière minute, pour cela, il faut un plan d'installation de chantier correctement élaboré et précis et une étude bien illustrée des accès du personnel, des camions et des matériaux avec des zones de stockage convenables, tout en respectant la sécurité nécessaire du personnel, ainsi que vis-à-vis du public.

Enfin, l'étude doit aussi prendre en considération le déplacement et la manipulation des outils et des matériaux sur le site, par exemple pour ce projet, la grandeur des poutres manipulées, l'espace nécessaire pour les insérer dans le bâtiment, les faire pivoter, les fixer, surtout qu'ici le bâtiment en question est un bâtiment classé et aucune action imprévue et néfaste pour celui-ci peut être acceptable.

Un autre exemple dans ce projet, comment couler une dalle correctement alors qu'il y a une ferme chaque trois mètres et une couverture de toiture démontée et à refaire sans la toiture provisoire prévue mais non réalisée?

Une réflexion dimensionnelle est derrière ce critère de constructibilité, pour s'assurer que les éléments conçus trouveront le cheminement et l'espace nécessaire pour aboutir à leurs emplacements prédéterminés depuis la phase de conception.



F. La planification de la construction

(Succession des tâches de construction, durées, approvisionnement à temps et contrôles des mises en œuvre.)

D'après le premier rapport de réunion (Réunion n° 01 du 08/01/2008.), les auteurs du projet et le bureau d'étude ont insisté sur la nécessité d'un planning détaillé des travaux, élaboré par l'entreprise.

Cette demande a été bien respectée par l'entreprise et le planning des travaux résultant comprenait 91 tâches au total (une copie de ce planning est mise en annexe).

Nous pouvons élaborer les grandes étapes suivantes de ce planning :

- L'installation de chantier
- Le gros œuvre et la couverture de l'aile ouest
- Le gros œuvre du raccord sud ouest
- Les parachèvements et les techniques

Le planning est bien détaillé dans l'ensemble des tâches du gros œuvre et du parachèvement, souvent avec des tâches mises en parallèle pour un travail plus productif.

Il y a certainement des tâches oubliées, ou des dates importantes oubliées comme les livraisons à temps des matériaux, et les poste de sécurité du chantier, mais en général, l'étude est intéressante pour la connaissance de toutes les durées correctement prises en considération avec possibilité de modification ou de vérification de l'avancement des travaux au cours du chantier.

La planification des travaux suivant un planning pareil est une nécessité pour la constructibilité du bâtiment, le planning est un instrument important d'analyse et de mise en liaisons des différentes phases de construction. Il permet également une prévision et un contrôle du déroulement du



chantier, surtout en définissant des délais critiques et des exigences horaires à respecter.

Au moyen de différents logiciels comme « Open Workbench » ou « MS Project », nous pouvons procéder à des simulations de modification du planning et à analyser à chaque fois l'impact de ceux-ci sur le planning et le déroulement du chantier.

Le but final étant après tout de savoir trouver des solutions si des problèmes interviennent réellement sur le chantier et de savoir gérer le retard et réagir de façon adéquate.

Quelques aspects n'ont pas fait l'objet de la planification et qui finalement pour la constructibilité sont fondamentaux et ils peuvent constituer un obstacle à l'avancement du chantier :

- La toiture provisoire n'a jamais été réalisée et une solution de bâche de toiture a été mise en place. La bâche n'a jamais été prévue dans la planification.

La constructibilité du projet nécessitait une réflexion plus importante sur la protection contre les intempéries surtout que le travail du chantier en période hivernale n'est pas l'idéal et que le démontage de la couverture de la toiture est parmi les premières tâches prévues à réaliser sur le chantier.

- Dans le planning, il y a également une tâche « bétonnage dalle » mais sans autre précision sur la partie de la dalle coulée en premier, comment faire dans ces conditions pour couler la dalle, est-ce que le temps de couler la dalle travée par travée entre les fermettes est pris en considération dans le planning ? « Un ordre de travail logique a du être créé par nécessité sur le chantier (Janssen, 2009):
 - Démontez la toiture



- Bâcher toute la toiture et débâcher chaque matin avec le problème d'infiltration en période hivernale
- Couler la dalle par tranche
- Remettre la couverture de la toiture
- Poser l'escalier métallique préfabriqué dans sa cage en béton armé et couler la dalle de l'escalier. »

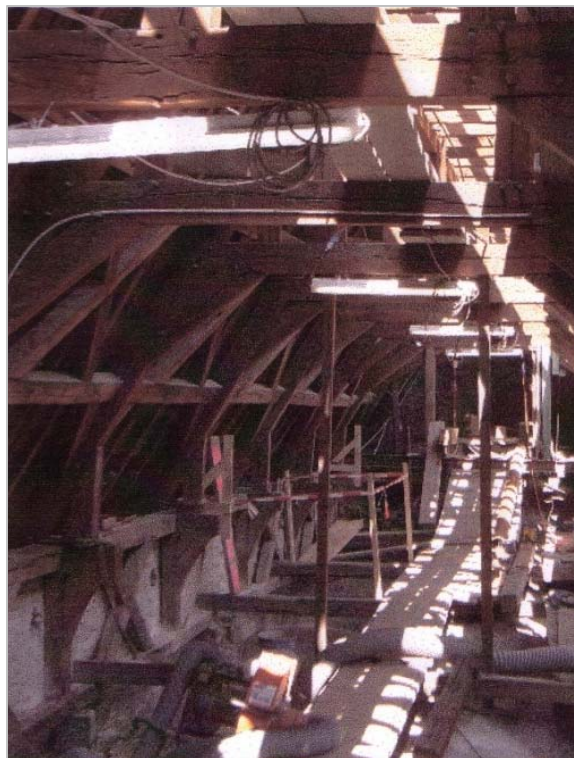


Figure 43 : Vue de l'intérieur des combles au début du chantier et la nécessité de faire de cet espace, un espace de travail avec des planches posées pour ne pas surcharger les voûtes et l'éclairage artificiel nécessaire. (Janssen, 2009)

Aucun poste de vérification de certaines tâches du travail ou de contrôle de sécurité n'est inséré dans le planning.

De même que le parachèvement englobe toute la planification de succession des techniques spéciales, mais dans un schéma relativement compliqué et qui ne facilite pas forcément l'exécution.



La conformation complexe des lieux n'est-elle pas importante ? Elle n'apparaît pas non plus dans le planning, pourtant il a fallu tout prévoir à l'avance pour importer les éléments structurels sans impacter l'existant dans ce bâtiment.



Figure 44 : La pose de l'escalier de secours en acier corten.
(Janssen, 2009)



3.2. Synthèse

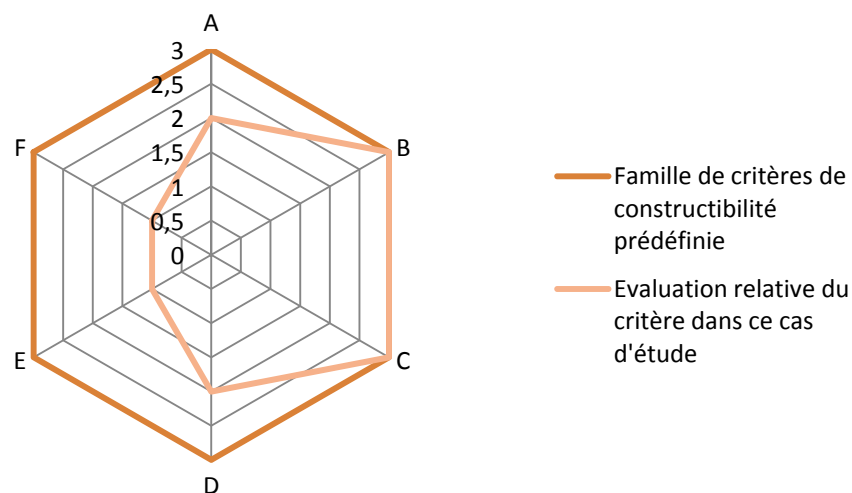
Les critères de la constructibilité sont relativement validés dans le cadre de ce projet, certains moins que d'autres.

Le critère de « **Conception architecturale souple et collaborative** » n'était pas vraiment le cas dans ce projet, mais c'est plutôt le défi structurel qui a nécessité un travail collaboratif en équipe, par suite, le deuxième critère de « **conception structurelle collaborative** » est plus significatif au niveau de la validation de la constructibilité.

La « **focalisation commune sur les nœuds cruciaux du projet** » s'avère la partie la plus réussie de l'étude de la constructibilité et elle a déterminé essentiellement l'aboutissement du projet conçu.

Les deux derniers critères : « **L'étude du site et de la faisabilité, et la planification de la construction** », qui sont nécessaires pour cerner les opérations sur le site, éviter les problèmes sur chantier et gérer la coordination des travaux, ont été moins efficaces dans le cadre de ce projet. Apparemment, d'après l'auteur du projet « le planning initial a été vite abandonné ». Les documents relatifs à ces critères n'étaient pas respectés sur le terrain et n'ont pas été efficaces, ce qui a créé des problèmes de coordination sur le chantier.

Pour représenter le résultat de l'étude selon les critères de ce projet, nous utilisons encore une fois un schéma radar, nous considérons que selon le travail de l'équipe lié à chaque critère prédéfini, ce dernier se place sur l'échelle de 0 à 3 : 0 = Aucune étude dans la famille de critère, 1 = étude normale, 2 = étude et recherche importante, 3 = étude et recherche poussées.



A.	LA CONCEPTION ARCHITECTURALE SOUPLE & COLLABORATIVE
B.	LA CONCEPTION STRUCTURELLE COLLABORATIVE
C.	UN DIMENSIONNEMENT CORRECTE
D.	UNE FOCALISATION COMMUNE SUR LES NOEUDS CRUCIAUX DU PROJET
E.	L'ETUDE DU SITE ET DE LA FAISABILITE
F.	LA PLANIFICATION DE LA CONSTRUCTION

Figure 45: Schéma avec l'évaluation des critères de constructibilité.

Dans ce projet, le schéma d'élaboration du projet reste classique par l'intervention successive des acteurs et l'entrepreneur qui intervient en phase finale avec une connaissance du projet basée sur les documents élaborés par les ingénieurs et les architectes.

Les documents de travail du projet (plans, façades, coupes, implantation, détails, plans complémentaires, planning de chantier par l'entrepreneur) sont multiples, surtout quand ceux-ci ne sont pas les mêmes utilisés par tous les membres de l'équipe. De plus, souvent, il n'y a aucun support commun pour communiquer efficacement entre les acteurs.



La compréhension du projet est souvent à creuser entre ces documents. Toute lecture de ces documents est souvent accompagnée de réflexion, en essayant de faire le lien entre ceux-ci. La quantité d'informations et de détails auxquels il faut faire attention ne semble parfois pas faciliter la tâche de « compréhension de la construction » ou la « compréhension de la structure » surtout par les architectes.

Pourquoi ne pas élaborer un modèle 3D du projet pour une meilleure compréhension? Certes, pour l'image commerciale d'un projet, un modèle 3D est indispensable de nos jours. Mais dans une recherche de constructibilité, une maquette numérique 3D qui contiendra une vue globale d'un projet entrain de se construire, voire l'agencement des éléments dans l'espace, ne pourra pas être encore plus intéressante qu'une simple image représentative ?

Pour un esprit ou l'imagination est limitée devant cette multiplication de documents, un modèle 3D pour une partie ou pour un projet complet ne pourra-t-il pas intégrer les nœuds cruciaux traités du projet ? Au moins intégrer la 3D des systèmes structurels et de leur construction dans le temps?

L'architecte est moins familier aux systèmes constructifs et un système, représentant la construction par son agencement et ses étapes, peut lui être utile, pour apercevoir une autre dimension essentielle de son projet. De même que ce modèle pourra servir d'outil de discussion avec l'ingénieur.

Dans la dernière partie de ce travail d'étude, nous ne pencherons sur cette modélisation numérique recherchée et sur la simulation de la construction. Encore une fois, le but étant de créer une meilleure relation entre l'ingénieur et l'architecte mais cette fois-ci par l'outil de la simulation, en



proposant cette façon complémentaire de vérification de la constructibilité d'un projet, depuis la phase de conception.



VERS LA SIMULATION DE LA CONSTRUCTION



5. Vers la simulation de la construction

Il y a eu de nombreuses recherches et plusieurs stratégies pour améliorer la constructibilité d'un projet. Ainsi que des modèles informatiques sont mis en œuvre pour aider une équipe de projet dans l'intégration des connaissances et de l'expérience en construction au cours de la phase pré-construction.

Walid Thabet, dans son article « Design/Construction Integration through Virtual Construction for Improved Constructability » cite plusieurs de ces stratégies, parmi lesquelles certaines se distinguent par l'utilisation de l'outil informatique : certains auteurs «ont décrit les aspects de la production d'une aide automatisée Design (ADA) qui fourni aux concepteurs une aide à la décision utile concernant la conception des corrections et des adaptations.. ». Tandis que d'autres « ont introduit une méthode pour utiliser un dessin assisté par ordinateur (CAD) modèle 3D d'un projet pour la mise en examen de la conception et l'examen des conflits possibles.» (Thabet, 2009).

Cet article propose également un modèle général d'intégration de la construction virtuelle en phase de « pré-construction ». Comme le montre la figure 45, le modèle est basé sur un processus de revue de la conception grâce à la construction virtuelle d'un projet développé.

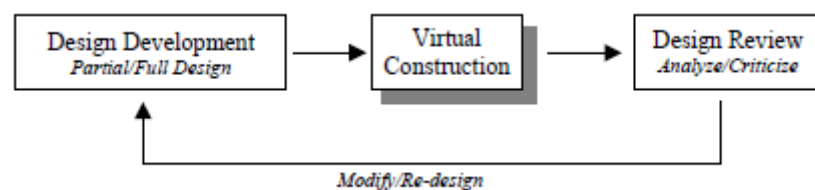


Figure 47 : Le processus de conception | construction virtuelle (Thabet, 2009)



Ces processus d'examen peuvent être appliqués sur une partie ou sur la totalité du projet selon la taille et la complexité de l'étude.

Dans ce cadre, si nous intégrons une construction virtuelle basée sur un modèle 3D depuis la phase « pré-construction », qu'est ce que ce modèle 3D peut-il apporter à l'étude de la constructibilité? Est-ce qu'il aura une influence sur le travail collaboratif autour du projet?

Enfin à quelles exigences doit répondre ce modèle 3D ?

5.1. Collaboration fondée sur un modèle 3D

5.1.1. Outil 3D de communication

« Alors que les modes de représentation sont dominés par la contrainte de la surface plane qu'il faut dépasser pour exprimer les trois dimensions.. » (Boudon, 1994) . En effet, de nos jours, pour un projet d'architecture, l'outil 3D est de plus en plus utilisé et une présentation d'un projet ne semble pas accomplie sans cet outil, « l'usage de séquences visuelles sur l'écran de l'ordinateur, à l'intérieur comme à l'extérieur de l'édifice, et dans lesquelles le contexte est intégré, peut permettre de visualiser un projet de manière dynamique.... une promenade architecturale simulée par ordinateur, intégrant la lumière, les matières, bientôt les résonances sonores,» (Boudon, 1994) est l'apport essentiel en matière de création d'espace architectural concrétisé sur l'écran.

« Dès qu'une représentation se veut comme réelle, elle s'inscrit d'avantage dans un processus de communication que de conception » (Boudon, 1994) , c'est le cas en générale d'un modèle 3D qui représentera un projet ou un



élément ou une partie de celui-ci et qui aura des potentialités plus naturellement séductrices que les documents 2D.

La notion de conception architecturale collaborative traitée en première partie de ce travail de fin d'étude s'avère soutenue par cette notion de 3D comme objet de communication qui a les avantages suivants :

- « Eviter le morcellement inévitable des autres modes de représentation.
- Avoir une vision externe, aérienne, facilitant la compréhension de l'ensemble.
- Avoir une observation interne des espaces.
- Intégrer un nombre important de paramètres. »

(Boudon, 1994)

Dans ce cas, il faut définir un modèle 3D qui servira d'objet de discussion du parti architectural et de la volonté spatiale des architectes. Le modèle 3D viendra soutenir une idée et aider à sa meilleure compréhension de tous les acteurs dans le projet.

Cependant, un modèle 3D, même architectural, peut se limiter à une vue superficiel d'agencement de volumes, comme il peut traiter d'un détail structurel, d'où l'importance de définir le niveau de détail et ce que nous estimons intéressant à être communiquer via la documentation 3D.



5.1.2. Définition du niveau de détail au stade de la conception

« Les architectes ont souvent représenté la géométrie globale des surfaces extérieures en 3D, y compris les toitures, bardages, vitrages, etc., ou des géométries structurelles primaires, tandis que les détails des composants sont complétés par des dessins en 2D classiques. » (Ku, Pollalis, Fischer, & Shelden, 2008)

Nous pouvons partir sur ce principe, pour travailler sur un modèle 3D avec des dimensions géométriques bien définis si nous voulons étudier l'aspect réel et la dimension structurelle.

Les valeurs réelles sont attribuées aux éléments fondamentaux du projet, d'après une recherche structurelle collaborative, qui pourra comprendre plusieurs essais de modélisations et le dimensionnement correct des éléments, le tout intégré dans un modèle 3D.

La constructibilité sera en quelque sorte traduite par une représentation bien définie du projet. Le but est une concrétisation virtuelle réelle du projet en phase de conception.

Le niveau de détail peut comprendre le principe structurel de base, comme il peut comprendre le détail de parachèvement de la construction, de même que la représentation de tous autres éléments techniques dans le projet (système de ventilation, câbles électriques, etc.).

L'important est de se fixer un niveau de détail pour chaque nœud crucial du projet et élaborer une modélisation le traitant pour une meilleure discussion et meilleure compréhension visuelle.



5.1.3. Modèle 3D descriptif

Si nous ne penchons dans ce cas, sur l'apport de la 3D dans la conception structurelle collaborative, nous nous ne préoccupons d'un modèle 3D de construction, cette fois-ci, la 3D présentera une réalité souvent cachée : la structure.

Quels sont les avantages d'une 3D dans une visualisation structurelle :

« De quelles manières les éléments sont-ils assemblés, dans quelles configurations spatiales, avec quelles dimensions ? » (Boudon, 1994) Ces questions trouvent leur réponse par une 3D et qui sont un apport supplémentaire par rapport aux documents 2D.

Au niveau structurel, le message fourni par une 3D est bien précis, bien objectif et limite les interprétations car il rend intelligible certains aspects de la réalité, souvent non évidents à être compris. Une façon de s'assurer que ce qui est communiqué aux entrepreneurs ne subira pas une mauvaise interprétation ou sera mal compris.

De plus, un modèle 3D ressemble à une maquette en carton car il donne cette dimension spatiale qui manque sur une surface plane, mais avec un niveau de précision plus élevé et une représentation d'un nombre d'éléments modélisés plus important. De plus, d'après Philippe Boudon, « il y a trois fonctions remplies par une maquette en carton :

- Une fonction de communication
- Une fonction de description
- Une fonction d'aide à la conception » (Boudon, 1994)

Pouvons-nous attribuer ces fonctions à un modèle 3D ?



En effet, un modèle 3D est pour communiquer ou pour mettre en évidence une certaine réalité, de plus il aidera à décrire les éléments et leurs agencements. Enfin, une fois le modèle 3D est réalisé, une analyse des problèmes dans ce dernier peut influencer la conception, en corrigeant ou en améliorant la conception de départ.

Certains auteurs ont essayé de définir une série de points importants à vérifier au cours du développement d'un modèle 3D de construction :

- « Augmenter la documentation relative au projet : les dimensions des éléments, le procédé de construction et la coordination de la construction.
- Détecter les conflits entre les éléments d'une structure.
- Vérifier les connexions structurelles entre :
 - Les éléments linéaires : par exemple entre les colonnes et les poutres.
 - Les éléments pleins (matière continue) : par exemple entre les planchers et les plans inclinés, le revêtement de façade et la toiture, les articulations entre des éléments d'épaisseurs différentes et la connexion au sol.
- Choisir le niveau de détail : par exemple le détail des assemblages dans les structures métalliques. »

(Ku, Pollalis, Fischer, & Shelden, 2008)

Le but final de cet outil 3D est d'aider à vérifier la constructibilité du projet, par sa fonction de représentation et de communication.



5.1.4. Autres aspects

D'autres aspects peuvent intervenir dans cette collaboration basée sur un modèle 3D.

Cependant, tout ce qui est propre au domaine de calcul structurel, du dimensionnement et des analyses directes donnant les contraintes dans la structure, n'intervient pas dans le cas du modèle 3D à vision représentative et non analytique, à part par les résultats qui donnent le type et les dimensions des éléments choisis et surtout la validation de la totalité fonctionnelle de la structure.

Deux autres aspects qui ont souvent une ampleur significative sur tout travail collaboratif :

- **La gestion des données 3D et les responsabilités**

« L'architecte n'est pas responsable des vices de construction résultant des plans et des mauvaises lectures ou évaluations, tandis que l'entrepreneur n'est pas responsable des erreurs de conception, laissant ainsi le maître d'ouvrage à risque contre les erreurs de conception. » (Ku, Pollalis, Fischer, & Shelden, 2008)

Ces auteurs expliquent qu'une meilleure coordination du projet grâce à une collaboration fondée sur un modèle 3D, surtout entre architecte et entrepreneur, réduit les risques pour le maître d'ouvrage, vu qu'un plus grand partage des informations peut être facilité par le modèle 3D.

Pour les projets de géométrie complexe, l'entrepreneur est normalement responsable de la conception finale détaillée, il est donc essentiel qu'il prend possession du modèle.



- **Le transfert des données**

En général, les fichiers de travail de l'architecte et les fichiers des entrepreneurs ne sont pas souvent directement compatibles, le transfert des données nécessite une intervention humaine, car des écarts et des pertes d'informations peuvent se produire.

Encore une fois, la stratégie de l'architecte est délicate dans le cadre du transfert des données, comment le fonctionnement avec un modèle 3D est-il possible au sein du projet?

Ce modèle 3D peut être fourni à tous acteurs dans le projet, « ces derniers récupèrent l'information pour l'utilisation sur leurs propres plates-formes ». (Ku, Pollalis, Fischer, & Shelden, 2008)

Dans ce cas, le rôle de l'architecte n'est pas limité à la conception, mais il a un rôle plus étendue, plus large en tant que coordinateur global du projet. « Pour garder le contrôle effectif, les architectes doivent prendre le rôle de coordinateur du projet qui assume l'entière responsabilité de modifier ou d'approuver le modèle. »

(Ku, Pollalis, Fischer, & Shelden, 2008)

Cette vision de travailler sur un seul modèle, potentiellement contrôlé par l'architecte, et qui servira comme modèle de construction, dépend de beaucoup de facteurs; par exemple, la capacité de collaboration, la distribution des rôles, la répartition des responsabilités et les compétences techniques des collaborateurs.

Ces réflexions sur les aspects de gestion sont essentielles pour une étude de constructibilité qui pourra s'en servir d'un modèle 3D.



Après avoir exposé l'outil 3D comme outil de soutien à la collaboration, à la concrétisation de la spatialité et au dimensionnement du projet, nous nous posons la question de ce que l'objet 3D peut apporter à la planification de la construction et à l'étude du site.

Nous estimons qu'en plus de la tridimensionnalité du projet, une dimension temporelle doit être impliquée pour la planification de la construction, car le séquençage temporelle des tâches et l'ordre de construction constitue l'essentiel de ce critère de constructibilité.

D'où l'intérêt que nous portons, par la suite de ce travail de fin d'étude, aux modèles et simulations 4D.



5.2. De la 3D à la modélisation 4D

5.2.1. Contexte

« La planification de la construction est de plus en plus prise en charge par l'application de CAO 4D. Celle-ci est considérée comme une évolution naturelle de modèles 3D, car elle ajoute une autre dimension : le temps. » (Phair, 2000)

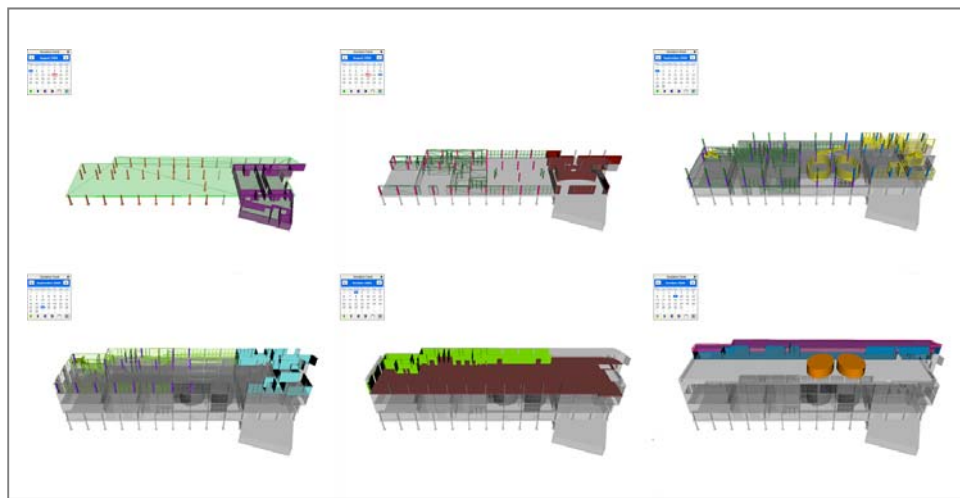


Figure 48 : Un exemple de simulation 4D | «Generated 4D Simulation Sequence in the Testing"(Zhou, Heesom, Georgakis, Nwagboso, & Feng, 2009)

D'après une autre source, « c'est un outil intégré qui permettra aux intervenants dans la construction de travailler sur un modèle commun et cohérent. Ainsi, ils peuvent négocier et collaborer pour parvenir à une conception améliorée. » (Aouad, Lee, & Wu, 2005)

D'après l'article intitulé « An interactive approach to collaborative 4D» (Zhou, Heesom, Georgakis, Nwagboso, & Feng, 2009) , il semble que l'utilisation de la simulation 4D dans le domaine de la construction est en croissance, toutefois, son intégration lors de la réalisation d'une véritable planification collaborative n'a pas encore été pleinement réalisée. (Boton, Kubicki, & Halin, 2010)



Ces modèles 4D sont actuellement utilisés comme un outil d'examen ou de critique de la planification du projet. Une nouvelle approche est recherchée à travers un environnement permettant une collaboration interactive pour créer le plan de construction et des simulations 4D ultérieures directement à partir du modèle 3D unique. Cette approche 4D prend en charge le processus de planification, en fournissant un modèle unique d'entrée 3D, qui peut être manipulé avec l'aide efficace utilisateur-système conduisant à la simulation complète.

Hendrickson (Hendrickson, 1998) précise que la planification de la construction est une activité essentielle car elle implique : le choix de la méthode, la définition des tâches, l'estimation des ressources nécessaires, les durées des tâches individuelles, et l'identification de toutes les interactions entre les différentes tâches.

Mais comment définir une tâche à simuler?

Cet auteur cite trois sortes d'informations nécessaires pour la définition d'une tâche :

- Des informations spatiales pour l'identification des lieux de travail,
- Des informations temporelles pour le contrôle du temps de travail,
- Des informations logiques pour la génération de la séquence.

Dans la plupart des cas, les projets de construction sont un effort de collaboration avec l'élaboration d'un plan de construction.



5.2.2. Apport de la 4D

Egalement, d'après l'article intitulé « An interactive approach to collaborative 4D» (Zhou, Heesom, Georgakis, Nwagboso, & Feng, 2009) , nous pouvons en extraire la liste des bénéfices potentiels suivants de la 4D :

- Présenter des idées aux clients en vue de promouvoir le travail collaboratif.
- Aider dans l'aménagement du site et les espaces d'exécution des travaux.
- Analyser le programme de construction afin d'évaluer son caractère exécutable.
- Evaluer des alternatives des calendriers de construction.
- Comprendre plus efficacement les informations du bâtiment par rapport à l'approche la plus traditionnelle de la 2D.
- Aider à la reconnaissance du domaine des tâches en milieu de travail et la séquence logique de la représentation visuelle, par l'utilisation de l'élément géométrique 3D dans des modèles 4D.
- Assurer une interaction efficace entre les planificateurs du projet par la création d'un environnement partagé, surtout quand géographiquement les acteurs sont espacés et quand chacun a sa façon d'organiser les activités de construction.

Fischer (Fischer, 2009) décrit également les avantages de la 4D, d'après lui, les modèles 4D ont les avantages suivants :

- De comprendre et de commenter les portées du projet d'une manière proactive et en matière de temps, par l'équipe diversifiée de participants au projet.



- L'exploration et l'amélioration de la stratégie d'exécution du projet, l'amélioration de la constructibilité correspondant aux gains de productivité sur site, et l'identification rapide et la résolution des conflits espace-temps.
- Utilité dans des projets qui impliquent de nombreux acteurs, dans des projets en cours de rénovation et à des projets conditionnés par des sites étroits.



5.3. Utilisation de Google SketchUp- 4D virtual builder

Dans l'article intitulé « 4D CAD Modeling: Visual Intelligence for Construction Management » (Fischer, 2009), Fisher explique que les modèles 4D relient les composants dans les modèles CAO 3D avec les activités de la conception, l'approvisionnement et les calendriers de construction.

Le modèle 4D d'un projet permet de visualiser le projet de construction au fil du temps sur l'écran et d'examiner le modèle de CAO 3D pour un jour, une semaine ou un mois du projet.

En plus de la littérature et des recherches faites sur ce sujet, pour développer concrètement une réponse à l'apport 3D et 4D, nous nous baserons sur les documents 2D du cas d'étude de la Cathédrale pour élaborer une modélisation 3D suivi d'une simulation 4D avec l'outil "Google SketchUp » et le plugin SketchUp 4D Virtual Builder". Nous avons fixé le niveau de détail de la modélisation (voir partie 5.4.2) aux grandes lignes structurelles, le projet étant en grande partie influencé par le parti structurel.

5.3.1. La méthodologie

Après l'étude de la constructibilité établie précédemment et la focalisation sur les nœuds cruciaux du projet de la cathédrale St-Paul, la compréhension des documents est acquise et les étapes de travail de la modélisation se font dans l'ordre suivant :

- Le choix des éléments existants à modéliser :
Les combles avec la maçonnerie et la charpente existante.
- Le choix des éléments structurels à modéliser :



Les poutres IPE, les profilés barreaux, les tirants, les coffrages perdus de la dalle, la dalle, la tourelle d'escalier en béton, l'escalier en acier corten de la tourelle.

- La modélisation de chaque élément, en utilisant les dimensions données dans les plans d'exécution.
- L'étude de la planification et l'établissement d'un planning avec un ordre de succession des tâches dans une logique de construction et l'attribution d'un temps réel à chaque tâche de montage des éléments structurels modélisés.
- L'élaboration du modèle 4D en créant les liens entre les composantes du modèle 3D et le planning établi.
- Les réflexions sur la simulation obtenue.

5.3.2. Les outils

5.3.2.1. Google SketchUp

Google SketchUp est un logiciel qui permet de « créer, modifier et partager des modèles 3D », il est utilisé dans toutes sortes de domaines comme l'architecture, le génie civil et la construction. Cet outil est assez « rapide et intuitif » ce qui facilite son utilisation.

5.3.2.2. SketchUp 4D Virtual Builder

Ce plugin permet de créer des modèles 4D entièrement dans SketchUp, avec une procédure assez simple :

- Définir des objets 4D (tâches) dans la fenêtre de 4D.
- Sélectionnez les composants dans SketchUp et les lier aux objets 4D.
- Générer automatiquement des scènes Sketchup par date.



5.3.3. La modélisation 3D

La modélisation de l'existant comporte la charpente et la maçonnerie et donne une première vue 3D globale de l'espace et des dimensions.

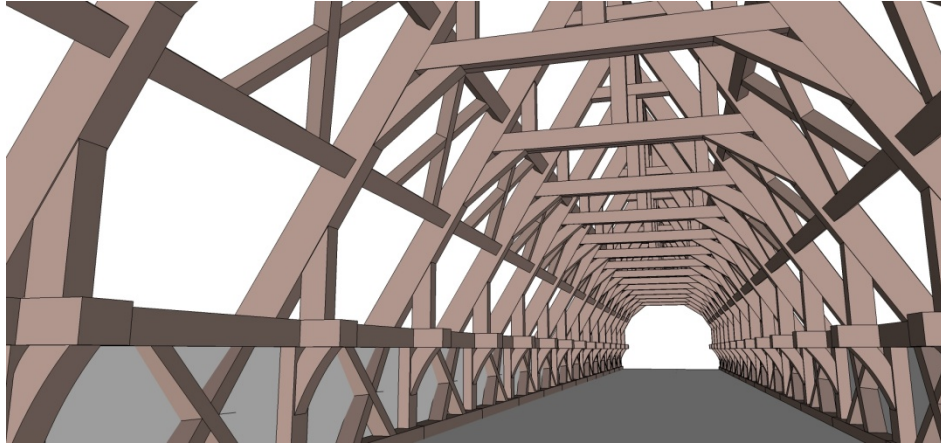


Figure 49 : Vue 3D de la charpente et maçonnerie existante.

La représentation 2D montre les éléments de la charpente et les précise avec les dimensions, cependant une meilleure compréhension de la spatialité existante sous cette charpente est aidée par la 3D.

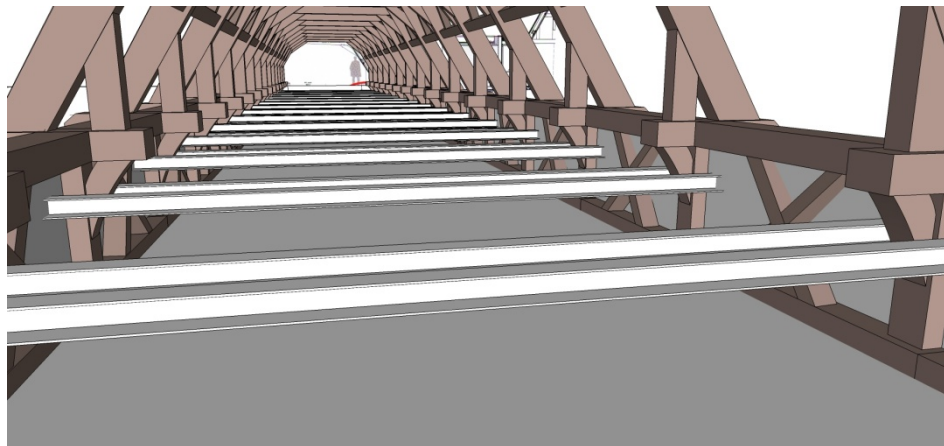


Figure 50 : Les poutres IPE fixés dans la maçonnerie.

Une vue 3D permet de faire le lien direct entre, par exemple, le dessin en plan et une coupe d'un élément et d'avoir une meilleure compréhension visuelle, utile pour une meilleure discussion.

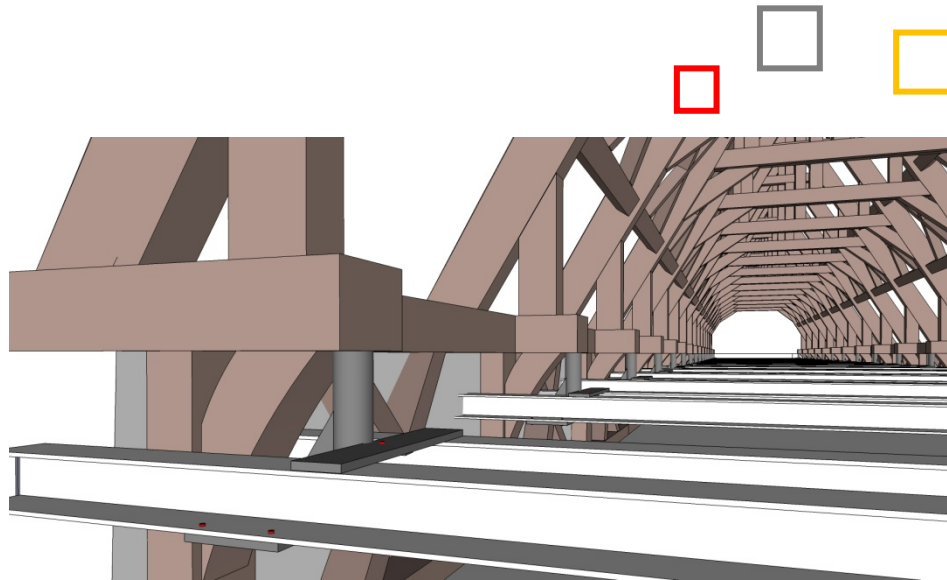


Figure 11 : Les barreaux métalliques qui relient les poutres IPE à la charpente.

Dans le cas des barreaux et des tirants, ce détail d'agencement a également nécessité la compréhension de plusieurs coupes dans les plans d'exécution mais une fois la modélisation 3D élaborée, cet agencement semble plus facile à être communiqué et à être appréhendé.

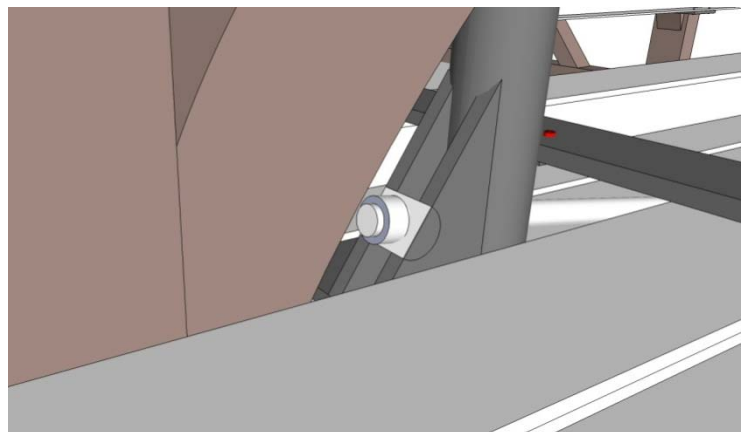


Figure 52 : Raccord du barreau au tirant.

L'encombrement des éléments, leurs dimensions relatives, leurs localisations, leurs répartitions dans l'espace avec le nombre et la répétition de certains éléments sont mieux visualisés, comme dans le cas des tirants.

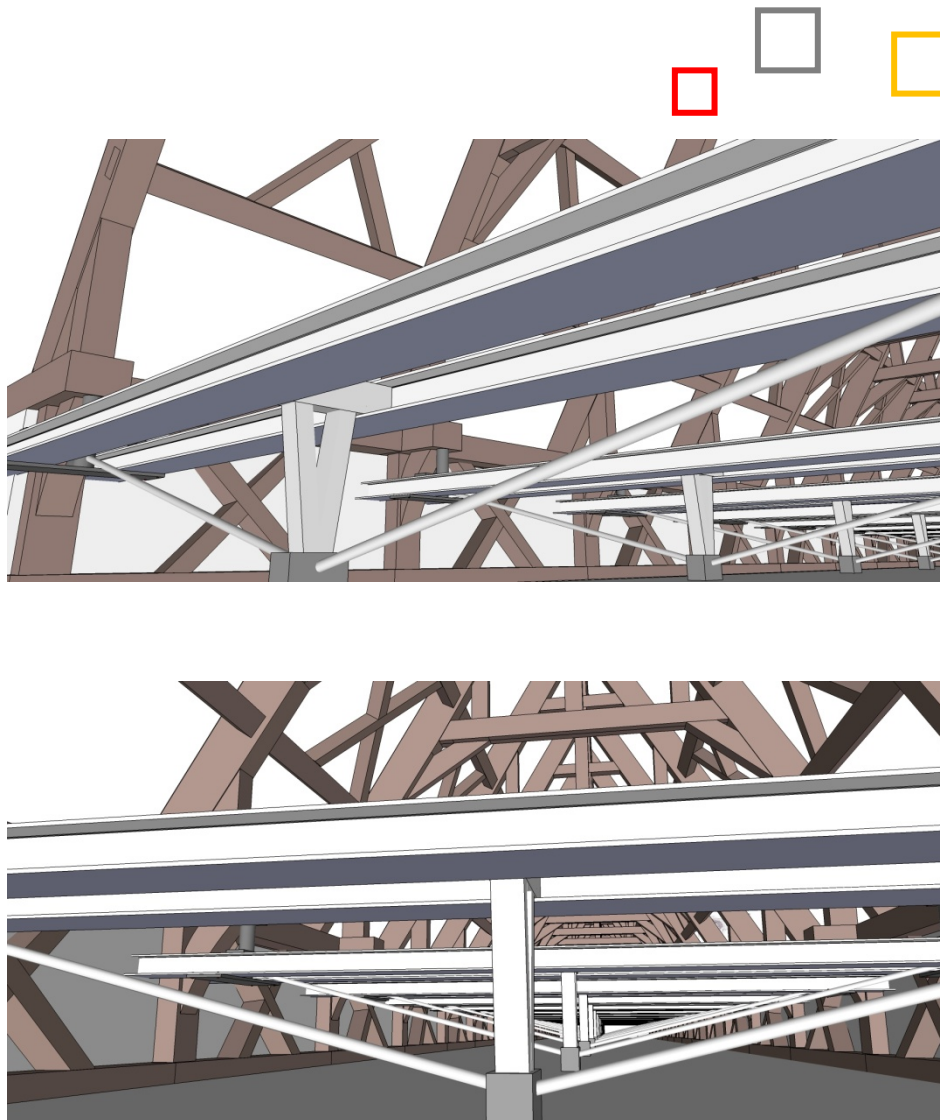


Figure 53 : Vues des tirants

Le travail de modélisation des éléments structuraux effectués par un architecte pourra affiner sa connaissance en matière de chaque élément structurel visible utilisé et lui permettre de comprendre plus concrètement les influences d'un choix structurel sur sa volonté en termes de spatialité.

Le système structurel intègre des gaines de ventilation, qui viennent se glisser entre les tirants et les poutres IPE de la structure. La 3D permet, dans ce cas, de détecter si un conflit entre deux ou plusieurs systèmes est éventuel et si l'espace est suffisant pour le passage des gaines, des câbles électriques, etc.

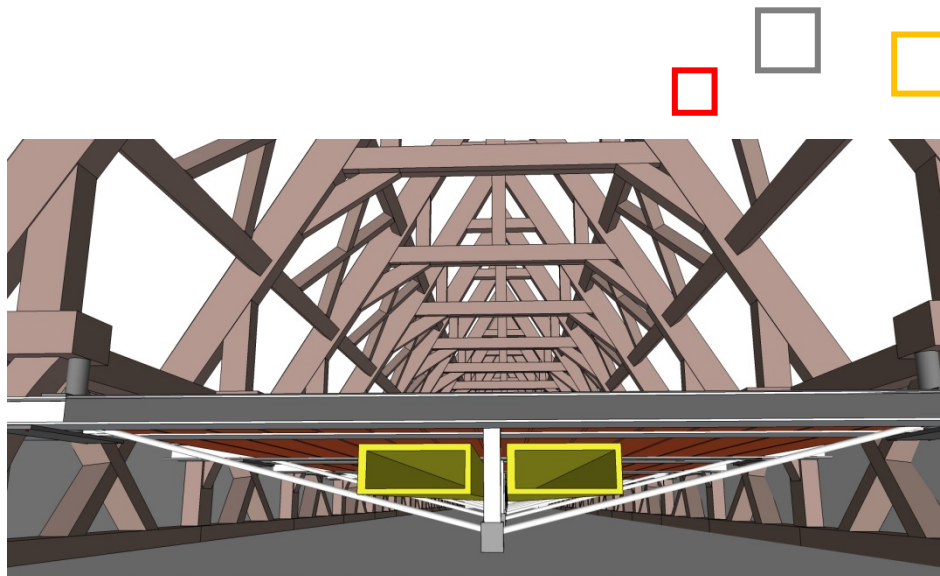


Figure 54 : Gains de ventilation glissées entre les tirants et les poutres du plancher.

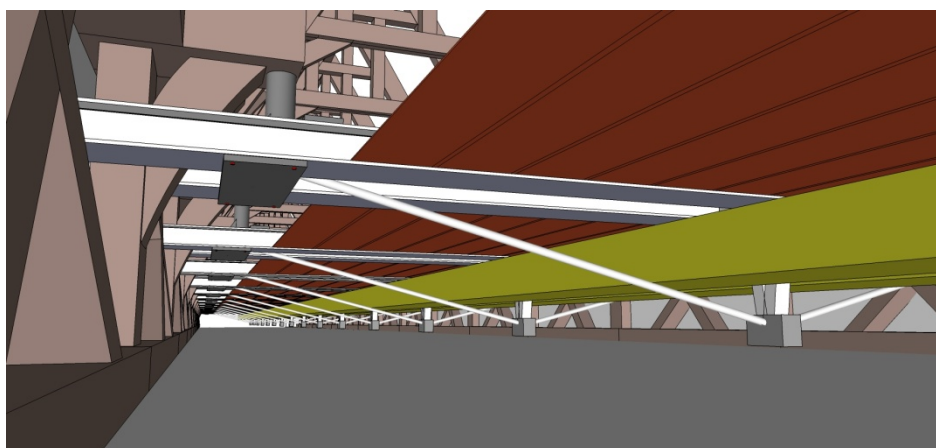


Figure 55 : L'agencement dans l'espace des poutres, des barreaux, des tirants, du coffrage de la dalle et des gains de ventilation.

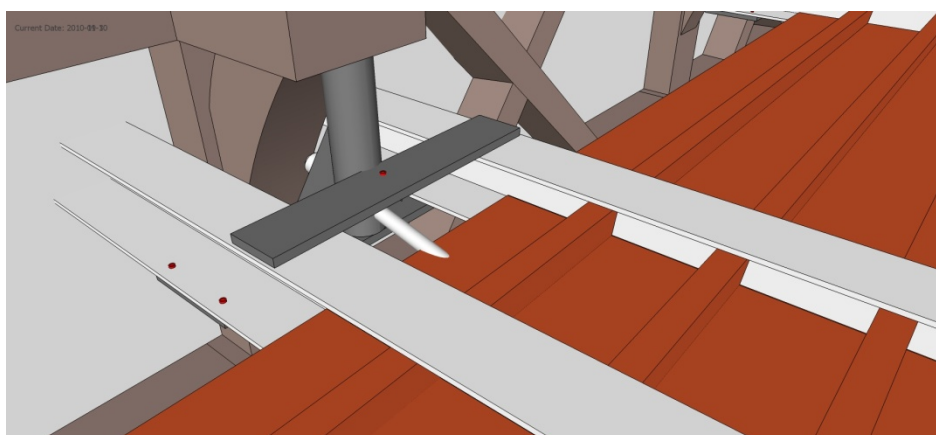


Figure 56 : Détection : Le tirant transperce les tôles de coffrage perdu de la dalle.



La réalisation d'un modèle 3D structurel nécessite une certaine logique de modélisation des éléments qui se rapproche de l'ordre logique de montage de la structure. Ceci permet de recréer la réalité de l'emboîtement structurel, par exemple, nous modélisons le coffrage de la dalle avant la dalle même et pas l'inverse.

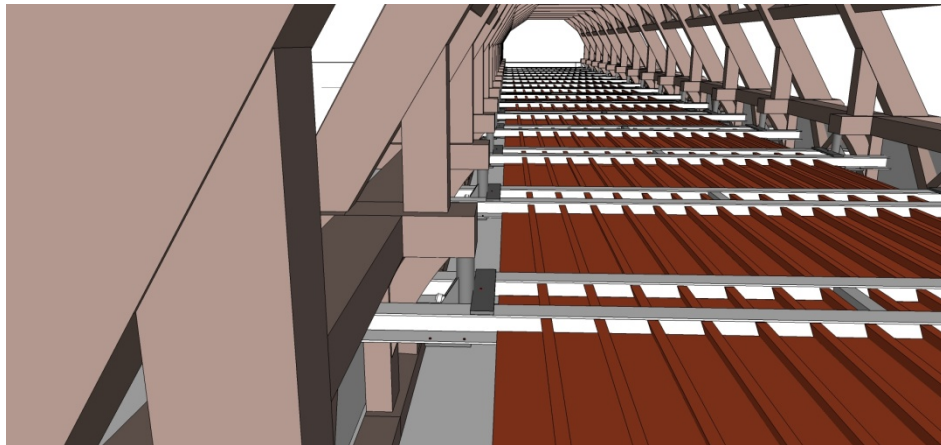


Figure 57 : Les tôles de coffrage de la dalle fixées entre les poutres IPE.

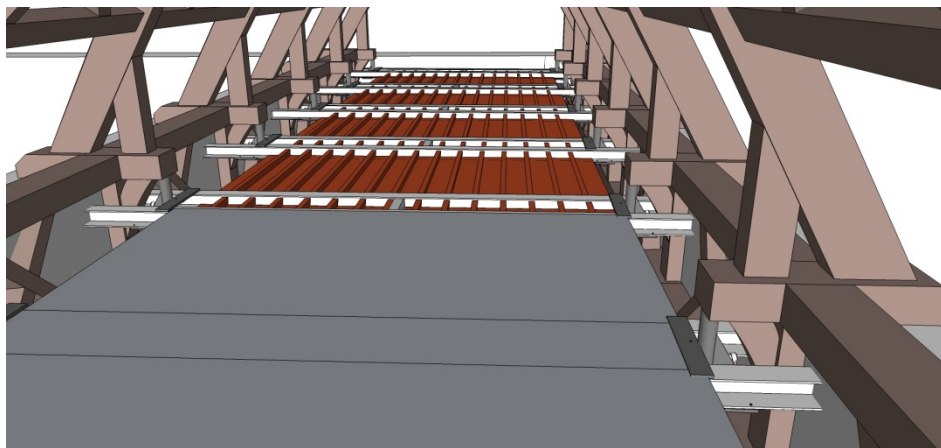


Figure 58: La dalle qui vient couvrir le coffrage et les poutres.

La liaison entre la dalle de la galerie et la dalle coulée au dernier niveau de l'escalier métallique de la tourelle est également modélisée pour éclaircir l'idée de deux dalles liaisonnées à un même niveau.

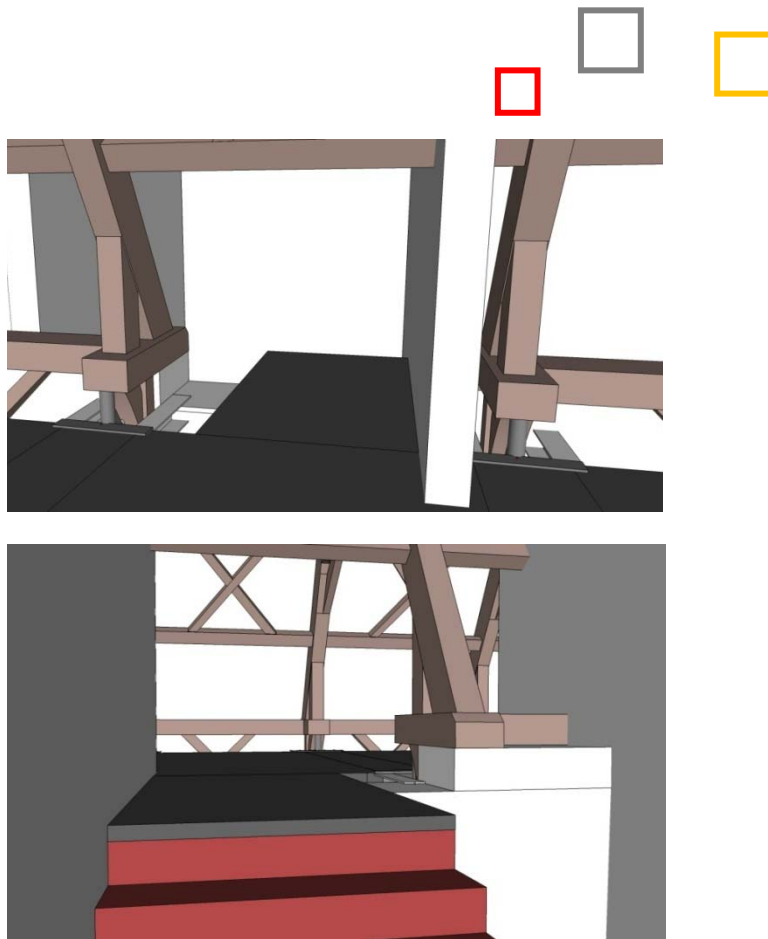


Figure 2 : Liaison entre les deux dalles.

Le résultat de la modélisation peut-il ne pas ressembler à la réalité?

La modélisation est faite sur base des plans d'exécution, normalement c'est une traduction plus ou moins conforme de la concrétisation réelle.

Cependant, la modélisation est toujours accompagnée d'erreurs, d'imprécision, d'appréciation et de simplifications, le but final d'un tel modèle est d'être essentiellement un outil de communication:

- Pour aider à collaborer au sein d'une équipe de projet sur un modèle commun de base.
- Pour représenter des idées de la meilleure façon.
- Pour une bonne compréhension de ces idées par toute l'équipe.
- Pour favoriser une discussion efficace entre les acteurs du projet autour des points significatifs du projet et imaginer de nouvelles idées ou solutions.

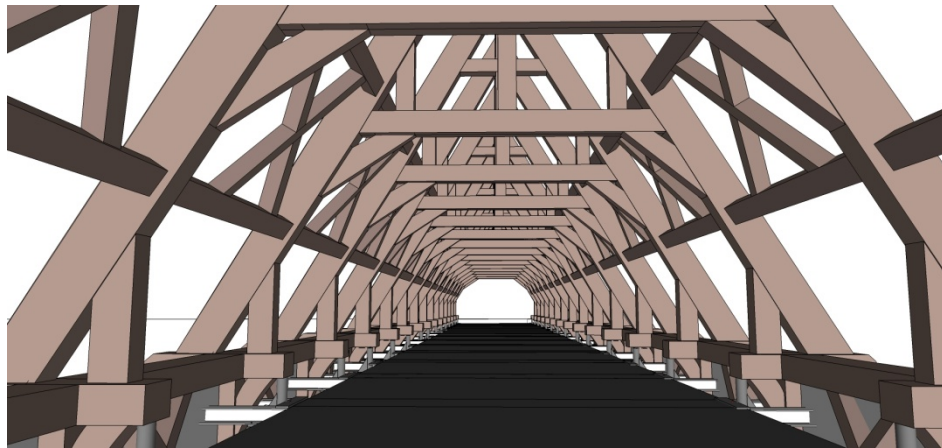
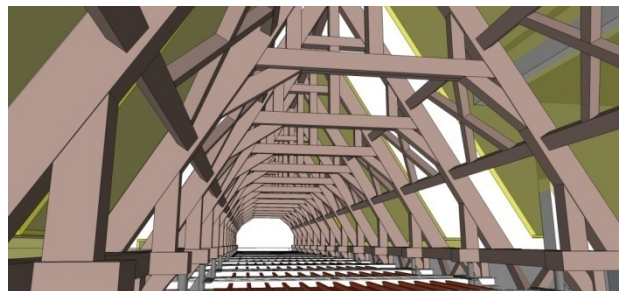


Figure 60 : Résultat de la modélisation structurelle 3D

En plus des éléments structurels, la réflexion sur le modèle 3D peut évidemment comprendre d'autres éléments.

Vu que la protection des intempéries est essentielle pour le montage de la structure en période hivernale en Belgique, nous nous intéressons à la visualisation des bâches de protection de la pluie. Nous savons que ces bâches sont souvent pensées au début du chantier, mais le fait de se poser des questions sur ces éléments, en phase de conception, peut éventuellement contribuer à améliorer les conditions de travail sur le chantier.

Nous pouvons, par exemple, prévoir une bâche par travée, pour faciliter la tâche de bâcher et de débâcher à chaque fois une ou plusieurs parties de la toiture: plus précisément, débâcher par travée où la dalle doit être coulée ou bien pour effectuer des travaux de restauration de la charpente à certains endroits.



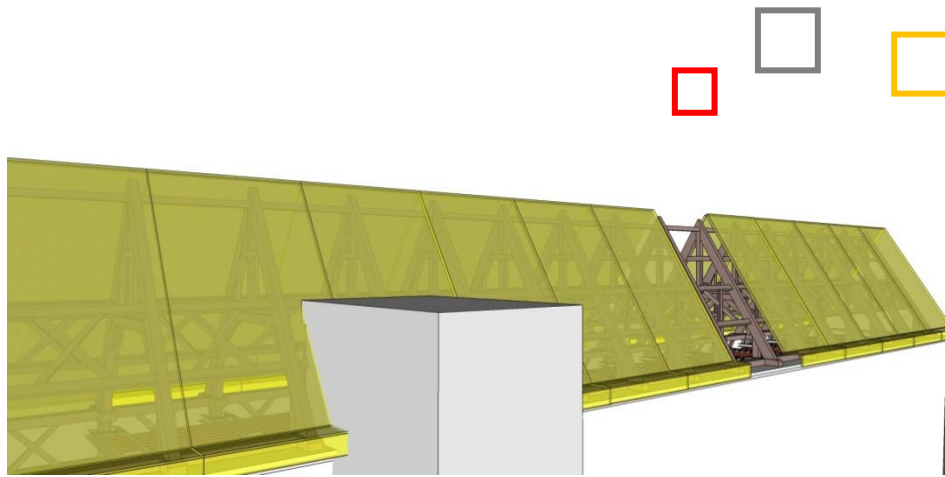


Figure 61: Les bâches par travée de structure.

Une autre proposition est une toiture provisoire qui vient couvrir tout l'espace de travail et qui déborde considérablement pour éviter les pluies latérales.

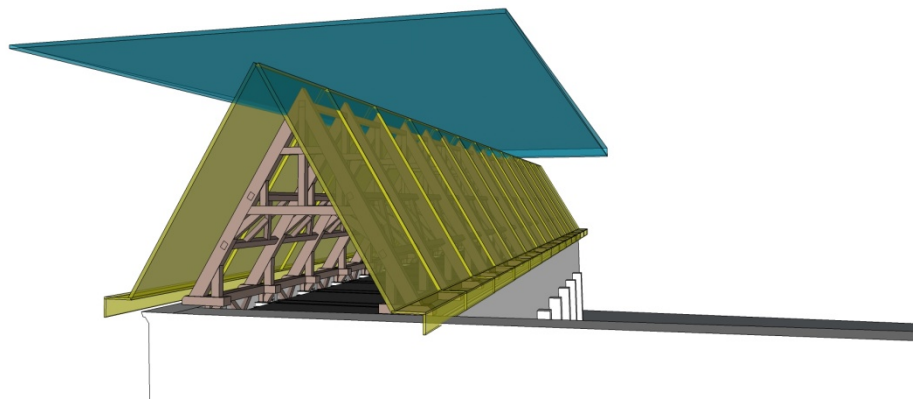


Figure 62: Idée d'une toiture couvrante l'espace de travail.

Pour concevoir une toiture pareille, de nombreuses contraintes s'opposent et le modèle 3D aide à les repérer:

- L'impossibilité de s'appuyer à l'existant vu que le bâtiment est classé historique.
- Une grande hauteur donc il faut une structure bien stable en plus d'être résistante au vent et aux intempéries.
- Des appuis au sol pas faciles à trouver vu l'étroitesse du site.



- Cette structure de protection est une toiture provisoire mais de grandes dimensions d'où la nécessité d'un matériau économique.
- Il faut également gérer la descente des eaux.

Cette toiture semble nécessiter une étude technique supplémentaire pour être correctement mise en place avant le chantier.

Le modèle 3D donne l'opportunité de tester plusieurs solutions en se posant les questions nécessaires en fonction du modèle, ainsi de faire ressortir les contraintes réelles mises en jeu. C'est un outil efficace pour guider la conception des solutions et des idées.

5.3.4. La simulation 4D

Les quatre premières familles de critères de constructibilité sont soutenues par le modèle 3D :

- Par une meilleure représentation et visualisation de la spatialité, le modèle aide à une meilleure collaboration architecturale et structurelle.
- Par une meilleure compréhension du dimensionnement de tous les éléments, il contribue à avoir une focalisation plus concrète sur les nœuds cruciaux du projet

Le modèle 3D ne suffit pas pour apporter un support aux deux dernières familles de critères qui sont l'étude du site et la planification de la construction. Par suite, en se basant sur le même modèle 3D établi, nous pouvons élaborer une 4D, cette dernière ajoute une dimension essentielle au modèle 3D qui est le temps.



Dans “Google SketchUp-4D Virtual Builder”, à chaque élément, une durée est affectée, elle correspond à la durée de la tâche de montage de cet élément sur chantier.

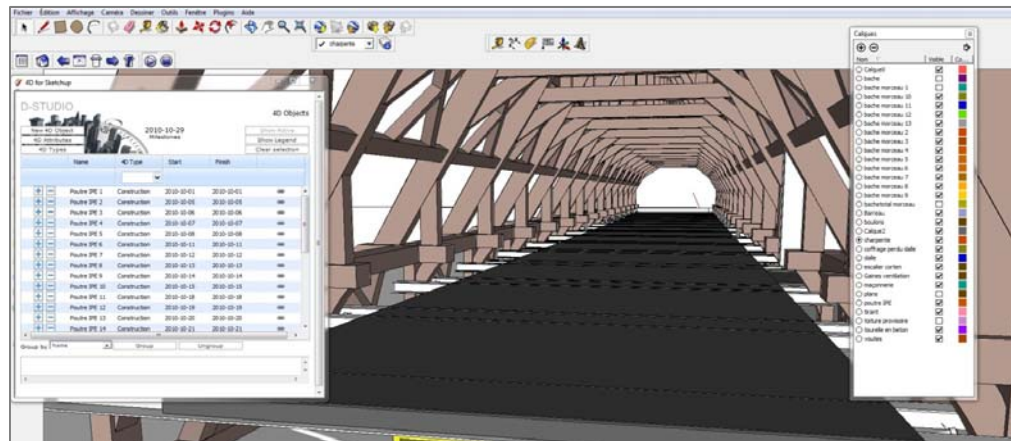


Figure 63: Aperçu de l'outil de travail, à gauche nous retrouvons le planning en plus du modèle 3D.

Dans le planning établi par l'entrepreneur, l'ordre de montage des éléments structurel sur le site se résume à ces quatre tâches :

- « Préparation pose charpente Acier.
- Pose charpente Acier + Réglage.
- Ragréage trous de charpente + Ferrailage.
- Bétonnage dalle. »

Nous n'avons aucune information précise sur l'ordre de montage des éléments que nous avons modélisés, pour rappel: Les poutres IPE, les profilés barreaux, les tirants, les coffrages perdus de la dalle, la dalle, la tourelle d'escalier en béton, l'escalier en acier corten de la tourelle.

Une logique de construction s'est créée en effectuant la modélisation 3D de ces éléments et en comprenant leurs emboîtements respectifs. Par suite l'ordre de construction est le suivant:



- Mise en place des poutres IPE et en parallèle le début de la construction de la tourelle d'escalier en béton.
- Mise en place des profilés de barreaux métalliques qui relient les poutres IPE aux entrails de la charpente.
- Mise en place des tirants.
- Mise en place des gaines de ventilation et de l'escalier corten dans la tourelle en béton.
- Mise en place des tôles de coffrages de la dalle.
- Coulage par travée de la dalle de béton de la galerie.
- Coulage de la dalle de l'escalier.

En s'inspirant du planning, nous avons attribué les durées suivantes :

Tâche	Durée (jours)
Poutres IPE	16
Barreaux	8
Tirants	7
Coffrage de la dalle	2
Gaines de ventilation	5
Tourelle en béton	35
Escalier en corten	5
Dalle de l'escalier	5
Dalle des combles	5

Nous reprenons par la suite les images de la simulation 4D, les éléments en rouge sont ceux « en cours de construction » et les images sont mises dans l'ordre de construction.



- **Première tâche : Mise en place des poutres IPE**

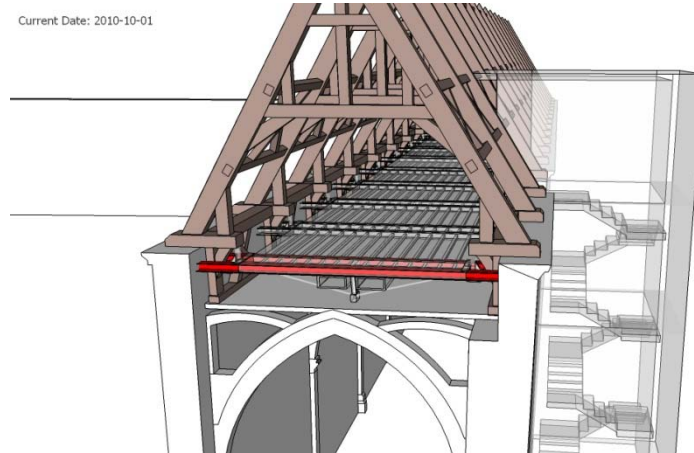


Figure 64 : Pose des deux premières poutres IPE.

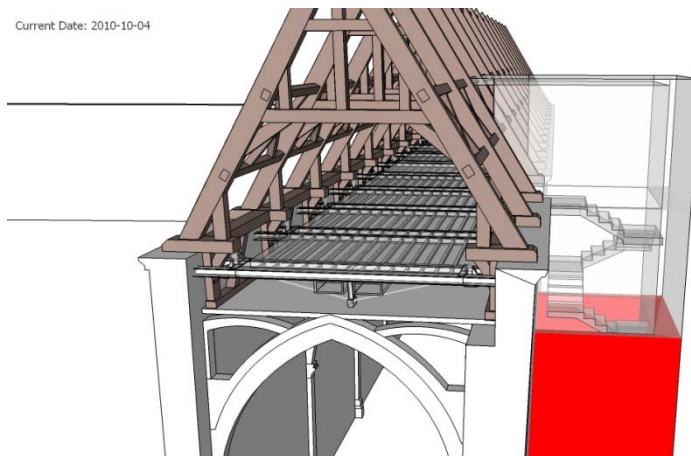


Figure 65 : Début de la construction de la tourelle en béton et achèvement de la pose de la première poutre IPE.

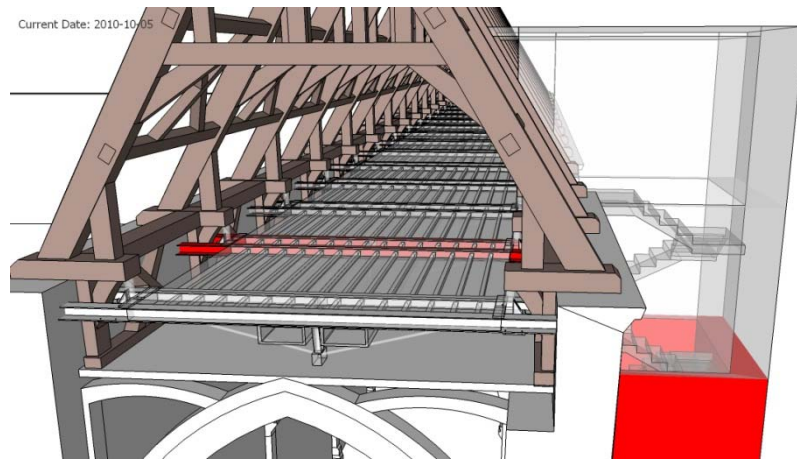


Figure 66 : Pose des deux autres profilés de poutres IPE

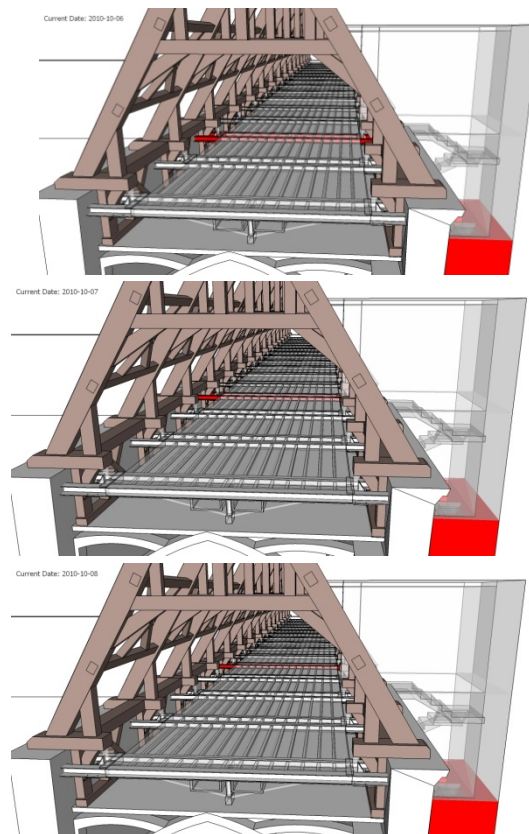


Figure 67 : Succession de la mise en place de toutes les poutres de façon répétitive.

La 4D permet ici de marquer l'enchaînement et la répétition de cette tâche (voir fig.67). Ces poutres sont fixées l'une après l'autre avec à chaque fois vérification du niveau et de l'horizontalité. Cet apport est important pour mieux visualiser la succession des tâches de construction et de se poser des questions sur le montage de ces poutres avant le début du chantier.



- Deuxième tâche : Mise en place des profilés barreaux.

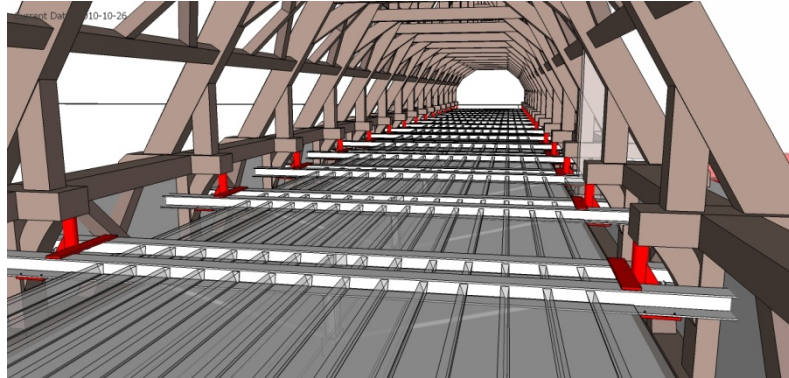


Figure 68 : Mise en place des profilés en barreaux.

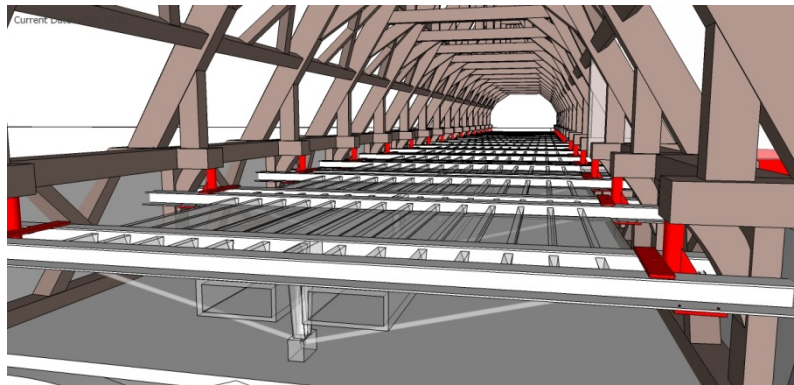


Figure 69 : En transparent sous les poutres, les tirants et les gaines de ventilation sont également visualisés mais non encore mis en place, idem pour les tôles de coffrage.

Une fois toutes les poutres IPE placées, tous les barreaux sont fixés à leurs places (fig.68). Ceux-ci sont ancrés, d'un côté, dans la charpente et de l'autre côté, des plats métalliques les liaisonnent avec les poutres IPE. Les plats métalliques viennent se boulonner sur les poutres IPE. Ce détail de jonction est répété pour chaque groupe de deux poutres à chaque fermette. La 4D permet de visualiser cette séquence temporelle : poutres placées – barreaux fixés. C'est un apport important par rapport aux plans d'exécution 2D et à le modèle 3D.



- **Troisième tâche : Mise en place des tirants.**

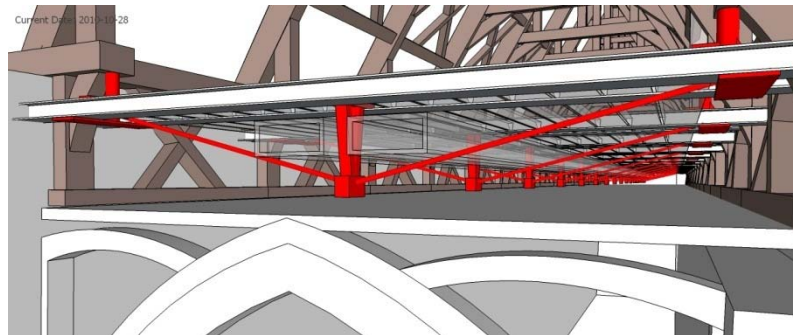


Figure 70 : Mise en place des tirants et leurs raccords aux barreaux.

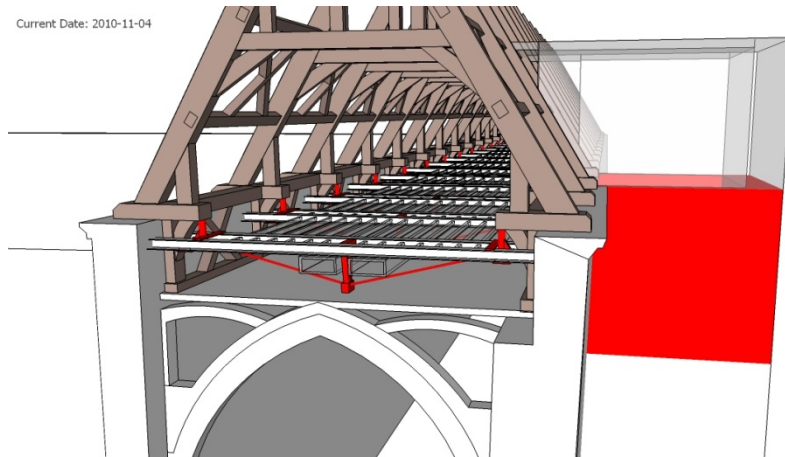


Figure 71: La construction de la tourelle en parallèle à la mise en place des tirants.

Les barreaux métalliques sont également liaisonnés aux tirants (fig.70), par suite, une fois les barreaux installés, nous procédons à fixer les tirants et à régler ce composant barreaux-tirants.

Parallèlement, la construction de la tourelle d'escalier en béton progresse aussi (fig.71).

La 4D permet de faire le lien visuellement entre la construction de deux parties indépendante du projet mais qui se construisent simultanément.



- Quatrième tâche : Mise en place des gaines de ventilation et de l'escalier corten dans la tourelle en béton.

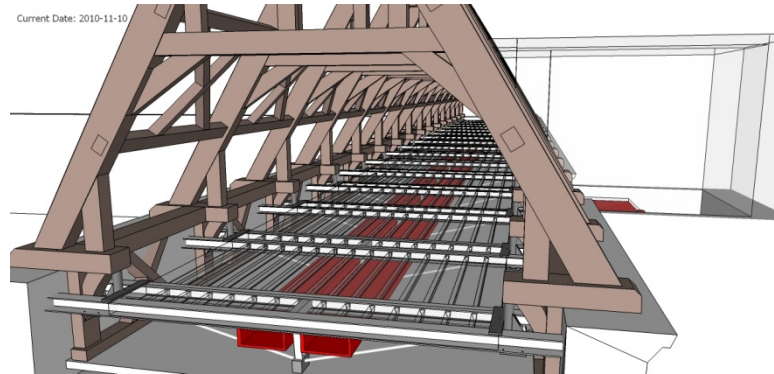


Figure 72 : Mise en place des gaines de ventilation.

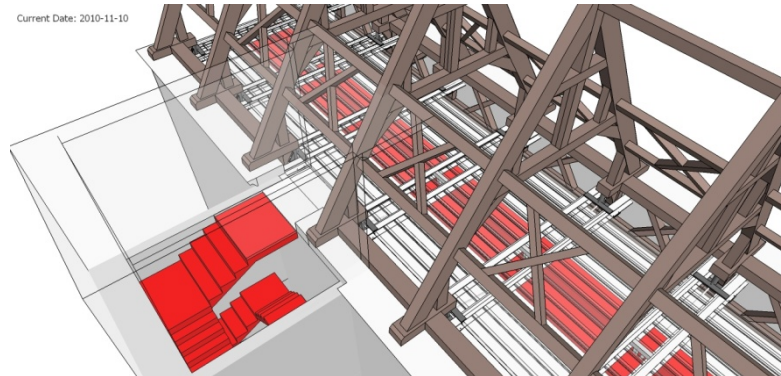


Figure 73 : La mise en place de l'escalier corten préfabriqué, en parallèle à celle des gaines de ventilation.

Une fois les tirants fixés, la charpente en acier accueille les gaines de ventilation (fig.72). Parallèlement à la mise en place des gaines, l'escalier préfabriqué vient se glisser dans la tourelle en béton (fig.73).

Encore une fois, la 4D a permis cette vue simultanée de deux constructions mises en parallèle.



- Cinquième tâche : Mise en place des tôles de coffrage de la dalle de la galerie et achèvement de la tourelle en béton.

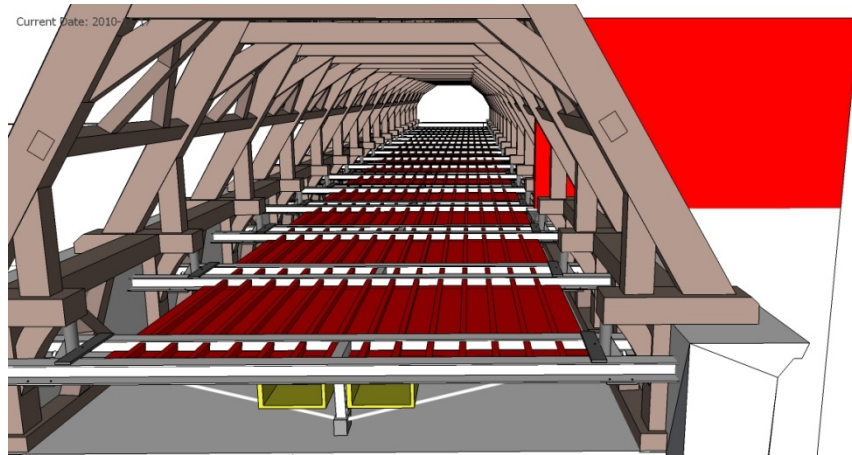


Figure 74 : Mise en place des tôles de coffrage perdu de la dalle et la construction en parallèle de la dernière partie de la tourelle d'escalier en béton.

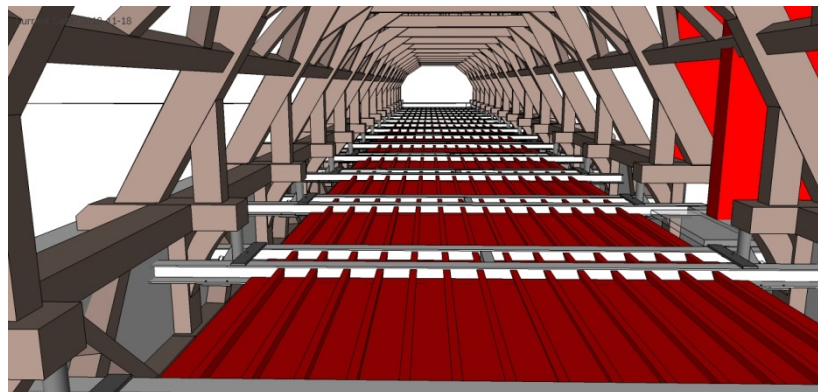


Figure 75: Fixation des tôles de coffrage de la dalle entre les poutres IPE.

Après les gaines, les tôles de coffrages viennent se fixer entre les poutres IPE (fig.75). Les gaines sont moins facilement accessibles une fois que les tôles sont placées d'où la succession de ces deux tâches dans le temps. En parallèle à la tâche de pose des tôles, la dernière partie de la tourelle d'escalier en béton se clôture également (fig.74). La 4D a éclairci sur le choix de la succession des tâches et sur la mise en parallèle d'autres.



- Sixième tâche : Coulage de la dalle par parties successives.

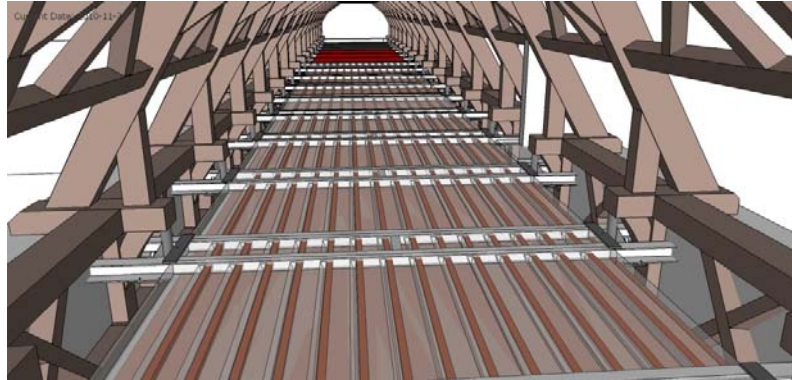


Figure 76 : Coulage de la première tranche de dalle correspondant aux trois premières travées. Une travée correspond à l'espace entre deux fermettes successives.

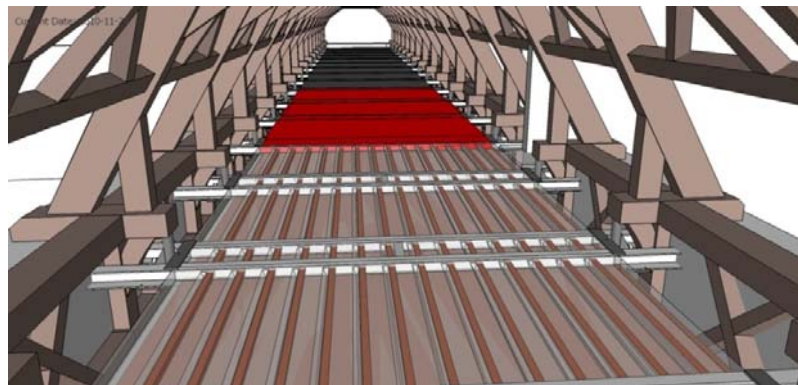


Figure 77: Coulages successives des quatre tranches restantes de la dalle.

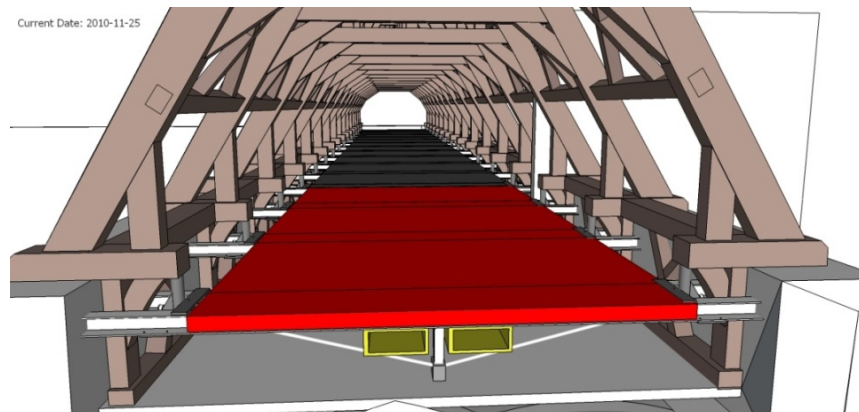


Figure 3 : Coulage de la dernière partie de la dalle formée des trois dernières travées.

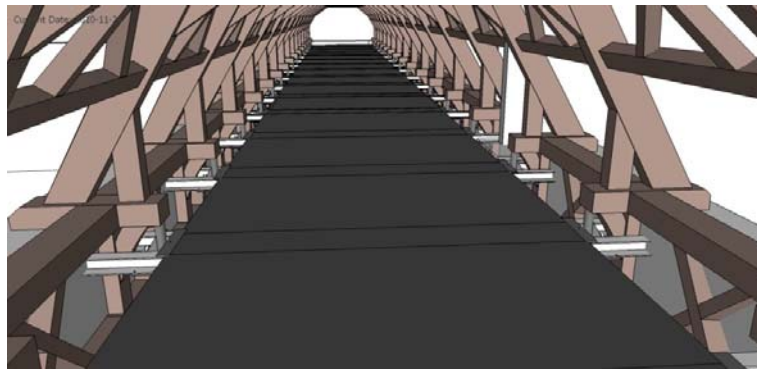


Figure 79: Fin du coulage de la dalle.

La dalle est coulée dans le coffrage et sur les poutres IPE. Dans la simulation, elle est coulée par tranche de trois travées de la charpente (fig.76 à 79).

La 4D montre l'avancement de la tâche et la répétition du même processus de coulage de la dalle par tranche. Elle pousse également à diverses réflexions : pourquoi ne pas avoir coulé la dalle d'une seule fois ? Pourquoi ne pas utiliser des dalles préfabriquées ? Finalement, ici, le choix de couler la dalle par tranche découle du fait qu'il y a une charpente existante. Pour couler une dalle il faut prévoir le passage d'un tuyau à travers cette charpente et chaque fois par travée de charpente tout au long de la galerie. De plus, si la charpente et l'intérieur sont protégés des intempéries par des bâches, raison de plus de travailler en tranche. Le travail s'effectue de la façon suivante: débâcher une partie, couler la dalle et bâcher de nouveau pour protéger la dalle et lui permettre de sécher, ainsi de suite pour toutes les parties.



- **Septième tâche : Coulage de la dalle de l'escalier.**

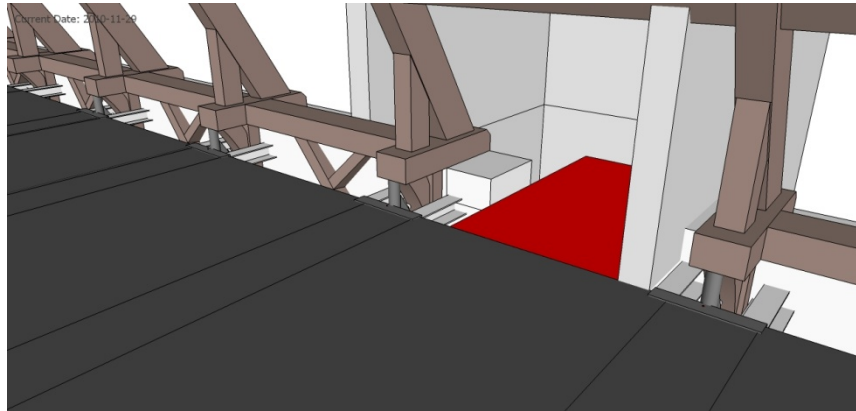


Figure 80 : Coulage de la dalle de l'escalier et raccord avec la dalle de la galerie.

La dalle de l'escalier est coulée après la dalle de la galerie (fig.80), elle est fixée au même niveau que celle-ci et elle y est rattachée également.

La 4D a pu mettre le point sur la succession du montage des grands éléments structurels, mais dans ce cas, elle a également aidé à montrer la construction d'un élément de plus petite échelle.

En effet, dans la 4D comme dans la 3D, nous choisissons le niveau de détail et les parties de construction que nous avons envie de voir se concrétiser et se construire sur l'écran

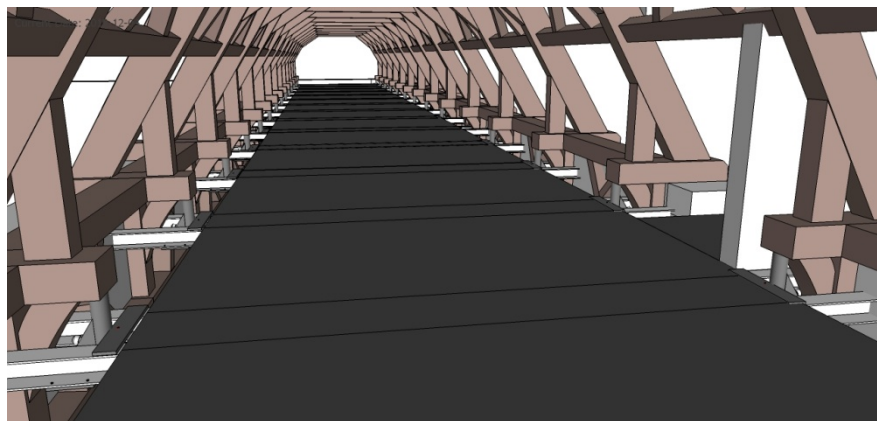


Figure 4 : Aspect final de la simulation.



5.4. Synthèse

Théoriquement afin d'atteindre une planification convenable de la construction, les documents 2D, la communication et la collaboration peuvent être combinés avec le principe 4D de CAO. Nous avons également essayé de tirer par la modélisation et la simulation du cas d'étude du projet de la cathédrale St-Paul, le réel apport de la 3D et de la 4D dans le cas de ce projet.

Finalement, le but est de montrer en quoi la 3D et la 4D viennent soutenir les familles de critères pour la vérification de la constructibilité de ce projet de bâtiment.

D'après l'analyse effectuée précédemment, nous résumons cet apport 3D|4D par les points suivants :

- Meilleure visualisation et représentation de la spatialité du projet.
- Meilleure interprétation des documents 2D.
- Meilleure compréhension visuelle des choix adoptés.
- Meilleure compréhension des dimensions et de l'encombrement des éléments.
- Possibilité de détection de problèmes et donc une meilleure prévention de la construction depuis la phase de conception.
- Meilleure compréhension de la logique de succession de la construction des éléments du projet.
- Focalisation sur un détail ou un aspect particulier du projet.
- Visualisation concrète de l'ordre de la construction et de la succession temporelle des tâches.
- Visualisation de l'aspect répétitif de montage.



- Visualisation en parallèle de l'avancement de plusieurs tâches sur le chantier.
- Aide à la recherche de nouvelles idées et solutions.

Nous reprenons le schéma des familles de critères, établi précédemment (voir partie 3.4 fig.15), pour le compléter avec l'apport de la 3D|4D.

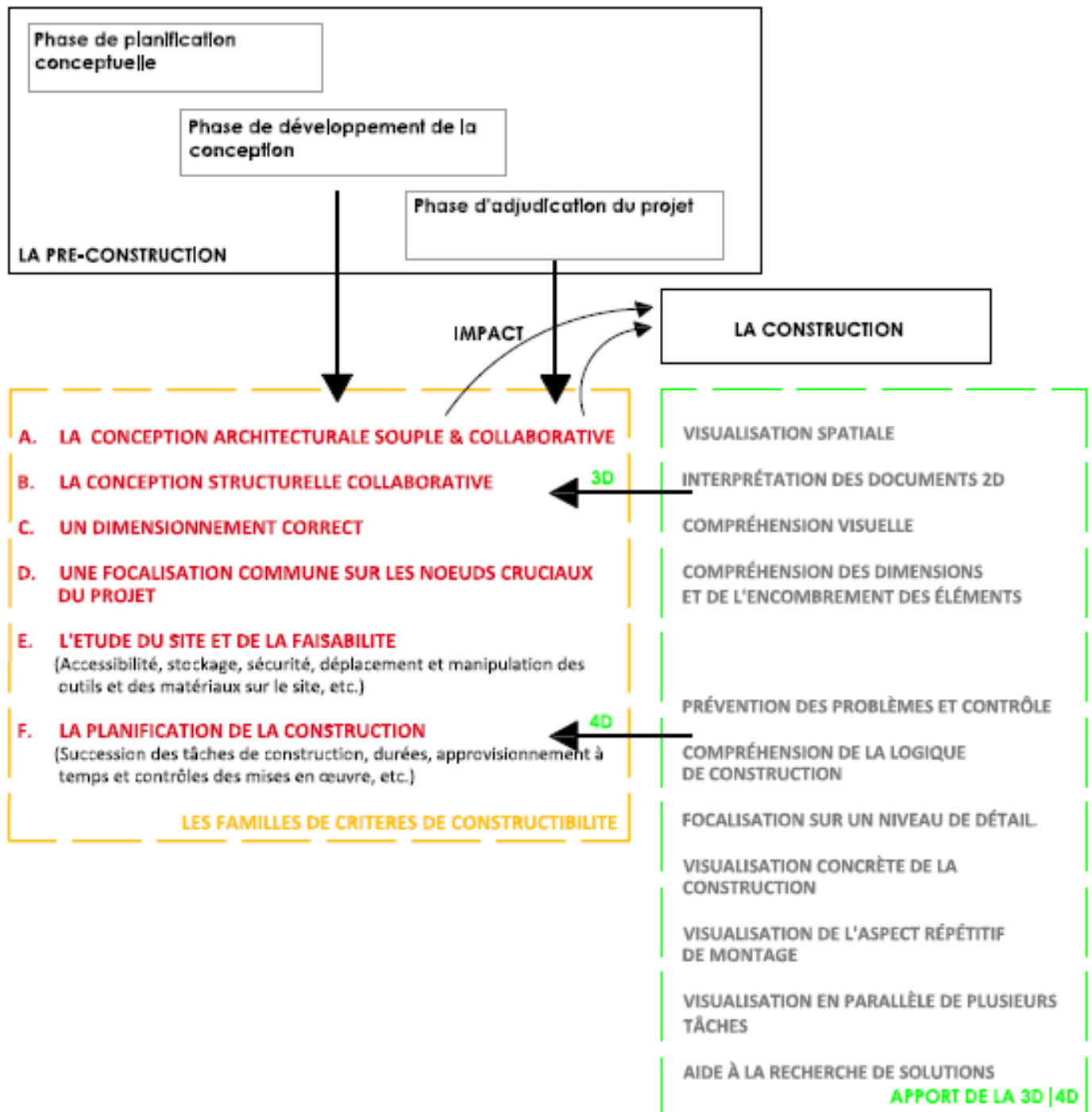


Figure 82 : Schéma global comprenant les familles de critères de la constructibilité et l'apport de la 3D | 4D, basé sur (Thabet, 2009).



CONCLUSION



6. Conclusion

Ce travail de fin d'étude a débuté avec une étude de collaboration au sein du projet du Centre Georges Pompidou, ensuite au sein des deux expérimentations du Studio Digital Collaboratif et du Défi bois 2010. Nous avons établi, dans chaque cas, la liste des critères qui ont aidé à l'aboutissement du projet au sein de chacune des équipes.

Ces listes de critères accompagnées par la littérature sur l'aboutissement et sur l'étude de constructibilité d'un projet de bâtiment, nous ont permis d'établir des familles de critères de constructibilité. Ces critères sont les suivants : Une conception architecturale souple et collaborative, une conception structurelle collaborative, un dimensionnement correct, une focalisation commune sur les nœuds cruciaux du projet, l'étude du site et de la faisabilité, et finalement la planification de la construction. Ces familles de critères dépendaient essentiellement de la nature du projet, des compétences des acteurs et de leurs points de vue.

Nous avons analysé le travail effectué dans le projet de restauration des combles de la cathédrale St-Paul à Liège, en se basant sur ces différentes familles de critères de constructibilité. Cette étude de constructibilité reprenait tous les points essentiels du travail effectué par les architectes, les ingénieurs et les entrepreneurs.

Pour l'analyse, nous nous sommes basés sur des documents 2D comme des plans d'exécution, un planning de construction, etc. D'après cette étude, nous avons constaté des difficultés de compréhension de certains documents 2D et nous avons remarqué également que la constructibilité du



projet est énormément influencée par la qualité de la représentation de l'information.

Pour cela, nous nous sommes orientés vers la simulation de la construction, pour expérimenter ce qu'un modèle 3D et 4D peut apporter de plus à l'étude de constructibilité.

Pour répondre à cette question, d'un côté, nous avons consulté la littérature sur ce sujet et d'un autre côté nous avons effectué une expérimentation sur l'étude de cas analysé.

Cette expérimentation consistait à modéliser le projet de la cathédrale St-Paul en utilisant l'outil Google SketchUp et à élaborer une simulation 4D en utilisant le plugin SketchUp 4D Virtual builder.

Le modèle 3D et la simulation résultante nous ont permis d'analyser les potentiels de ce genre de représentation dans l'étude de la constructibilité. Ces potentiels viennent soutenir les familles de critères, principalement pour assurer une meilleure visualisation et une meilleure compréhension du projet, ainsi qu'une meilleure compréhension de la logique de construction.

Finalement, une étude de constructibilité convenable repose sur un travail collaboratif de l'équipe et sur l'élaboration efficace des documents 2D combinés avec un modèle 3D et 4D de CAO.

Ce travail penche vers une méthode expérimentale d'analyse collaborative de la constructibilité dans un projet de bâtiment. Comment améliorer et



adapter les critères de constructibilité selon la nature des projets ? Est-ce que ces critères ne peuvent pas être mieux définis ?

Nous seulement, il faut se poser la question sur la définition de ces critères mais également sur la définition des outils à utiliser. Comment créer un outil qui servira comme modèle collaboratif pour tous les acteurs? Et pourquoi ne pas intégrer les critères de constructibilité dans un outil 4D, pour élaborer une automatisation de ces derniers ?



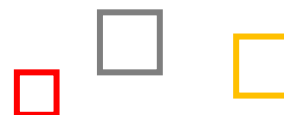


Table des illustrations

Figure 1 : Le schéma classique de développement d'un projet (HAUGLUSTAINE, 2007)	15
Figure 2 : Centre Georges-Pompidou à Paris (Insecula)	17
Figure 3 : Deux sections montrant les relations entre la poutre, la gerberette et le poteau.	20
Figure 4 : « Plan, coupe longitudinale et coupe transversale de la gerberette, montrant les différentes sections. » (Rice, 1990)	22
Figure 5 : « Gerberettes moulées dans la fonderie » (Rice, 1990)	24
Figure 6 : « Vue des gerberettes » (Rice, 1990)	24
Figure 7 : « Traitement de l'acier par échauffement »	25
Figure 8 : Schéma radar - Comparaison relative de la contribution de l'architecte et de l'ingénieur dans les différents aspects de la constructibilité, pour l'exemple du Centre Georges-Pompidou.	29
Figure 9 : Le résultat de la collaboration : Réflexions dans divers domaines ; architecture, structure, HQE, accessibilité, ambiances, etc.....	33
Figure 10 : Inspiration, idée et exécution.....	36
Figure 11 : Schéma visualisant les contributions relatives des architectes et des ingénieurs architectes dans les différentes tâches principales effectuées pour le développement collaboratif du projet.	38
Figure 12 : Schéma visualisant les contributions relatives des ingénieurs et des ingénieurs architectes dans les différentes étapes effectuées pour la conception et l'exécution du projet.....	40
Figure 13 : Graphique « reflétant l'influence des efforts en matière de constructibilité sur le coût, dans les différentes phases du projet. » (Edward & P.E., 1994).....	47
Figure 14 : Les phases de construction d'un projet, traduit de (Thabet, 2009).....	51
Figure 15 : Les familles de critères de constructibilité, basée sur le schéma de (Thabet, 2009).....	56
Figure 16 : Résumé des éléments validant les familles de critères de constructibilité, dans le projet du Centre Georges Pompidou et dans les deux expérimentations.	57
Figure 17 : Cathédrale Saint-Paul Liège (Janssen, 2009).....	59
Figure 18 : Localisation de l'aile Ouest (Janssen, 2009).....	60
Figure 19 : Plan correspondant aux ailes du cloître, en rouge l'aile Ouest (Janssen, 2009).....	61



Figure 20 : Le dévers observé du mur de la galerie Ouest.....	62
Figure 21 : Etat des combles après nettoyage et avant toute restauration	64
Figure 22 : La stabilisation par la dalle en béton sous tendue et la tourelle d'escalier de secours comme contrefort de la muraille. (Janssen, 2009)	67
Figure 23 : (Janssen, 2009) L'intérieur de la tourelle d'escalier raffinement éclairé reflétant une recherche structurelle accompagnée d'une créativité spatiale.	68
Figure 24 : La dalle (Janssen, 2009)	69
Figure 25 : Un exemple de relevé, pour une travée, du bas de la structure verticale de la charpente. (Plans-d'exécution, 2007).....	72
Figure 26 : Nouveaux profilés métalliques ancrés dans la maçonnerie (Plans-d'exécution, 2007)	73
Figure 27 : Vue en plan des travées formées par les nouveaux profilés (Plans-d'exécution, 2007)	73
Figure 28 : Le profilé barreau reliant le plancher à la charpente.	74
Figure 29 : La liaison du plancher aux entrants coupés.....	75
Figure 30 : Détail de liaison entre le nouveau plancher et la charpente existante. (Plans-d'exécution, 2007).....	75
Figure 31 : Les profilés tirants raccordés à un profilé tubulaire	76
Figure 32 : La dalle coulée sur les tôles de coffrage avec les IPE visibles en partie. (Plans-d'exécution, 2007).....	76
Figure 33 : Système structurel du plancher des combles restaurés.....	77
Figure 34 : La tourelle d'escalier en béton armé. (Janssen, 2009)	78
Figure 35 : Vue en plan de la tourelle d'escalier (Plans-d'exécution, 2007)	78
Figure 36 : Détail de la connexion de la dalle de la galerie avec la dalle de l'escalier. (Plans-d'exécution, 2007)	79
Figure 37 : Des équipements techniques intégrés.	80
Figure 38 : Vue de la toiture.....	81
Figure 39 : Les voûtes restaurées	81
Figure 40 : L'articulation sud ouest et la précision des travaux nécessaires. (Plans-d'exécution, 2007)	82
Figure 41 : Le tunnel entre les ailes sud ouest	82
Figure 42 : Implantation de la cathédrale st Paul à Liège (Google Earth)	86
Figure 43 : Vue de l'intérieur des combles au début du chantier et la nécessité de faire de cet espace, un espace de travail avec des planches posées pour ne pas surcharger les voûtes et l'éclairage artificiel nécessaire. (Janssen, 2009)	90



Figure 44 : La pose de l'escalier de secours en acier corten.	91
Figure 45 : Schéma avec l'évaluation des critères de constructibilité. .	93
Figure 47 : Le processus de conception construction virtuelle (Thabet, 2009)	97
Figure 48 : Un exemple de simulation 4D «Generated 4D Simulation Sequence in the Testing"(Zhou, Heesom, Georgakis, Nwagboso, & Feng, 2009)	106
Figure 49 : Vue 3D de la charpente et maçonnerie existante.....	112
Figure 50 : Les poutres IPE fixés dans la maçonnerie.....	112
Figure 51 : Les barreaux métalliques qui relient les poutres IPE à la charpente.....	113
Figure 52 : Raccord du barreau au tirant.....	113
Figure 53 : Vues des tirants.....	114
Figure 54 : Gaines de ventilation glissées entre les tirants et les poutres du plancher.....	115
Figure 55 : L'agencement dans l'espace des poutres, des barreaux, des tirants, du coffrage de la dalle et des gaines de ventilation.	115
Figure 56 : Détection : Le tirant transperce les tôles de coffrage perdu de la dalle.....	115
Figure 57 : Les tôles de coffrage de la dalle fixées entre les poutres IPE.	116
Figure 58 : La dalle qui vient couvrir le coffrage et les poutres.....	116
Figure 59 : Liaison entre les deux dalles.....	117
Figure 60 : Résultat de la modélisation structurelle 3D	118
Figure 61: Les bâches par travée de structure.....	119
Figure 62 : Idée d'une toiture couvrante l'espace de travail.	119
Figure 63 : Aperçu de l'outil de travail, à gauche nous retrouvons le planning en plus du modèle 3D.....	121
Figure 64 : Pose des deux premières poutres IPE.....	123
Figure 65 : Début de la construction de la tourelle en béton et achèvement de la pose de la première poutre IPE.	123
Figure 66 : Pose des deux autres profilés de poutres IPE.....	124
Figure 67 : Succession de la mise en place de toutes les poutres de façon répétitive.	124
Figure 68 : Mise en place des profilés en barreaux.	125
Figure 69 : En transparent sous les poutres, les tirants et les gaines de ventilation sont également visualisés mais non encore mis en place, idem pour les tôles de coffrage.....	125
Figure 70 : Mise en place des tirants et leurs raccords aux barreaux. .	126
Figure 71: La construction de la tourelle en parallèle à la mise en place des tirants.....	126



Figure 72 : Mise en place des gaines de ventilation.	127
Figure 73 : La mise en place de l'escalier corten préfabriqué, en parallèle à celle des gaines de ventilation.....	127
Figure 74 : Mise en place des tôles de coffrage perdu de la dalle et la construction en parallèle de la dernière partie de la tourelle d'escalier en béton.	128
Figure 75 : Fixation des tôles de coffrage de la dalle entre les poutres IPE.	128
Figure 76 : Coulage de la première tranche de dalle correspondant aux trois premières travées. Une travée correspond à l'espace entre deux fermettes successives.	129
Figure 77 : Coulages successives des quatre tranches restantes de la dalle.....	129
Figure 78 : Coulage de la dernière partie de la dalle formée des trois dernières travées.	130
Figure 79 : Fin du coulage de la dalle.	130
Figure 80 : Coulage de la dalle de l'escalier et raccord avec la dalle de la galerie.....	131
Figure 81 : Aspect final de la simulation.....	132
Figure 82 : Schéma global comprenant les familles de critères de la constructibilité et l'apport de la 3D 4D, basé sur (Thabet, 2009).	134



Bibliographie

Aouad, G., Lee, A., & Wu, S. (2005). FROM 3D TO nD MODELLING.

Bastin, V., Janssen, T., Matagne, D., & Derwa, G. *Exposé " Le centre Georges Pompidou"*.

Boton, C., Kubicki, S., & Halin, G. (2010). COLLABORATIVE CONSTRUCTION PLANNING: TOWARDS 4D VISUALIZATIONS ADAPTED TO PRACTITIONERS REQUIREMENTS.

Boudon, P. (1994). *Enseigner la conception architecturale : cours d'architecturologie*. Paris: Ed. de la villette.

Edward, D. W., & P.E. (1994). *CONSTRUCTABILITY GUIDE*. OBrien-Kreitzberg Assoc Inc.

Fischer, M. (2009). 4D CAD Modeling: Visual Intelligence for Construction Management.

Gaff, H. (2007). *Qu'est-ce qu'une oeuvre architecturale?* Paris: Chemins philosophiques.

Hanrot, S. (2010). Une évaluation de la qualité architecturale relative aux points de vue des acteurs. *Cahiers Ramau5 La qualité architecturale. Acteurs et enjeux*, 111.

Hanser, D. (2003, octobre 31). Proposition d'un modèle d'auto coordination en situation de conception, application au domaine du bâtiment. Ecole d'Architecture de Nancy.

HANSER, D. (2003). *Proposition d'un modèle d'auto coordination en situation de conception, application au domaine du bâtiment*.

HAUGLUSTAIN, D.-M. (2007). Cahier des charges : principes de rédaction et clauses techniques. *Cours de "Gestion de projets"*.

Hendrickson, C. (1998). Project Management for Construction, Department of Civil and Environmental. Dans C. M. University (Éd.). Pittsburgh.

Janssen, A.-M. (2009). *Liège * Cathédrale Saint- Paul * restauration des combles des galeries Ouest et Sud du cloître*.

Kessels, P. (2008, juin 23). Structure et Rationalité. Université de Liège.



Khosrowshahi, F., & Howes, R. (2005). *A FRAMEWORK FOR STRATEGIC DECISION-MAKING BASED ON A HYBRID DECISION SUPPORT TOOLS*. G. Aouad, A. Lee and S. Wu.

Ku, K., Pollalis, S., Fischer, M., & Shelden, D. (2008). *3D MODEL-BASED COLLABORATION IN DESIGN DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF COMPLEX SHAPED BUILDINGS*.

Kvan, T. (2000). Collaborative design: what is it? *Automation in Construction* 9. , 409–415.

Leicht, R., & Messner, M. (2008). *MOVING TOWARD AN 'INTELLIGENT' SHOP MODELING PROCESS*.

Lucan, J. (2009). *Composition, non-composition, Architecture et théories, XIXe -XXe siècles*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.

Phair, M. (2000, March 6). Software Model Builders Add An Extra Dimension To 3D CAD. *ENR* .

Plans-d'exécution. (2007). *Extension du trésor de la Cathédrale de Liège*.

Réunion n° 01 du 08/01/2008. EXTENSION DU TRÉSOR DE LA CATHEDRALE DE LIEGE.

Réunion n° 02 du 16/01/2008. EXTENSION DU TRÉSOR DE LA CATHEDRALE DE LIEGE.

Rice, P. (1990). *Mémoires d'un ingénieur*. LE MONITEUR.

Salvadori, M. (1980). *Comment ça tient ? Parenthèses*.

Scaletsky, C. C. (2003). *Rôle des références dans la conception initiale en architecture :Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture – le système « kaléidoscope » –*.

Scaletsky, C. C. (2003, octobre 17). Rôle des références dans la conception initiale en architecture: Contribution au développement d'un Système Ouvert de Références au Projet d'Architecture- le système " Kaléidoscope". Ecole d'Architecture de Nancy.

Shelden, D. R. (2002). *Digital Surface Representation and the Constructibility of Gehry's Architecture*.

Terrin, J.-J. (2009). *Conception collaborative pour innover en architecture: Processus, méthodes, outils*. Paris: L'Harmattan Sciences Humaines et Sociales.

Thabet, W. (2009). Design/Construction Integration thru Virtual Construction for Improved Constructability. *Virginia Tech* .



Torroja, E. (1971). *Les structures architecturales- Leur conception - Leur réalisation*. Eyrolles.

Turk. (1994). Document centered approach to design process modeling.

Zevi, B. (1959). *Apprendre à voir l'architecture*. Les éditions de minuit.

Zhou, W., Heesom, D., Georgakis, P., Nwagboso, C., & Feng, A. (2009). AN INTERACTIVE APPROACH TO COLLABORATIVE 4D. *Journal of Information Technology in Construction* .

Les Sites

http://www.oregon.gov/ODOT/HWY/ENGSERVICES/docs/const_reviews/PRE-CONSTRUCTION_REVIEW_PROCESS.pdf?ga=t

http://www.google.be/imgres?imgurl=http://fuiyama.crai.archi.fr:16080/~sdc/SDC_Equipes_files/shapeimage_22.png&imgrefurl=http://fuiyama.crai.archi.fr:16080/~sdc/SDC_Equipes.html&usg=__XG8UyDETwZ3-gmzYdGWfZFK8Ork=&h=77&w=77&sz=7&hl=fr&start=6&um=1&itbs=1&tbnid=Sc5ca8Lyelmu3M:&tbnh=72&tbnw=72&prev=/images%3Fq%3Djohn%2Bschraven%26um%3D1%26hl%3Dfr%26client%3Dfirefox-a%26hs%3Db6Z%26rls%3Dorg.mozilla:fr:official%26tbs%3Disch:1

http://www.defisbois.fr/Site_2010/Accueil.html

<http://www.4dvirtualbuilder.com/>

<http://www.lawperationnel.com/EncyclopedieJur/constructibilite.html>

<http://en.wikipedia.org/wiki/Constructibility>

<http://www.lawperationnel.com/EncyclopedieJur/constructibilite.html>

<http://recherche.estp.fr/>

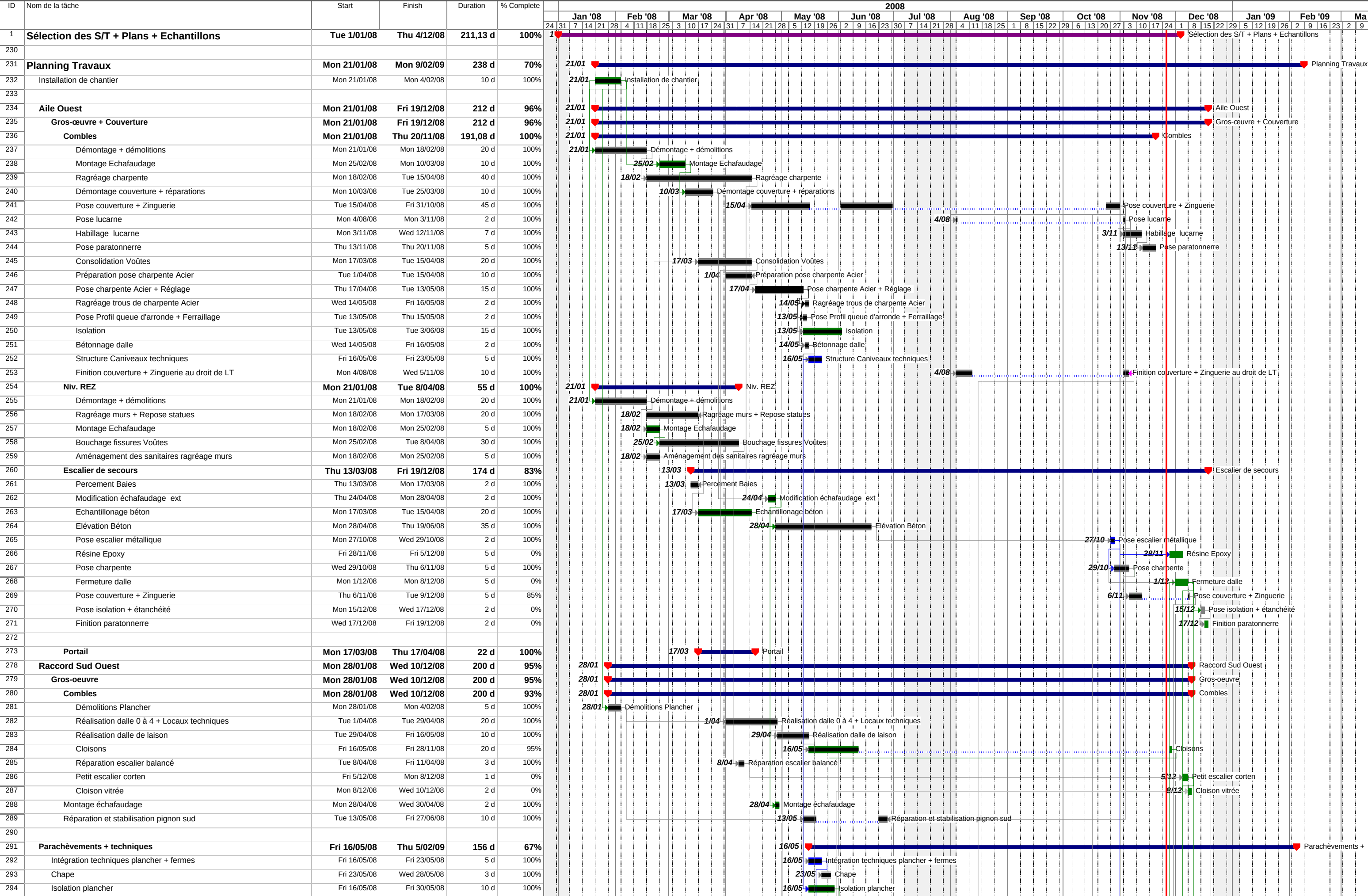
<http://pmbook.ce.cmu.edu/>

<http://www.commentcamarche.net/contents/projet/phase-realisation.php3>

<http://sketchup.google.com/>



EXTENSION TRESOR DE LA CATHEDRALE DE LIEGE
Planning Travaux - Suivi au 25 11 2008



EXTENSION TRESOR DE LA CATHEDRALE DE LIEGE
Planning Travaux - Suivi au 25 11 2008

[illegible]

Relation entre la conception architecturale et la conception structurelle. Vers une méthode d'analyse collaborative de la constructibilité dans un projet de bâtiment.

Ce travail de fin d'étude a pour but d'estimer si un projet peut être considéré comme constructible. En première partie, le travail aborde la notion de collaboration au sein d'une équipe de projet composée de différents acteurs. Il traite plus précisément le projet du Centre Georges Pompidou et deux expérimentations de plus petites échelles. Une liste de familles de constructibilité est élaborée, en partie, grâce à l'analyse de la collaboration dans le projet et dans les deux expérimentations et grâce aux études de constructibilité déjà existantes.

Ces familles de critères de constructibilité sont utilisées pour analyser la constructibilité d'un projet de restauration des combles de la cathédrale Saint-Paul à Liège. Cette analyse est complétée par l'utilisation d'un outil informatique Google SketchUp pour effectuer un modèle 3D composé des éléments structurels de cette intervention, et par l'utilisation du Plugin SketchUp 4D Virtual Builder pour l'élaboration d'une simulation de la construction. Les potentiels de la 3D et de la 4D sont mis en valeur dans ce cas d'étude. Ils fournissent un apport supplémentaire en matière de représentation, de communication, de discussion et de compréhension du projet. Ils viennent finalement soutenir cette approche *de méthode d'analyse collaborative de la constructibilité*.

Anabelle RAHHAL

Deuxième année du master en Ingénieur Civil Architecte.

Année Académique 2009 – 2010.