NOM : JALARD

Prénom : Arnaud

Qualité : *Elève Ingénieur, promotion 2005*

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

PROJET DE FIN D'ETUDES

RECONSTITUTION D'UNE TOUR MILITAIRE EN BOIS DE L'EPOQUE ROMAINE EN VUE DE L'ACCUEIL DE VISITEURS.

Organismes d'accueil : la SARL Kléber ROSSILLON et le cabinet d'architecte B+M Architecture._____

_____

Composition du jury :

- ☐ Le président : Bernard VAUDEVILLE
- ☐ Le directeur de projet : Kléber ROSSILLON
- ☐ Les conseillers scientifiques : Robert LE ROY et Sébastien MEMET

Confidentialité : _____

Résumé

Ce projet de fin d'étude a pour objet la reconstitution d'une tour romaine construite par Jules César pendant la guerre des Gaules en –51 avant J-C. Cette tour avait été construite lors du siège d'Uxellodunum, au Puy d'Issolud dans le Lot. Dans la perspective d'un accueil du public (jusqu'à 300 visiteurs simultanément), il propose une conception de la tour et de sa fondation à partir de recherches historiques et archéologiques, ainsi qu'à partir d'un travail architectural et technique pour le dimensionnement de la structure à partir de la réglementation moderne pour les établissements recevant du public, et à partir des normes européennes eurocode, notamment la norme EN 1995 qui concerne la construction en bois.

mots clés

Archéologie et histoire
Construction en bois
Eurocodes
Assemblages
Charpente

Sommaire :

Introduction ____ ***4***

1. Le déroulement de la bataille et les recherches archéologiques ____ ***6***

2. Conception de l'ouvrage romain ____ ***10***

2-1. Plate-forme et fondation ____ **10**

2-2. Reconstitution de la tour ____ **12**

La structure proposée par Napoléon III ____ 12

Vers une structure modulaire ____ 13

Conception d'un module ____ 14

Adaptations au programme actuel et à la législation ____ 19

2.3. Les assemblages ____ **27**

les assemblages romains ____ 27

Les assemblages de la reconstitution de l'archéodrome de Beaune. ____ 28

Les assemblages de la reconstitution ____ 32

2.4 Les finitions ____ **32**

La façade ____ 32

L'occupation du dernier étage de la tour ____ *32*

Le toit ____ 33

3. Dimensionnement et note de calcul ____ ***42***

3.1 Modélisation ____ **42**

3.2 Sollicitations ____ **43**

3.3 Calcul à l'état limite ultime ELU ____ **44**

Etude des efforts et contraintes dans les barres ____ 45

Etude de stabilité de la tour ____ 51

Etude des assemblages ____ 52

3.4 Calcul à l'état limite de service ELS ____ **58**

glissement des assemblages ____ 58

calcul des flèches des poutres. ____ 58

3.5 Calcul de résistance au feu ____ **59**

3.6 Calcul des fondations ____ **61**

Capacité résistante de la fondation ____ **61**

Conclusion ____ ***64***

Bibliographie ____ 65

Annexe : Vérification et calcul des assemblages : ____ ***67***

Introduction

De Vercingétorix à Pierre et Marie Curie, du Mont Saint Michel au palais du Louvre, l'histoire de France est riche en personnages et en patrimoine d'une grande notoriété. Mais à côté de ces exemples les plus prestigieux, il existe aussi un patrimoine moins connu mais tout aussi riche, plus proche des gens, dans nos régions. Ces trésors sont en danger et peuvent disparaître tant qu'ils restent dans l'oubli, alors qu'il suffit souvent de les valoriser simplement pour qu'ils touchent l'intérêt d'un public demandeur et curieux d'histoires et de patrimoine.
Face à cette situation, Kléber Rossillon ancien ingénieur en aéronautique, a créé une société de mise en valeur et de gestion de monuments historiques, et est à l'origine de remarquables réalisations dans le sud ouest de la France: la restauration des jardins historiques de Marqueyssac et du château de Commarques, la création du musée de la guerre du Moyen-âge au château de Castelnau.

Toujours à l'affût de nouveaux projets, M. Rossillon est intéressé par la mise en valeur d'un épisode méconnu de l'histoire : le siège d'Uxellodunum, dernier foyer de résistance gaulois à la fin de la Guerre des Gaules. L'objet de cette étude est de déterminer dans quelle mesure une reconstitution de la bataille est possible, notamment dans la perspective de l'accueil du public dans une tour en bois de plus de 20 mètres de haut.

Les problématiques du projet sont multiples. En effet, la première question est de déterminer le déroulement de la bataille, les forces en présence, l'implantation de la tour au cœur du site. Pour cela, j'ai bénéficié de l'aide de M. Jean-Pierre Girault, archéologue qui travaille sur le site depuis une dizaine d'années. La question suivante est la conception de la tour proprement dite, à l'appui d'une recherche bibliographique, pour déterminer quelles étaient la structure et la dimension de la tour de la bataille. Aucune image, aucune gravure de la tour n'a été réalisée à l'époque, et les sources, même écrites ne sont pas légion. C'est pourquoi la conception de la tour relève d'une certaine part d'interprétation et de logique, plus que d'une exactitude historique scrupuleuse. Mais en voulant faire confirmer mes hypothèses par des archéologues, dont Mme Josiane David ou M. Jean Mesqui, ils m'ont répondu que effectivement personne n'était en mesure de savoir exactement comment la tour avait été construite, l'essentiel étant de proposer une conception crédible. Une fois qu'on en tient une, il faut avancer et continuer l'étude. La suite de l'étude, c'est d'adapter la tour à l'accueil du public. En effet, le cahier des charges du concepteur de la tour à l'époque romaine n'est pas celui du concepteur de la reconstitution qui veut accueillir du public sur sa tour. Les exigences de sécurité et de durabilité sont différentes et conduiront à des adaptations, tout en restant le plus près possible de l'idée qu'on se fait de la tour de l'époque. J'ai pu bénéficier à cet effet des conseils et de la documentation des architectes du cabinet B+M architecture pour répondre aux problématiques de l'accueil du public. Enfin, la dernière partie de l'étude réalisée avec l'aide de M. Robert Le Roy (chercheur à l'ENPC) correspond au dimensionnement de la structure et à l'étude des assemblages, les calculs étant réalisés selon les eurocodes.

Avant de poursuivre, je tiens d'abord à remercier Kléber ROSSILLON qui m'a donné l'opportunité de faire cette étude. Un grand merci aussi à Jean-Pierre GIRAULT pour son accueil lors de la visite du Puy d'Issolud, pour les renseignements archéologiques qu'il m'a donnés et les données précieuses qu'il m'a transmises. Je voudrais aussi remercier particulièrement le cabinet B+M Architecture qui m'a accueilli pendant le projet, Sébastien MEMET et Grégoire BIGNER pour leurs conseils, sans oublier Paul BAROIN pour son aide inestimable pendant la réalisation des images de la tour et du film. Et un grand merci enfin à

Robert LE ROY pour sa disponibilité et pour m'avoir débloqué plus d'une fois pendant la phase de dimensionnement en deuxième partie du projet. Vous tous m'avez permis d'aborder cette étude sous des angles très variés pour que celle ci soit au final la plus complète possible, et je vous en remercie.

1. Le déroulement de la bataille et les recherches archéologiques

« En –51 avant J-C, toute la Gaule est occupée. Toute ? Non, un village d'irréductibles gaulois résiste encore et toujours à l'envahisseur. ». Tout le monde en France connaît cette phrase. Mais ce qui est moins connu, c'est qu'après le siège d'Alésia en –52 et la soumission de Vercingétorix, des gaulois ont en effet continué de résister en s'organisant en petits foyers de résistance sous formes d'escarmouches. Ainsi, au début de l'année –51, César a d'abord eu affaire au soulèvement des carnutes (près d'Orléans), des bituriges (près de Bourges) et des bellovaques (dans le Nord). Au printemps –51, un dernier village résistait encore et toujours à l'envahisseur, un village fortifié sur un oppidum imprenable : Uxellodunum (aujourd'hui le Puy d'Issolud, dans le Lot).

Les Gaulois assiégés au Puy d'Issolud avaient eu le temps de rassembler quelques provisions de blé, ce qui leur permettait de tenir un certain temps. Mais César voulait absolument réduire cette dernière résistance avant la fin de son mandat de Consul des Gaules et son retour à Rome, pour éviter que les assiégés d'Uxellodunum ne donnent des idées pendant son éloignement.

Un point faible de la défense des gaulois était qu'ils devaient s'approvisionner en eau à une source en contrebas de leurs fortifications. César décrit dans la Guerre des Gaules (livre VIII) comment il entreprit d'empêcher cet approvisionnement. Il fit construire une tour de 10 étages sur un terrassement de 18m de haut pour rendre la source vulnérable par des archers romains. Pendant que la tour cristallisait toute l'attention des gaulois qui essayaient de la détruire, des sapeurs romains creusaient des galeries souterraines dans un massif de travertin pour remonter jusqu'à la source, capter la nappe souterraine et tarir la source. Une fois la source tarie, les gaulois sans ressources et y voyant une intervention divine ont cessé toute résistance.

Après la soumission des gaulois, César a été d'une extrême sévérité envers les survivants. Il leur fit couper une main et les renvoya dans différentes régions de Gaule pour montrer à ceux qui auraient des envies de révolte ce qui pourrait leur arriver.

Les forces en présence :

Les romains : 30000 soldats (6 légions, plus des mercenaires),
Les gaulois : 2000 à 5000.

Les ouvrages romains :
Les romains ont construit plusieurs ouvrages : ils ont établi trois camps sur les hauteurs environnantes, dont un seul était véritablement fortifié. Une circonvallation a été construite en partie sur la partie Nord du Puy, la partie la moins abrupte.
Mais l'ouvrage principal (et objet de l'étude) qui a mobilisé la plupart des romains était la tour sur son terrassement, d'une hauteur totale de 45 m environ selon les textes (18m + 27m),

L'implantation de la tour :
Jean Pierre Girault, archéologue de l'université de Toulouse III, travaille depuis une dizaine d'années sur le site d'Uxellodunum. Ces travaux ont permis notamment le 26 Avril 2001 l'officialisation du site du Puy d'Issolud comme le site de la bataille d'Uxellodunum, au

détriment d'autres sites (notamment celui voisin de Capdenac) qui se réclamaient la paternité du lieu.

De nombreuses fouilles avaient déjà eu lieu sur le site, au XIXème siècle sur ordre de Napoléon III, et au XXème siècle par d'autres archéologues. Ainsi, des galeries avaient déjà été mises à jour, et des interprétations et reconstitutions ont déjà été réalisées. Une maquette de la tour faite par Napoléon III est d'ailleurs exposée au Musée des Antiquités Nationales à Saint Germain en Layes.
Mais les travaux récents de M. Girault ont conduit à de nouvelles interprétations (en particulier sur l'implantation exacte de la tour), auxquelles nous nous fierons pour cette étude. Un compte rendu très complet des fouilles récentes et des interprétations nouvelles est disponible sur le site www.uxellodunum.com.

Des études balistiques et plusieurs recoupements à partir des objets trouvés sur place ont permis de localiser avec une bonne précision l'implantation de la tour. D'autres fouilles ont lieu cet été (de mai à juillet 2005) à l'emplacement supposé de la tour pour une éventuelle confirmation.

L'image 1-1 est un plan des fouilles qui ont été réalisées jusqu'à présent. On distingue le point d'eau des gaulois (C) et les filets d'eau correspondants, les galeries romaines creusées pour capter la source (G1 à G8), les zones de combat où se tenaient les assiégés (D et E), on déduit la zone d'implantation de l'ouvrage romain (1), différente de la zone supposée jusqu'à récemment (G), le chemin par où remontaient les assiégés avec l'eau (B).

L'image 1-2 est une coupe topographique ouest – est du site, avec les deux principales interprétations pour l'implantation de la tour : celle proposée par les archéologues de Napoléon III et celle proposée par M. Girault.

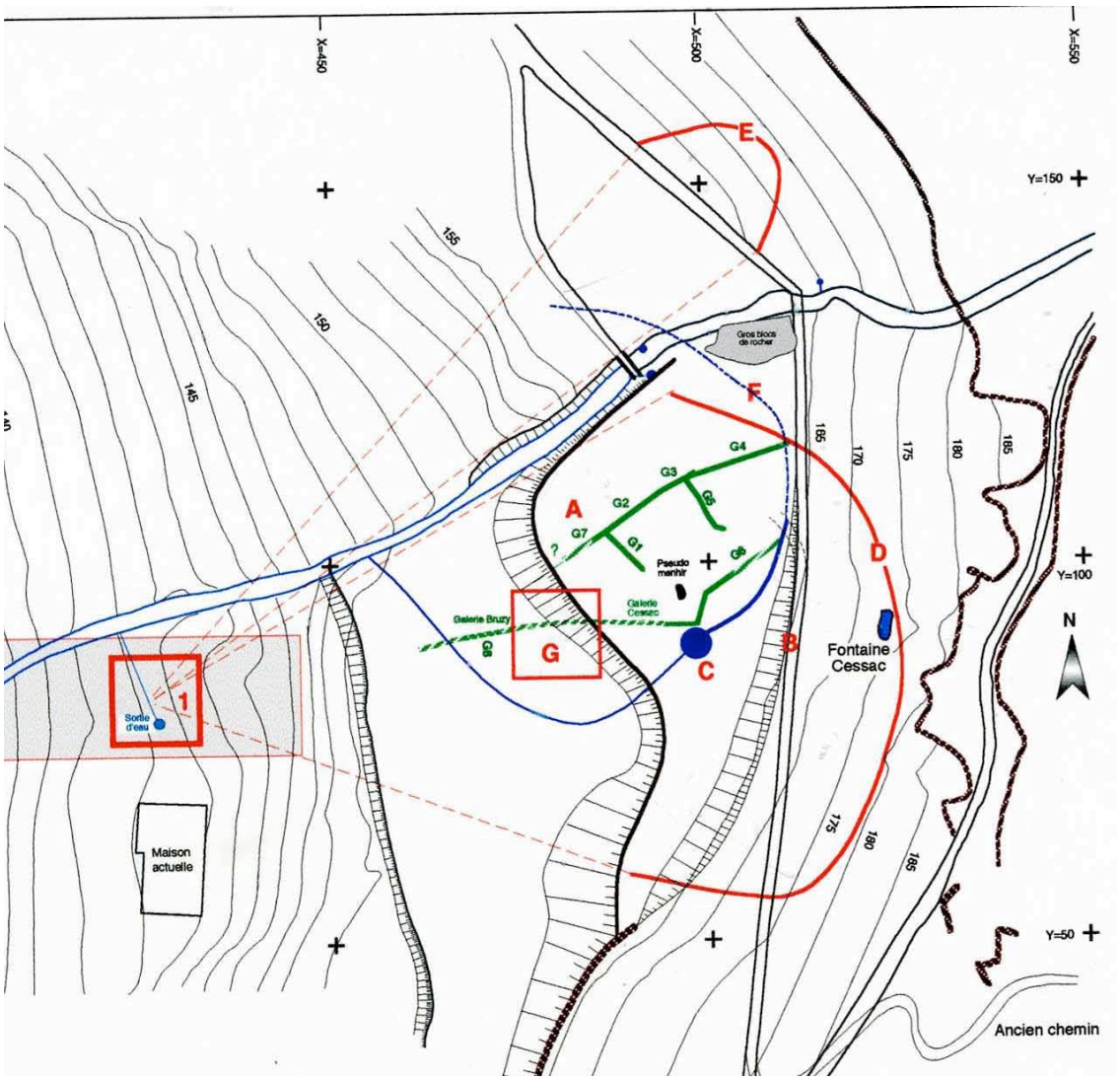


image 1-1 : plan des fouilles et interprétations (source J-P. GIRAULT)

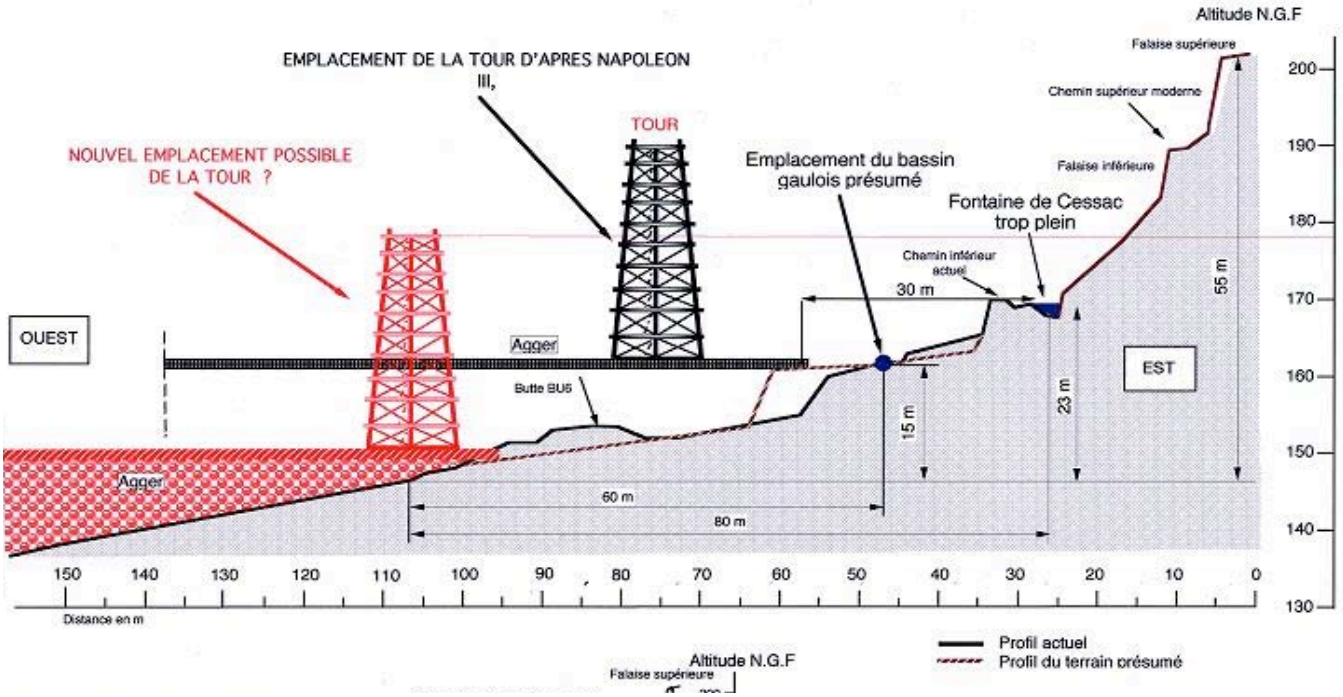


Image 1-2 : coupe topographique du site (source J-P. GIRAULT)

Au cours des 2000 dernières années, le sol du site a été largement remanié, il a été habité pendant la période médiévale, le travertin a été exploité en carrière, les fouilles successives des siècles archéologiques n'ont pas été effectuées avec la plus grande finesse, et enfin, un remblai a été construit plus récemment pour la construction d'une habitation. Les images 1-3 et 1-4 représentent la situation géologique actuelle. Le massif de travertin a pratiquement disparu, les falaises entourant l'oppidum sont des falaises calcaires, et le sous-sol des versants moins pentus de l'oppidum est constitué de marnes et argiles (un peu plus de 20 m d'épaisseur), reposant sur un substratum calcaire.

image 1-3 : coupe géologique large du puy d'Issolud (source www.quercy.net)

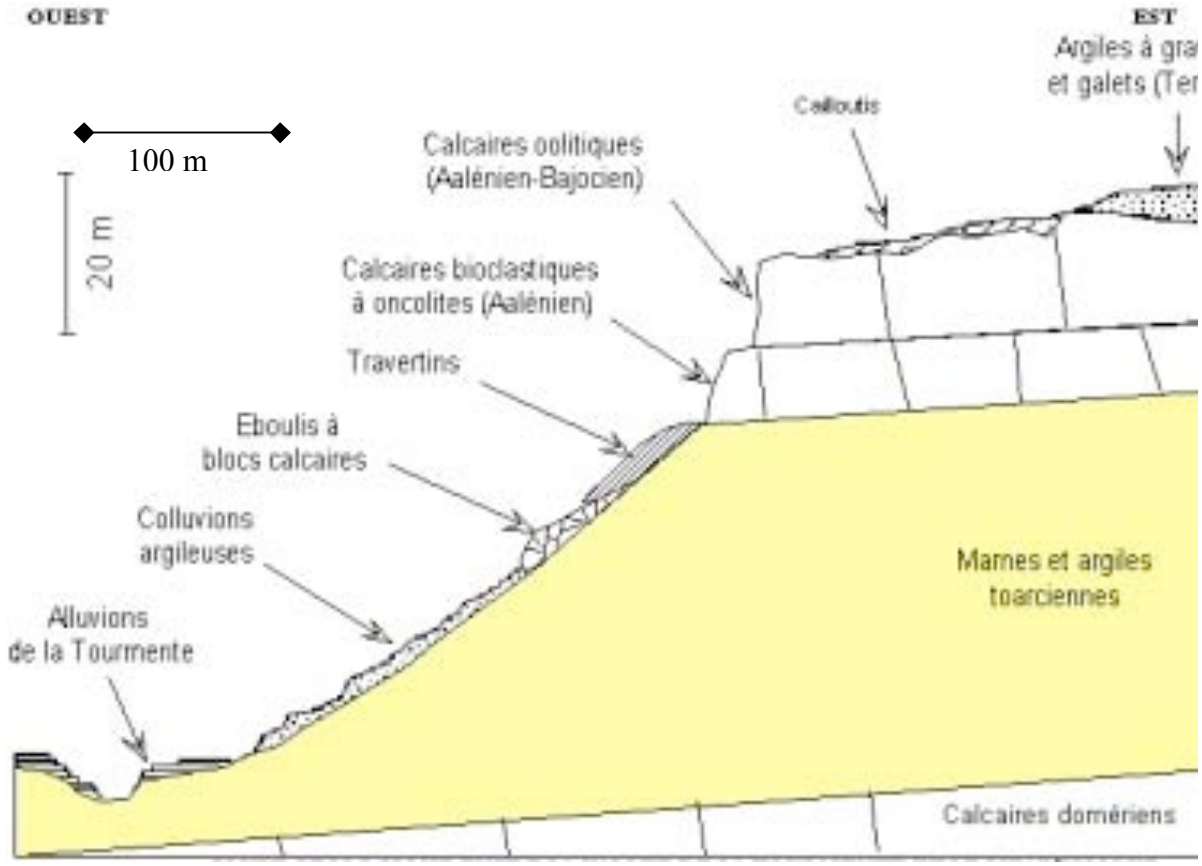


image 1-4 : coupe géologique au niveau de la tour, des galeries et de la source (source www.quercy.net)

2. Conception de l'ouvrage romain

2-1. Plate-forme et fondation

Les sources concernant le siège d'Uxellodunum sont peu nombreuses.
La source principale est le texte de la Guerre des Gaules, dont l'extrait concernant Uxellodunum n'a pas été écrit par Jules César, mais par son aide de camp Lucius Hirtius. Ce texte décrit un ouvrage reposant sur un terrassement de 60 pieds (soit 18 m) de haut. Peu d'autres auteurs latins l'évoquent dans leurs écrits. Parmi eux, Paul Orose, écrivain historien du Vème siècle consacre quelques pages de son *Histoire contre les païens* à la bataille d'Uxellodunum. La description générale de la tour selon Orose fait état d'un remblai et d'une tour d'une hauteur totale de 60 pieds, alors que dans la Guerre des Gaules, c'est le remblai à lui seul qui s'élève à 60 pieds de haut.
On constate donc que les deux textes diffèrent légèrement. Le texte d'Orose a été écrit cinq siècles plus tard. En plus il n'est qu'un simple résumé et une simple paraphrase littéraire de la Guerre de Gaules, car Orose ne disposait d'aucune autre source. C'est pourquoi nous privilégierons le texte de la Guerre des Gaules par rapport à celui d'Orose, conscients aussi que César n'était pas animé par des motivations de véracité historique, mais plutôt par la volonté de mettre en valeur sa campagne militaire, lors de l'écriture de la Guerre des Gaules.
Par conséquent quand César décrit les dimensions de la tour et du remblai (18 m de haut pour le remblai), nous ne prenons pas à la lettre la hauteur du remblai. On la détermine grâce aux recoupements avec les recherches archéologiques et la topographie du lieu réalisés par M. Girault, sachant que la plate-forme sommitale de la tour arrivait au même niveau que la source.

Quant à la constitution du terrassement, les principales informations dont nous disposons proviennent également de la Guerre des Gaules. Le texte latin mentionne la construction d'un « agger », traduit couramment par terrassement, ou terrasse/ fortification, et qui renvoie soit à un amoncellement de terre, soit à un ouvrage en bois. Par ailleurs, si l'on se réfère aux constructions réalisées lors du siège d'Avaricum quelques mois avant (la Guerre des Gaules, livre VIII), le terrassement devait être en partie construit en bois puisque les gaulois l'avaient incendié. A moins que le bois incendié ne soit que des pans de bois de protection au pied du terrassement. Le terrassement devait par ailleurs comporter une grosse part de terre puisque les sapeurs y creusaient des galeries. Il est possible que l'agger romain était constitué d'un réseau de poutres en bois perpendiculaires, formant des vides comblés par des pierres et de la terre.
Quoiqu'il en soit, les galeries souterraines devaient prendre naissance à l'intérieur du terrassement, pour ne pas que les gaulois ne puissent soupçonner ces travaux. La terre évacuée provenant des galeries devait elle aussi rester masquée. Elle représente au total 150 à 200 mètres cube, ce qui n'est pas très important à côté des dimensions de la terrasse. Cette quantité de terre devait être réutilisée pour le terrassement à l'insu des assiégés.

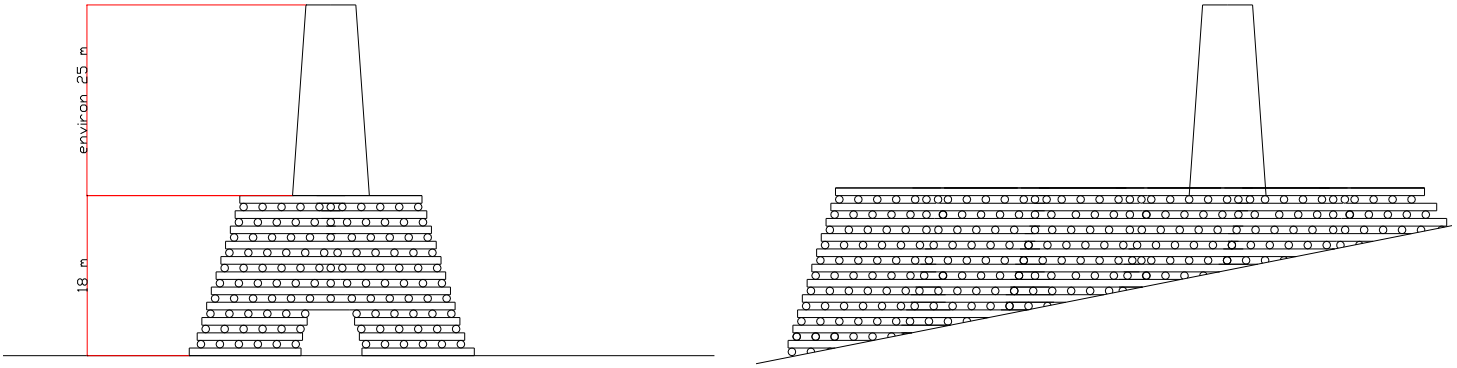


image 2-1 : coupe du terrassement romain

Adaptation à la reconstitution

Il est malheureusement difficile de respecter cette conception pour la reconstitution. En effet, cette fondation comporte beaucoup de bois enterré, et qui va par conséquent se dégrader rapidement. Ses caractéristiques mécaniques ne seront donc pas garanties sur la durée. De plus, la majeure partie du bois est invisible. Pour la reconstitution, il faut réaliser un remblai classique en terre, et il est envisageable de donner au remblai une apparence romaine en faisant ressortir des poutres de bois sur les côtés.

Par contre la tenue du remblai exige qu'on adapte sa forme, et notamment la pente qui doit maintenant être de 3/2.

On peut évaluer le cubage approximatif du terrassement :
La plate-forme doit pouvoir accueillir la tour (10m sur 10m environ à la base), avec un peu de surface supplémentaire tout autour pour la circulation des personnes et l'accès à la tour. On prévoit donc une plate-forme circulaire de 20m de diamètre.
Le terrassement repose par ailleurs sur une pente de 10/1 d'après la coupe géologique large. Le terrassement peut donc approximativement être considéré comme un cône de pente 3/2, tronqué à sa base par un plan de pente 10/1, et 18 m plus haut par un plan horizontal. (voir coupe du terrassement, image 2-2). Cela représente un volume de 36000 m3.
Si 2000 soldats travaillent simultanément au terrassement et réalisent chacun chaque jour l'équivalent du travail (extraction, transport, mise en œuvre et tassement) pour 1 m3 de terrassement, cela représente 18 jours de travaux, ce qui est cohérent avec la durée de la bataille. Les chiffres donnés dans la guerre des Gaules sont donc ici plausibles.

Pour la stabilité, la tour devra reposer sur un radier enterré en béton armé pour répartir la descente de charge. Après dimensionnement (partie 3), on verra que des fondations profondes ne sont pas nécessaires.

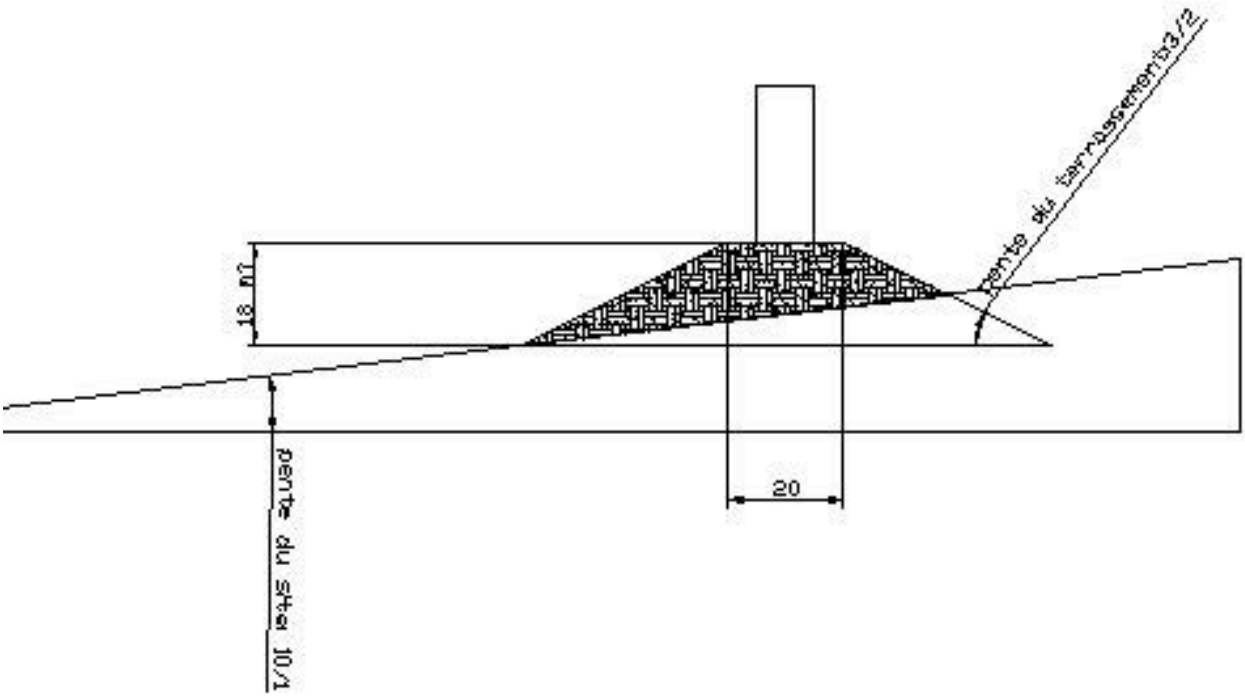


image 2-2 : coupe du terrassement de la reconstitution. La hauteur de 18 pour le remblai est une borne supérieure, et sera redéfinie en fonction de la hauteur de la tour

2-2. Reconstitution de la tour

Quel était le cahier des charges de l'architecte romain ?

Au sujet des dimensions, la tour devait être assez haute pour dominer la source gauloise, et de superficie suffisante pour accueillir un grand nombre de militaires romains.
Le texte de la guerre des gaules parle également de machines d'artillerie au dernier étage de la tour.
La tour devait également permettre le cheminement et l'ascension des légionnaires en relative sécurité vis à vis des archers et frondeurs gaulois.
La tour devait être capable de tenir pendant la période de la bataille, c'est à dire de l'ordre d'un mois.

Pour la conception de la structure, plusieurs orientations sont possibles.

La structure proposée par Napoléon III

Tout d'abord, on peut choisir une structure comportant des éléments les plus longs possibles, pour limiter le nombre d'assemblages. C'est ce qui a été décidé pour la reconstitution menée par Napoléon III : sur l'image 2-3, on voit sur la maquette 4 poteaux principaux aux 4 coins de la tour qui font toute sa hauteur, soit 27 m de long environ. De plus, ces poteaux sont inclinés vers l'intérieur, ce qui donne plus de stabilité à la tour vis à vis des efforts de vent. Les contreventements sont assurés par trois niveaux de croix de saint andré, et nécessitent des poutres en bois de plus de 10m de long pour celles du premier niveau.

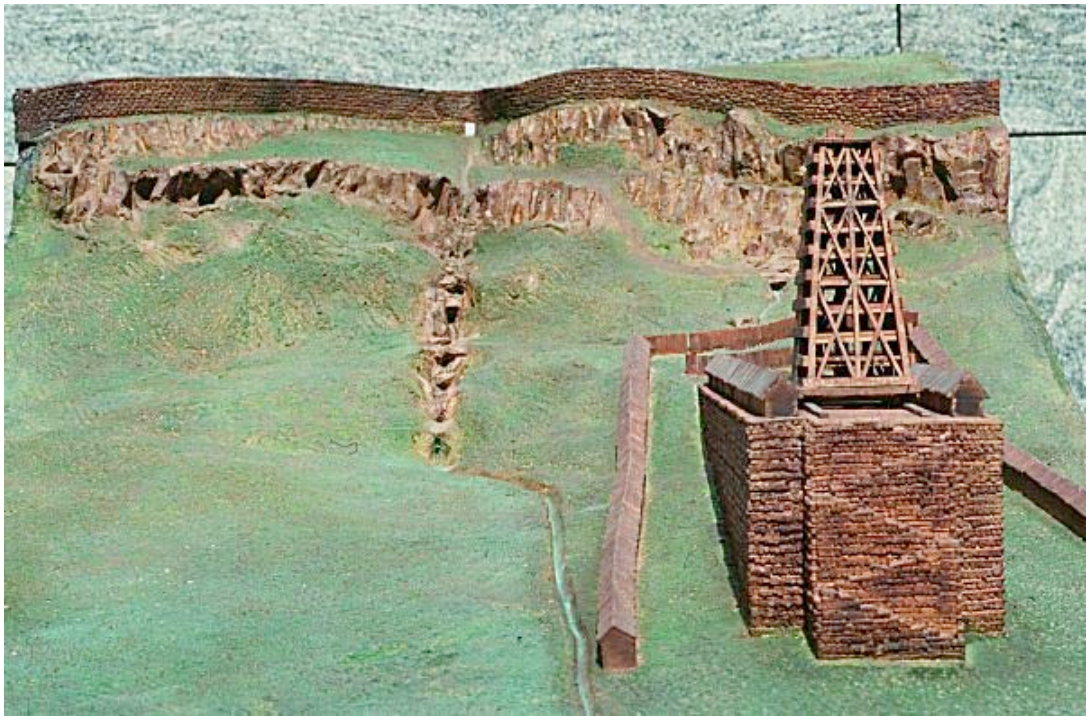


image 2-3 : maquette de la reconstitution menée par Napoléon III

Vers une structure modulaire

Cependant, cette conception ne paraît pas pertinente, pour plusieurs raisons :

La manutention et le dressage de poutres de 20m de long , qui plus est sous la menace d'attaques gauloises, est problématique.
L'essence de bois disponible pour la construction était le chêne. La sylviculture actuelle qui permet de disposer d'arbres droits et hauts n'existait pas. Les romains n'avaient à disposition que des arbres ayant poussé naturellement, et ne présentant donc pas des hauteurs très importantes. Il semble impossible que les romains aient pu disposer de troncs rectilignes de cette longueur, et avec des sections significatives. Il est beaucoup plus probable qu'ils aient eu recours à des éléments de taille moins importante : 6m de longueur (10m exceptionnellement), et de section allant jusqu'à 30cm x 30cm au maximum. Cette hypothèse est d'ailleurs confirmée par l'études des plans de charpentes construites au cours de l'histoire (« les charpentes du Xième au XIXeme siècle », Monum, éditions du patrimoine) : Les éléments de charpente dépassent rarement 6-7 m de longueur, et ne dépassent jamais la dizaine de mètres. Ces éléments auront par ailleurs l'avantage d'être plus facile à manier et à mettre en place. De plus, une construction avec des petits éléments, dite « de petit appareil » est conforme à ce qui se faisait usuellement dans la construction romaine. Ainsi selon Jean Pierre Adam, dans « la construction romaine », p 84 : « la standardisation des matériaux de construction produits en immense quantité est un des secrets de cette incroyable rapidité d'exécution, mais il convient d'y ajouter en corollaire, une planification admirable du chantier et la totale docilité de la main d'œuvre formée à l'accomplissement de tâches définies et simples. » Il est en effet primordial de profiter au maximum de l'abondance de la main d'œuvre constituée par les légionnaires, au nombre de 30000 selon M. Girault, l'archéologue ayant travaillé sur les vestiges de la bataille. La discipline des soldats et l'organisation efficace de l'armée en légions, cohortes, etc, rendaient possible le travail simultané et efficace d'une très grande quantité d'hommes, à condition que les tâches soient simples et clairement définies, standardisées. Le travail simultané d'un très grand nombre de soldats romains est permis par le fait que pendant les campagnes militaires, chaque légionnaire transportait un

paquetage d'une cinquantaine de kilos, un paquetage qui comportait une pioche pour les travaux de terrassement, une hache pour les travaux de charpente et de menuiserie. Par ailleurs, les convois qui accompagnaient les colonnes en marche transportaient du matériel complémentaire en vue des travaux exceptionnels que les légions devaient réaliser. Grâce à cette organisation et cette logistique, les armées de Jules César auraient construit, d'après le texte de la guerre des Gaules (livre III) un pont en bois sur le Rhin en à peine dix jours.

Pour la tour, une conception de la structure qui permet cette standardisation est une structure composée par la superposition de plusieurs modules identiques, composés de poutres en bois de taille limitée (jusqu'à 6-8 m), comme nous l'avons vu, pour permettre une manutention aisée. Etant donné la hauteur de la tour (27 m, soit 10 étages de 2,70 m), on peut alors définir en fonction de la taille des éléments de bois disponibles des modules qui correspondent à 2 étages, soit 5,40m de haut. La tour pourra donc être constituée de 5 modules assemblés et superposés. Lorsqu'un module est terminé, on passe au suivant, en prenant soin d'élever au préalable un mantelet de protection au fur et à mesure sur la façade exposée aux tirs ennemis, pour protéger les constructeurs pendant les travaux.

Conception d'un module

Pour que les 5 modules soient identiques, il est nécessaire que les façades et les poteaux extérieurs soient parfaitement verticaux et pas inclinés vers l'intérieur. Ceci est contraire à la reconstitution de Napoléon III.

Par ailleurs, des textes antiques antérieurs à la bataille cités par l'architecte romain Vitruve parlent de la construction de tours d'assaut en bois avec des dimensions bien définies (cf encadré)

dont il nous a donné la description. Il dit que la plus petite tour ne doit point avoir moins de soixante pieds de hauteur et de dix-sept de largeur ; que le haut doit être d'un cinquième plus étroit que le bas; que les montants doivent être à la partie inférieure de trois quarts de pied, et à la partie supérieure d'un demi-pied. Il dit que cette tour doit avoir dix étages, tous garnis de fenêtres.

Il donne à la plus grande tour cent vingt coudées de haut, vingt-trois et demie de large. Le rétrécissement d'en haut est aussi d'un cinquième ; les montants ont par le bas un pied de grosseur, par le haut un demi-pied. La hauteur de ces grandes tours était divisée en vingt étages, entourés chacun d'un parapet de trois coudées; il les couvrait de peaux fraîches pour les mettre à l'abri de toute espèce de coups.

encadré 2-1 : extrait de Vitruve, De l'architecture, livre X

Si on se réfère à ce texte, la tour ferait 26,5 m de hauteur, avec 7,5 m de côté à la base et un cinquième en moins au sommet, soit 6m.

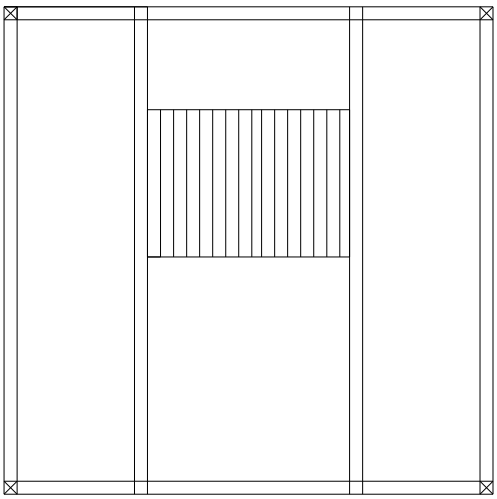
Les dimensions sont proches de celles déjà prévues, mais elles ne sont plus constantes sur toute la hauteur, ce qui était une des hypothèses de base de la conception, puisque les modules superposés étaient identiques.

Doit-on donc nécessairement se référer à ce texte ? Il est vrai qu'il est parfois supposé que Vitruve, contemporain de César, l'ait accompagné pendant ses campagnes en Gaule et en Espagne. Il se pourrait même que Vitruve ait été présent à Uxellodunum ! Cependant, dans le passage de *De l'architecture* où il parle de tours d'assaut, il ne fait que citer les auteurs grecs, Diadès et Athénée, et ne s'approprie pas véritablement ce type de conception. C'est donc difficile de trancher. L'hypothèse des façades inclinées paraît raisonnable, et justifiée mécaniquement, bien qu'elle empêche la standardisation parfaite de la conception et la superposition de modules identiques. En effet, cela permet d'une part d'abaisser le centre de gravité de la tour et d'élargir sa base, ce qui lui donne une meilleure résistance vis à vis des efforts de vent, et d'autre part d'apporter un contreventement horizontal et donc de minimiser les risques de torsion de la tour en cas d'efforts horizontaux dissymétriques. Nous validons donc cette hypothèse, tout en gardant l'idée de la superposition de modules, que nous ferons en sorte de prévoir le plus standardisés possibles malgré tout. Du point de vue des dimensions cependant, nous conserverons l'ordre de grandeur, mais en adaptant les longueurs précises à la situation.

On part donc d'un module de deux étages, de 2 x 2,70m de hauteur, et de 7,5m environ de côté environ à la base, 6m au sommet.

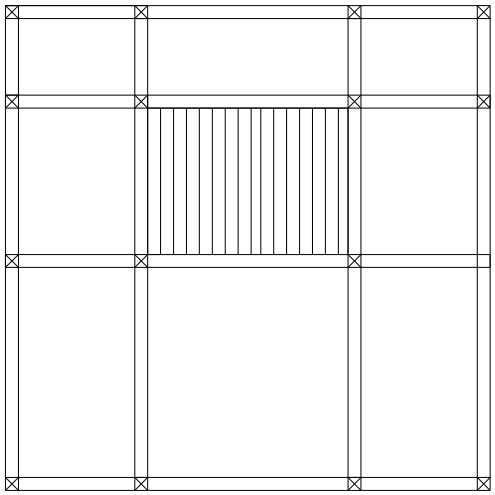
Comment organiser les circulations et les escaliers à l'intérieur de la tour dans ces conditions ?
Il y avait probablement un escalier unique et large pour faciliter la circulation des constructeurs et des pièces de construction pendant la réalisation de la tour, et la circulation de soldats en armes pendant son utilisation.

Les travées d'escalier reposent en amont et aval sur des solives horizontales. Ainsi, dans une direction au moins, à cause de la nécessité de prolonger les escaliers par des paliers, la structure est décomposée en trois travées (dessin 2-1).



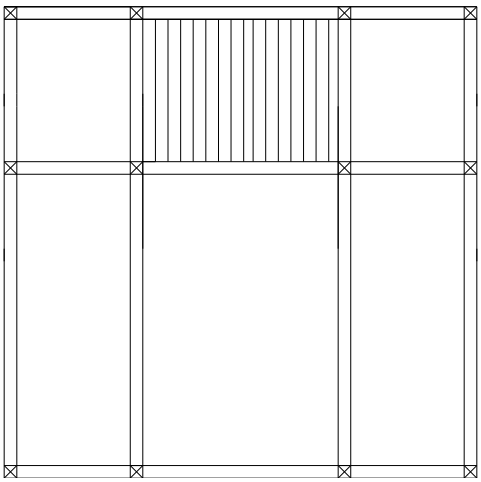
dessin 2-1

Selon le dessin 2-1, les poutres qui reprennent les solives des escaliers sont très sollicitées en flexion, c'est pourquoi on prévoit des poteaux pour les soutenir. De même, les solives étant également fortement sollicitées en flexion, on les renforce aussi par des poteaux (dessin 2-2).

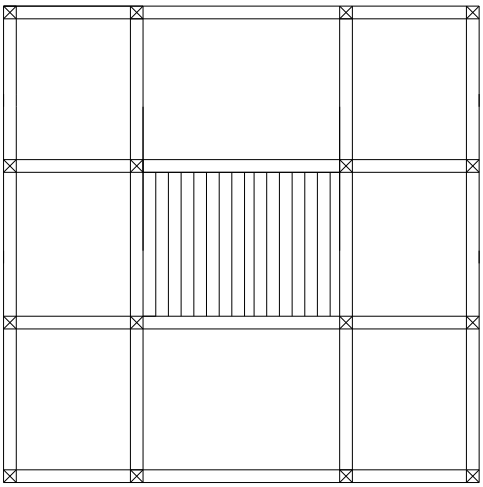


dessin 2-2

Ensuite, pour standardiser la construction, on a le choix entre décaler la cage d'escalier jusqu'en façade (dessin 2-3), ou décaler les escaliers pour les disposer au milieu de la structure (dessin 2-4).

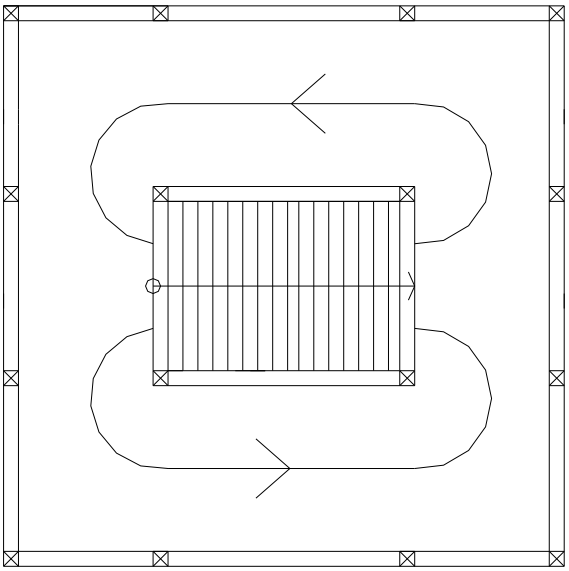


dessin 2-3 : escalier en façade



dessin 2-4 : escalier central

De plus, les escaliers contre les façades posent deux problème : d'une part la façade est inclinée, ce qui fait perdre de la place dans les escaliers, et d'autre part cette configuration pose des difficultés pour la circulation des personnes et le croisement de ceux qui montent et qui descendent. L'escalier central unique permet de répartir les flux de circulation montant et descendant de part et d'autre de l'escalier (dessin 2-5). Dans cette configuration, l'escalier unique, central, sert à la fois à la montée et à la descente. Une fois une volée d'escalier montée (ou descendue), l'usager fait le tour et traverse le palier dans l'autre sens pour atteindre la volée suivante, comme indiqué.



dessin 2-5 : circulation dans la tour

Cette structure a l'avantage de pouvoir être construite autour d'un noyau central, avec des poteaux centraux parfaitement verticaux. Ainsi, tout le noyau central avec la cage d'escalier est identique d'un étage sur l'autre. La standardisation a donc été bien poussée à son maximum.

Par ailleurs, cette configuration laisse libre toute la périphérie de la tour, permettant aux soldats romains de s'y positionner et d'occuper au mieux l'espace.

Au niveau des dimensions, la plate-forme sommitale pouvait mesurer 20 pieds de côté (5,8 m d'après les dimensions de Vitruve). L'escalier peut faire 10 pieds de côté (2,9 m), ce qui laisse de part et d'autre de l'escalier un palier de largeur 5 pieds.

Au niveau des contreventements, les romains connaissaient bien et utilisaient couramment depuis un certain temps le principe de la croix de Saint-André dans leurs constructions en bois (image 2-4).

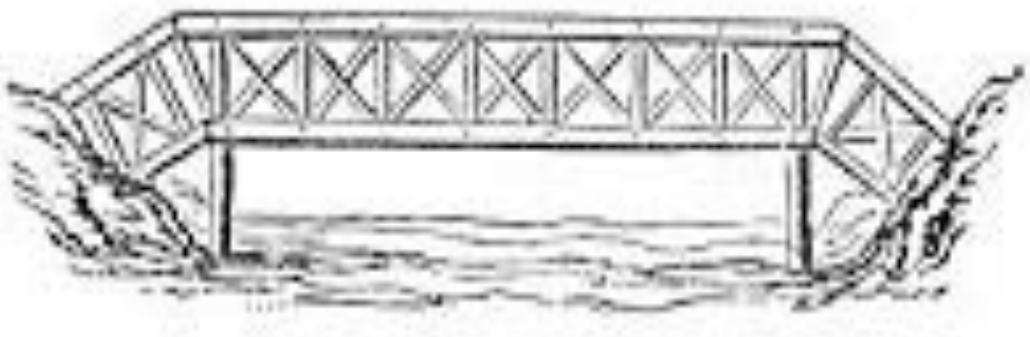
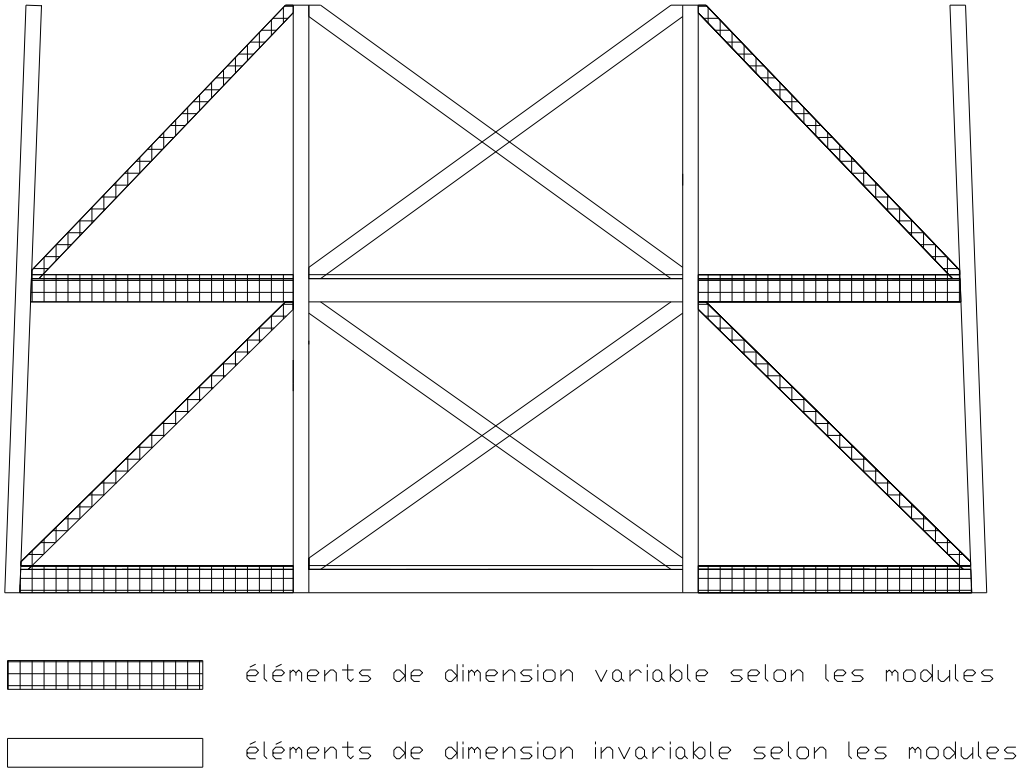


image 2-4 : pont Sublicius (-621) à Rome, bas relief de la colonne d'Antonin

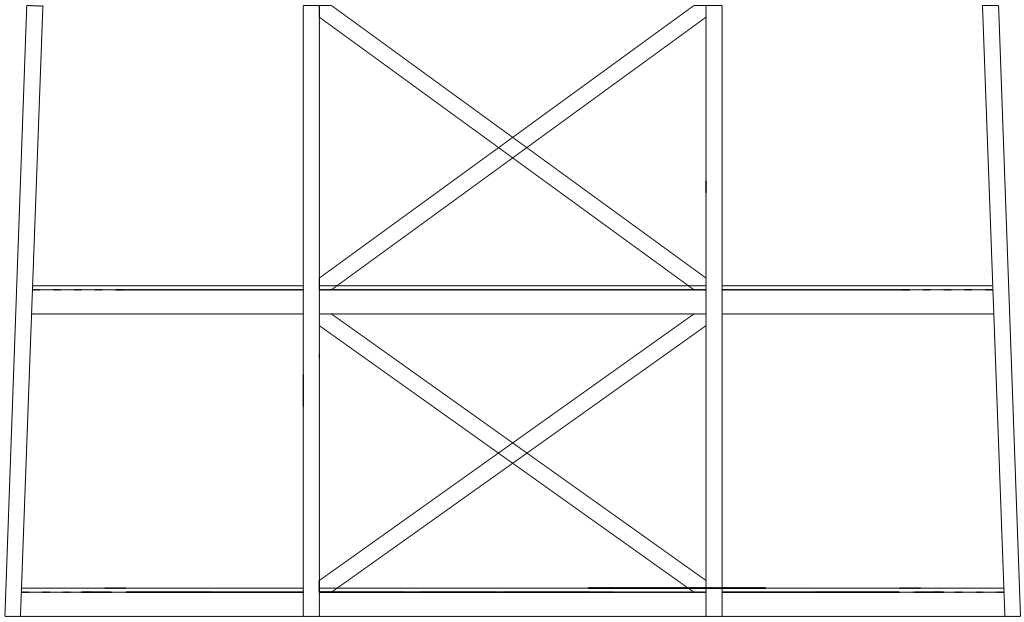
Pour la tenue de la structure, on peut donc envisager une structure poteaux poutres contreventée au centre par une croix de Saint-André, et sur les côtés par des béquilles.

Pour un module, on obtient les vues suivantes (dessins 2-6 à 2-8) :



dessin 2-6 : vue d'un module au niveau de la façade

Un maximum d'éléments sont donc identiques quel que soit le module. Pour les autres, la symétrie de la tour garantit que les éléments non standardisés ne sont pas non plus uniques.



dessin 2-7 : coupe d'un module au niveau des escaliers, parallèlement aux escaliers

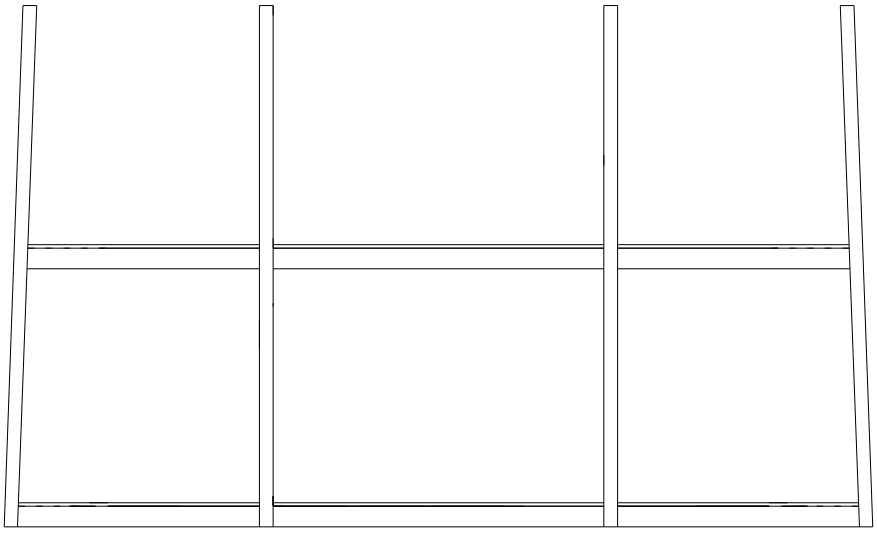


image 2-8 : coupe d'un module au niveau des escaliers, perpendiculairement aux escaliers.

Adaptations au programme actuel et à la législation

La tour est à classer parmi les ERP (établissements recevant du public) de quatrième catégorie et doit donc se conformer à la réglementation qui en découle, notamment pour les évacuations en cas d'incendie ou l'accueil des personnes handicapées.

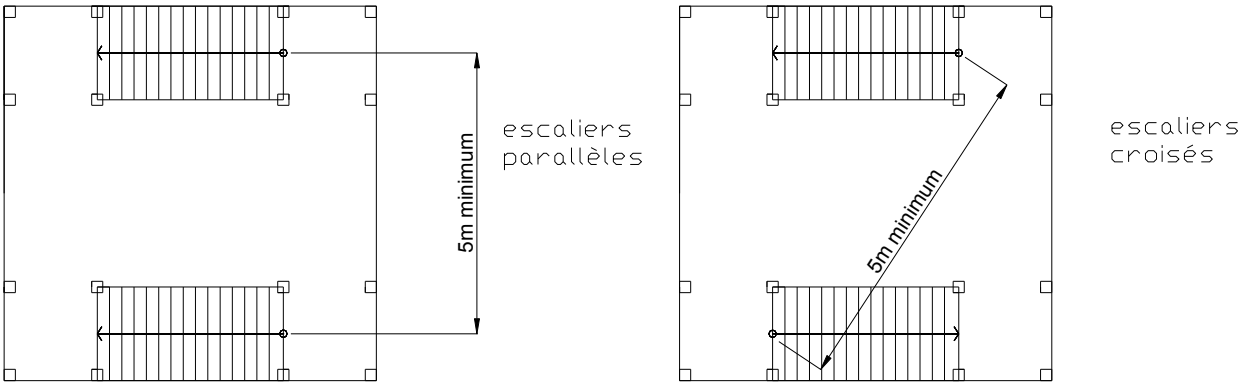
Résistance au feu de la structure et évacuation du public :

D'après l'article C0 12 du règlement de sécurité contre les incendies dans les ERP, la structure doit être stable au feu pendant 1h, et la toiture stable au feu ½ heure.
Cette période est mise à profit pour l'évacuation de la tour. Pour que l'évacuation soit le plus rapide et fluide, les dégagements doivent avoir des dimensions minimums en fonction du nombre de personnes accueillies dans la tour. En période de pointe, la tour est prévue pour accueillir au maximum 300 personnes (le nombres de visiteurs sera limité si besoin à l'entrée). Pour évacuer cet effectif, la réglementation exige un minimum de 2 dégagements de 1 UP (une unité de passage = 0,90m), les entrées des dégagements devant être distantes de 5m minimum en parcours effectif pour éviter les encombrements.

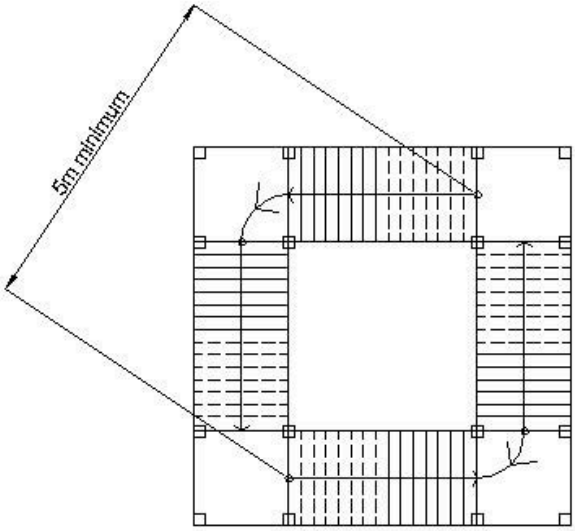
La disposition actuelle des escaliers, avec un escalier central unique ne permet pas de respecter le règlement. En effet, même si on séparait l'escalier en deux par une rambarde infranchissable au milieu, pour former artificiellement deux escaliers de 1UP, les distances d'entrée de chaque dégagement seraient inférieures à 5m (dessin 2-9). Il faut repenser la circulation à l'intérieur de la tour pour l'adapter à la législation, et notamment éloigner les entrées des escaliers.

Pour cela, on a plusieurs options. Soit on décale chacun des escaliers (puisqu'il en faut deux) jusqu'en façade (dessin 2-10). Soit on réalise deux escaliers à la périphérie, mais avec une rotation d'un quart de tour à chaque changement d'étage (dessin 2-11). L'avantage de cette solution est que la structure est naturellement contreventée par les escaliers dans les deux directions.

Mais ces deux options occupent de la place à la périphérie de la tour, ce qui n'est pas satisfaisant.

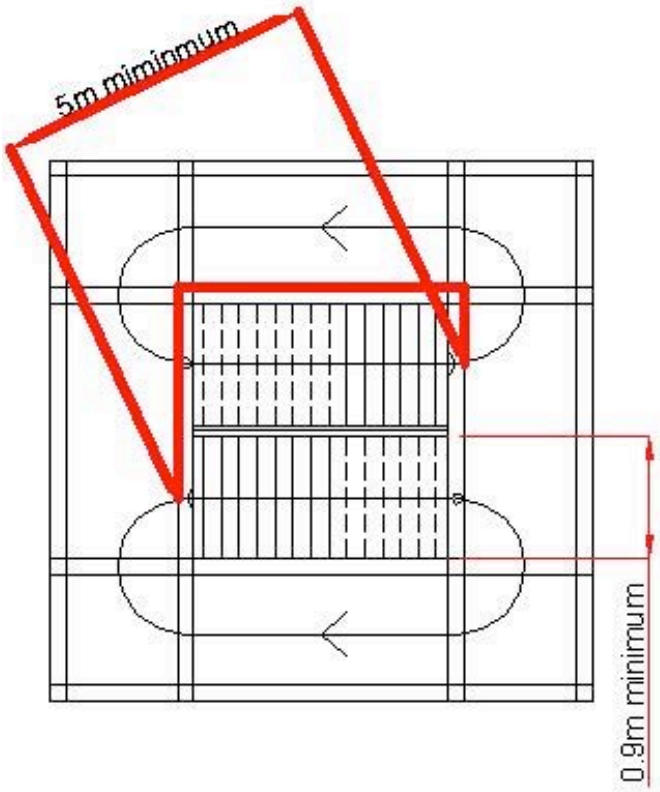


dessin 2-10



dessin 2-11

Une troisième option consiste finalement à laisser les escaliers en position centrale, mais en les croisant pour que les entrées soit distantes de 5m (dessin 2-12). Cette dernière option est plus fidèle par rapport à ce qui était prévu, et est donc privilégiée.



dessin 2-12 : 2 escaliers croisés en position centrale, un pour la montée, l'autre pour la descente.

Les escaliers et circulation doivent faire minimum 0,90 m de large.

Hauteur des étages :

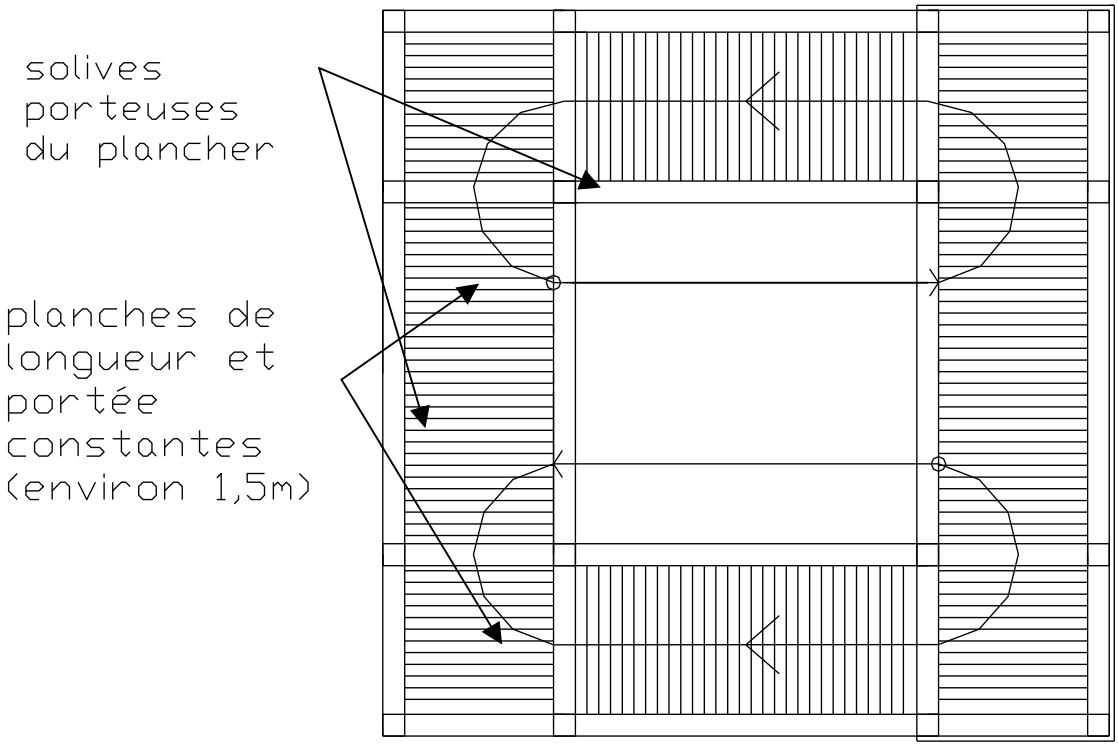
Selon les dimensions générales de Vitruve, la tour culminait à environ 26-27m de haut, y compris un toit dont nous parlerons ultérieurement. Sans le toit, la hauteur de la tour devait être de 25m environ, soit 2,50m par étage.
La hauteur des étages a aussi une incidence sur les portées des volées d'escalier. Il n'est pas avantageux d'avoir des étages inutilement trop hauts, car les portées d'escalier seront d'autant plus importantes et prendront trop de place.

Cherchons donc à minimiser la hauteur des étages pour limiter la longueur des portées d'escalier, tout en restant dans l'ordre de grandeur indiqué par Vitruve.

Pour cela, l'épaisseur et la structure du plancher sont déterminants.

D'après l'ordre de grandeur Vitruvien, l'étage de la plate-forme sommitale est un carré de 6m de côté. Pour des étages de 2,5m de haut, les escaliers seront de portée de 3m environ, ce qui laisse aux couloirs des largeurs de l'ordre de 1,50m.

Il n'y a de plancher que sur l'extérieur, dans des zones de circulation de faible largeur encadrées à chaque fois par des solives porteuses déjà prévues dans les modules.



dessin 2-13 : disposition du plancher

La structure du plancher-plafond est donc très simple, avec un niveau de solives et un niveau de planches. (la faible largeur des circulations autorise à ne pas prévoir un niveau perpendiculaire supplémentaire de solives.).

Dans le cadre d'un pré-dimensionnement, on admet des flèches 1/1000 pour le plancher. On calcule les sections des éléments correspondants.
Pour les planches proprement dites, le chargement est un chargement classique de circulation dans un bâtiment (2,5 kN/m2). Pour des portées de 1,5 m, les planches doivent être de 5 cm d'épaisseur.

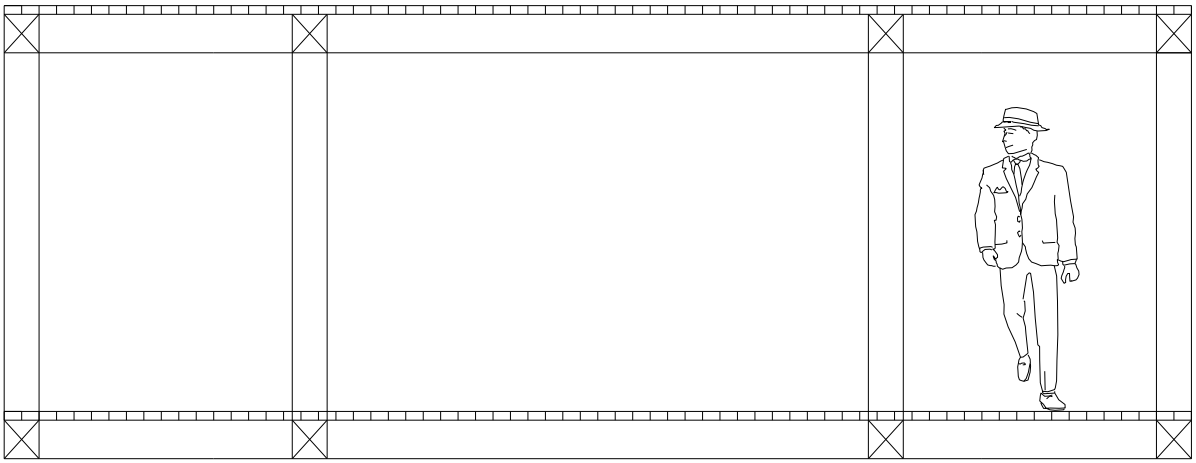
Les solives reprennent elles les demi chargements de la circulation qu'elle portent, plus le cas échéant un chargement ponctuel au niveau des limons des escaliers, dû au chargement des escaliers. Un calcul de flèche indique des sections de solives de dimensions b=20 cm, h = 22 cm.

Au final, l'épaisseur du plancher-plafond est donc de 27 cm environ, on arrondit à 30 cm.

Quelle hauteur minimale doit on ménager sous les solives ?
Pour le confort des futurs visiteurs et la sécurité des plus grands d'entre eux, il ne faut pas que les solives soient trop basses, il faut qu'elles soient bien visibles ou il faut qu'elles ne soient pas en dessous d'une hauteur à laquelle les usagers soient habitués, typiquement la hauteur d'une porte.

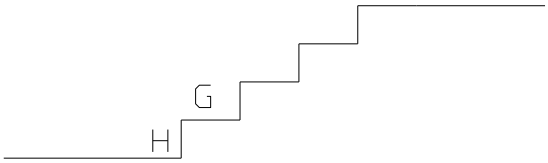
La hauteur usuelle d'une porte est de 2,05 m, on peut reprendre cette hauteur pour le gabarit de nos étages.

Cela donne donc des étages de hauteur 2,35 m au lieu de 2,7 m prévu jusqu'à maintenant.

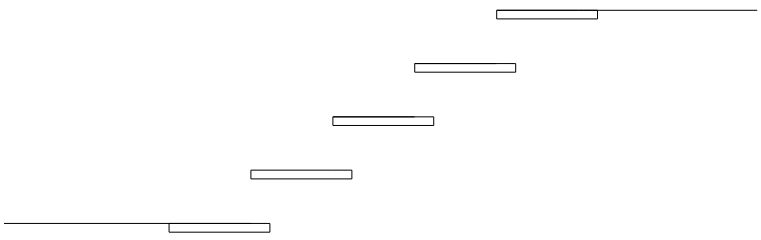


dessin 2-14 : Vue en coupe d'un étage, au niveau des couloirs

Une fois la hauteur des étages déterminée, on applique la règle de Blondel pour les escaliers. La règle de Blondel impose les rapports de dimensions suivants : 60 cm < 2H + G< 64 cm.

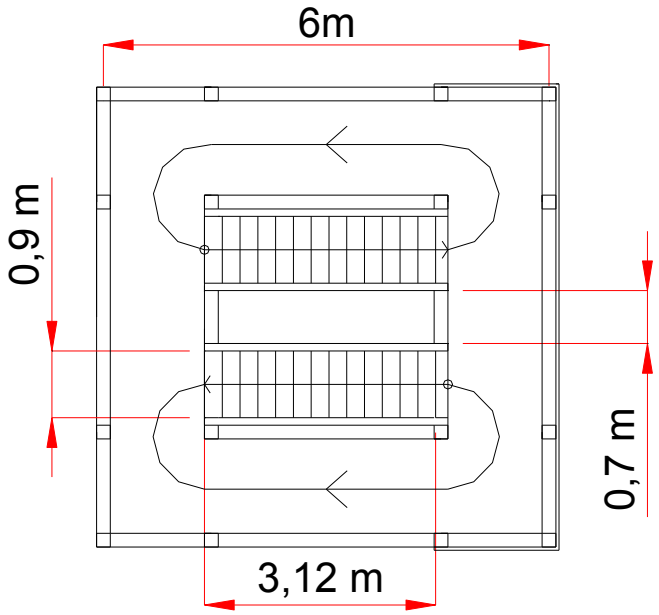


Les fouilles archéologiques à Herculanum et Pompéi ont mis en évidence des escaliers plutôt raides par rapport aux escaliers modernes (Jean Pierre Adam, « la construction Romaine). A fortiori les escaliers à usage militaire devaient être eux aussi assez abrupts.
En choisissant donc des escaliers raides (H= 18 cm, G=24 cm), on obtient des escaliers de 13 marches seulement, soit une longueur de travée de 3,12 m.
Par ailleurs, les escaliers de la tour n'auront pas de contremarche, ils seront ainsi plus simples à construire. Le règlement demande que les marches soient prolongées et se chevauchent de 5 cm (dessin 2-15).



dessin 2-15 : escaliers sans contremarche

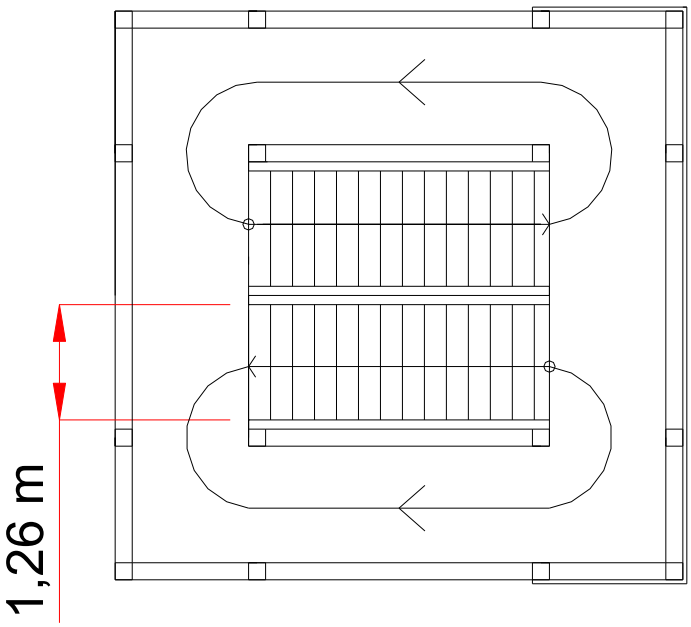
D'où un nouveau plan d'étage:



dessin 2-16 : plan du dernier étage

Un espace de 0,7 m de large peut être ménagé entre les deux escaliers, ce qui laisse un espace disponible pour installer une reconstitution de machine d'artillerie, car il y en avait une au sommet de la tour d'après le texte de la Guerre des Gaules (voir la partie sur les finitions et l'occupation du dernier étage de la tour). Pour les escaliers des autres étages, on peut laisser cet espace vide intéressant au milieu de la cage d'escalier.

Mais les autres étages n'ont aucune autre finalité que l'ascension du public, et l'espace central entre les deux escaliers est inutile. Les escaliers peuvent être élargis au maximum jusqu'à ce que les limons soient adjacents (dessin 2-17). Les escaliers sont alors plus larges que ce que demande la législation - leur largeur atteint presque 2 up (2up= 1,40 m)-, l'ascension en sera alors plus confortable pour les visiteurs qui pourront plus facilement monter à 2 de front. Les deux solutions sont possibles.



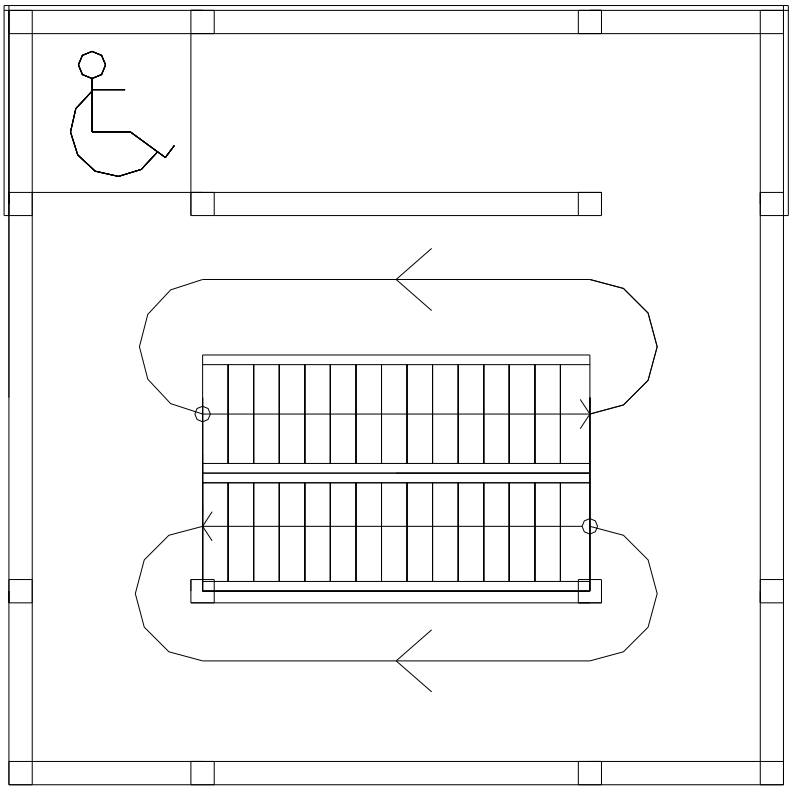
dessin 2-17

Accès et accueil des personnes handicapées

D'après le code de la construction et de l'habitation (Art. R. 111-19-1.)

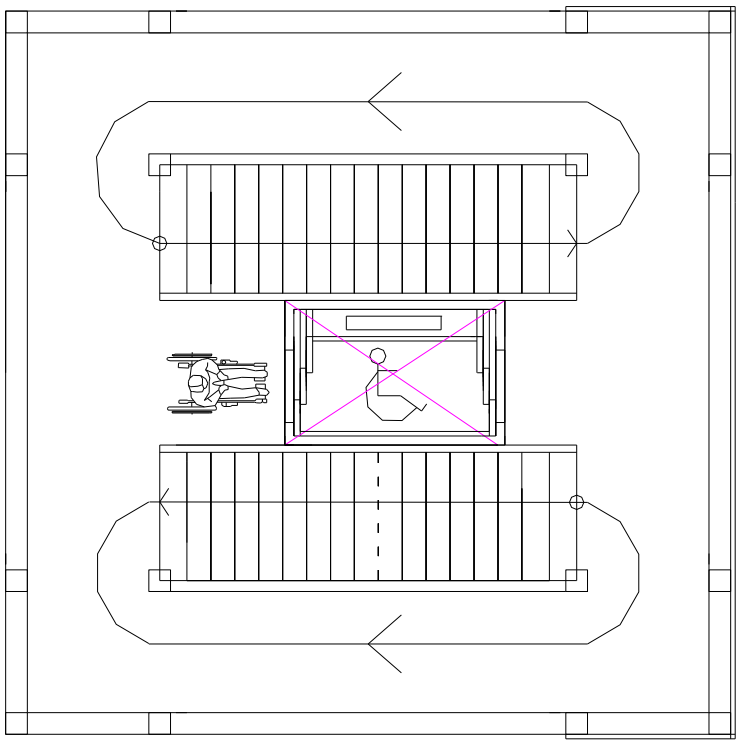
« Tout établissement recevant du public doit être accessible aux personnes handicapées, en offrant notamment la possibilité de pénétrer dans l'installation, d'y circuler, d'en sortir et de bénéficier de toutes les prestations offertes au public en vue desquelles cet établissement a été conçu. »

En vertu de cet article la loi demande donc que la tour propose aux personnes handicapées la possibilité de monter au sommet, ce qui implique l'installation d'un ascenseur pour prendre en charge les personnes à mobilité réduite.
L'intégration d'un tel dispositif est difficile. Un ascenseur est clairement incompatible avec l'idée qu'on se fait d'une tour romaine. Pour que la tour garde sa crédibilité le plus longtemps possible aux yeux d'un visiteur, il faut que l'ascenseur soit invisible de l'extérieur. Il faut ensuite qu'il soit le plus discret possible vu de l'intérieur de la tour.
Pour qu'il soit invisible de l'extérieur, on peut essayer de le caser dans un coin de la façade fermée (dessin 2-18), recouverte de peaux. Pour libérer de l'espace pour la circulation des visiteurs à pied, on peut décaler les escaliers sur un côté du noyau central vers la façade opposée. Les espaces et dégagements sont suffisants. L'ascenseur est invisible de l'extérieur, et discret de l'intérieur si on recouvre la cage d'ascenseur par des panneaux ou lambris en bois.
Cependant, au denier étage, cette disposition d'ascenseur occupe de l'espace au niveau de la périphérie, espace pourtant privilégié sur le plan historique (poste d'arme pour les légionnaires) et sur le plan touristique (point de vue sur le panorama).



dessin 2-18 : ascenseur en façade

On préfère donc libérer totalement la périphérie du dernier étage. Pour cela il faut réussir à installer l'ascenseur en position centrale. C'est possible en augmentant les dimensions du noyau central et en insérant l'ascenseur entre les deux escaliers (dessin 2-19).
Sa position au centre de la tour garantit une bonne discrétion vis à vis de l'extérieur, peut être pas l'invisibilité totale. Cette solution libère totalement la périphérie de la tour.



dessin 2-19 : ascenseur en position centrale

Cette dernière solution avec ascenseur central parait intéressante. L'ascenseur doit avoir les dimensions minimales suivantes : profondeur > 1,30m, largeur > 1m, porte d'entrée de largeur > 0,80m. Les dimensions globales de la tour doivent donc être augmentées pour permettre l'insertion de l'ascenseur.

Cependant, si cela est considéré comme trop dommageable vis à vis de l'image « romaine » qu'on veut donner à la tour, il faut chercher à savoir dans quelle mesure une dérogation est possible pour obtenir l'autorisation de ne pas prévoir l'accès et l'ascension de la tour aux personnes handicapées, aux enfants en poussette, aux personnes âgées…On peut prévoir notamment un système de compensations pour les personnes à mobilité réduite (par exemple prévoir des activités telles que des simulations virtuelles dans un autre bâtiment). A cette condition, nous pouvons continuer l'étude sans l'ascenseur, avec les dimensions établies précédemment.

Avant de continuer et de parler des assemblages et des finitions, on peut s'arrêter un moment et visualiser la structure de la tour (image 2-5)

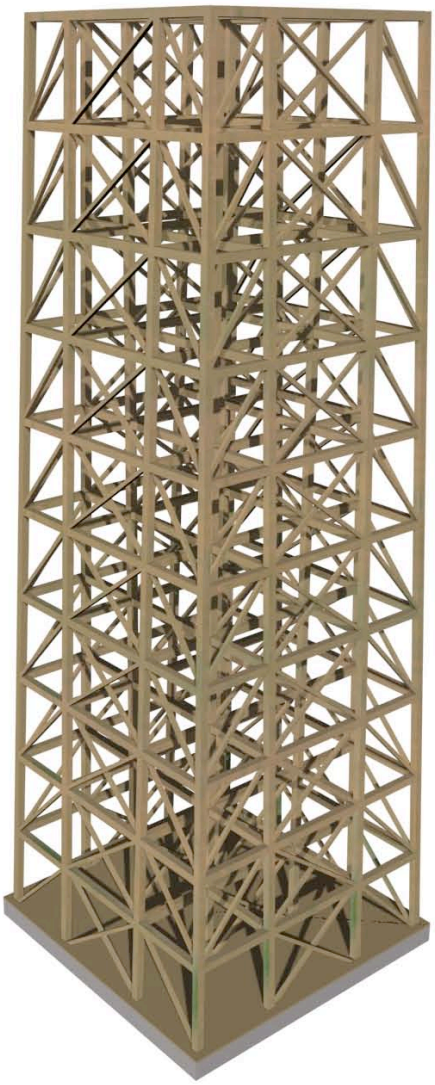


image 2-5 : vue 3D de la structure de la tour.

Sur cette vue, l'inclinaison des façades est un peu écrasée par la perspective. Cependant la structure poteau-poutre, les contreventements et la standardisation sont sur cette image bien mis en évidence.

2.2. Les assemblages

les assemblages romains

Concernant les assemblages de la tour, deux solutions sont envisageables. La première consiste à assembler des poutres non équarries, liées entre elles par des cordages ou lanières de cuir. Cette solution est certainement la plus rapide à mettre en œuvre, mais elle donne des assemblages moins précis et moins robustes. La deuxième solution consiste à assembler des poutres équarries à l'aide de scies en long ou de doloires (haches d'équarrissage, de *dolobra*, hache, Jean Pierre Adam, la Construction Romaine). Les surfaces de contact entre les éléments étaient alors bien planes et pouvaient concorder suffisamment pour réaliser des assemblages plus sophistiqués. Jean Pierre Adam décrit avec précision dans « la construction romaine » les assemblages que les romains maîtrisaient. Ils correspondent finalement aux assemblages de charpente traditionnelle utilisés pendant les siècles suivants jusqu'à très

récemment. Il s'agit des mi-bois, des tenons et mortaises, des embrèvements, des traits de Jupiter, des queues d'aronde etc. Si besoin, les assemblages pouvaient également être renforcés par des chevilles en bois ou métalliques. Cette deuxième solution demandait un gros travail supplémentaire par rapport à la première.

Etudions d'abord les reconstitutions d'ouvrages militaires romains qui ont déjà été réalisées et quelles options ont été choisies pour les assemblages.

Les assemblages de la reconstitution de l'archéodrome de Beaune.

Une reconstitution des fortifications romaines de la bataille d'Alésia a été réalisée à l'archéodrome de Beaune. Ces fortifications comprenaient deux lignes de fortification constituées de palissades en bois d'où s'élevaient régulièrement sur environ 30km des tours de 3 étages d'une dizaine de mètres de hauteur.
Là, la majorité des poutres de la reconstitution ne sont pas équarries. (voir les photos 2-1 à 2-4 plus bas). Quelques assemblages sont réalisés en mi bois et tenons et mortaises, renforcés par des cordages et par des clous. Les autres, la grande majorité, ne sont réalisés qu'avec des cordages. Les assemblages sont donc vraiment rudimentaires, signe que les constructions avaient vraiment été réalisées le plus rapidement possible.
Les sections des pièces de bois sont faibles, c'est pourquoi les poteaux sont réalisés par le groupage de 4 troncs attachés par des cordes.

photo 2-1 : vue générale des fortifications de l'archéodrome de Beaune

photo 2-2 assemblages (en cordage, ici en nylon)au niveau des poteaux et du plancher

photo 2-3 poteaux réalisés par le groupage de 4 poutres en bois

photo 2-4 plancher réalisé par clayonnage (et non par des planches de bois)

Par ailleurs, l'architecte italien Scamozzi a dessiné au XVIIème siècle une représentation (image 2-6) du pont construit sur le Rhin par les légions de César pendant la campagne contre les germains en –55 av.J-C.

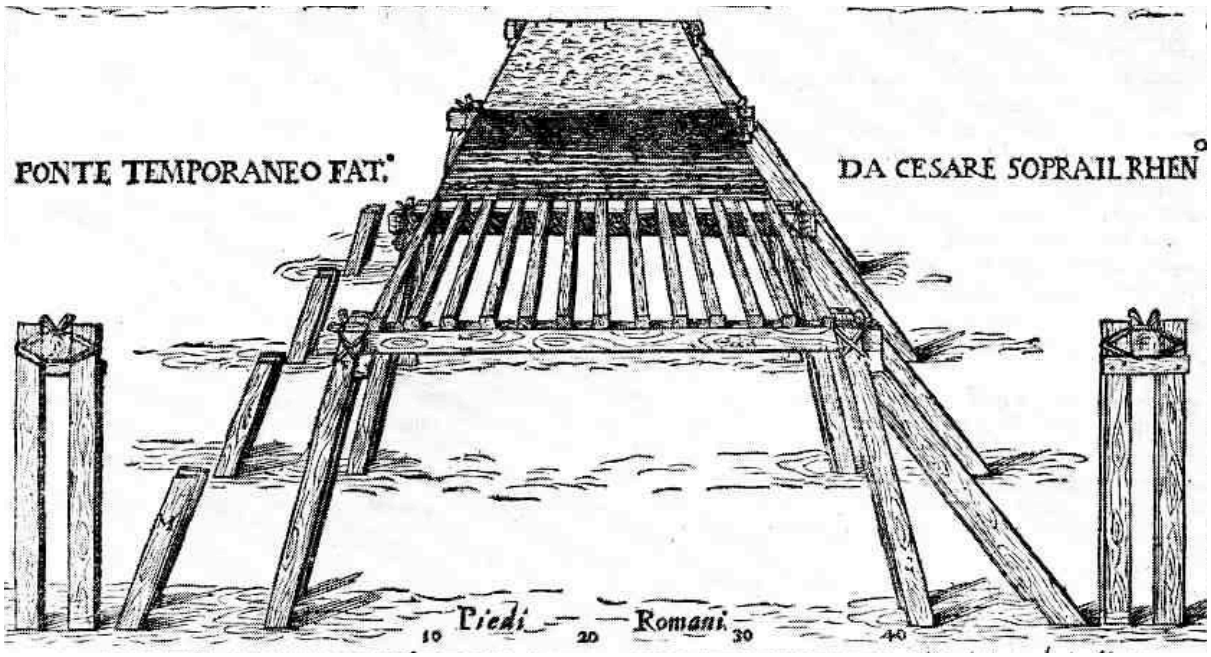


image 2-6 : Reconstitution de Scamozzi du pont construit par César sur le Rhin

Contrairement aux ouvrages d'Alésia, le pont est réalisé à partir de poutres équarries, ce qui n'a pas empêché les légions de le construire en un temps record, puisque César parle d'un délai de 10 jours pour sa réalisation (La Guerre des Gaules). Les poutres sont liées entre elles

par des cordages ou des lanières en cuir. Sans doute les assemblages étaient-ils aussi renforcés par des chevilles métalliques.

Enfin, nous disposons d'une dernière représentation d'ouvrage militaire en bois. Il s'agit d'un bas relief (image 2-7) sur la colonne de Trajan à Rome, qui représente un pont de plus de 1000m de long construit par Apollodore de Damas pour les légions de Trajan en +100 ap. J-C sur le Danube lors de la campagne contre les Daces.

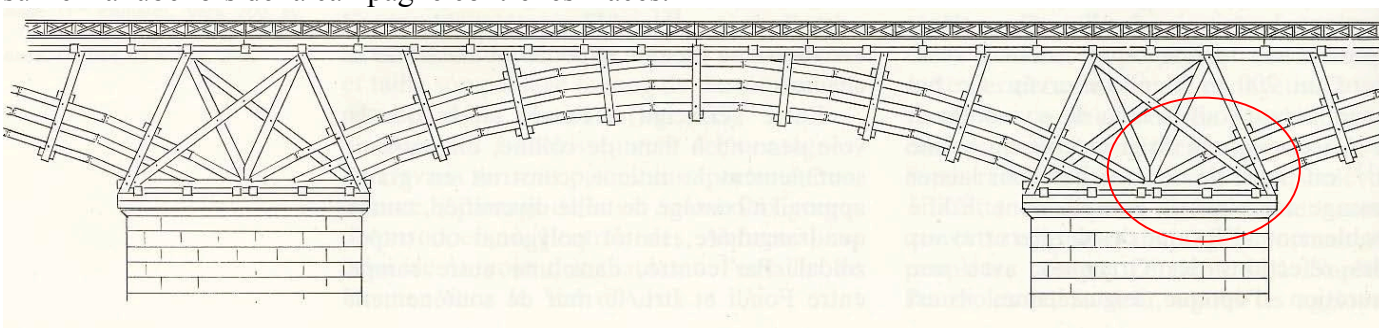


Image 2-7 : Pont construit sur le Danube lors de la campagne contre les Daces, bas relief de la colonne Trajane

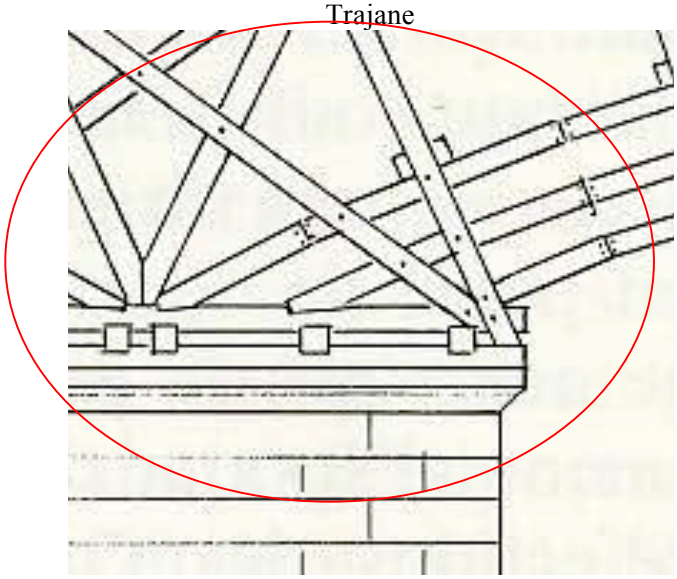


image 2-7 bis : détail d'assemblage du pont de la colonne Trajane

Là encore, les poutres en bois sont équarries. Par ailleurs, on distingue cette fois nettement des chevilles métalliques aux assemblages (image 2-7 bis).

Quelle option doit on reconduire pour la reconstitution de la tour d'Uxellodunum ?

Si les romains n'avaient pas pris le temps de réaliser l'équarrissage ni des assemblages plus sophistiqués à Alésia, pourquoi l'auraient-ils fait à Uxellodunum ?
A Alésia, l'ampleur des travaux n'a rien à voir avec Uxellodunum. A Alésia, la circonvallation et la contrevallation s'étendaient sur près de 30km, et comprenaient des travaux de terrassement pour les fossés et l'agger (talus supportant les palissades), des travaux pour les pièges, des travaux pour la construction de la palissade proprement dite, et enfin pour la construction des nombreuses tours. Ainsi, la masse de main d'œuvre considérable était répartie pour une masse de travaux non moins considérable, le tout dans l'urgence et sous la menace de sorties gauloises, le sort de la guerre n'étant pas encore joué, et les gaulois étant en supériorité numérique. Seules les pièces où les assemblages demandaient une certaine sophistication étaient équarries. Les tours étant de dimension modeste (une dizaine de mètres

de hauteur, pour une plate-forme de 3m x 3m), elles n'exigeaient finalement que peu de sophistication.
A Uxellodunum, la somme globale des travaux est beaucoup moins importante et la tour constitue l'ouvrage principal, qui pouvait donc accaparer pour lui une main d'œuvre très importante. La situation se rapproche donc plus de celle des ponts du Rhin et du Danube.
De plus, ses dimensions exceptionnelles (entre 20 et 30m de hauteur) exigeaient des assemblage plus complexes et plus précis, et donc probablement l'équarrissage de ces pièces.
Enfin, dans ce contexte où la guerre est déjà jouée, et où les gaulois assiégés ne représentent plus une véritable menace, les romains avaient plus de temps et plus de main d'œuvre à disposition pour la réalisation de l'ouvrage.
On peut donc supposer que contrairement à Alésia la plupart des poutres étaient équarries, et les assemblages plus complexes, à tenons et mortaises ou mi bois, avec des chevilles en bois ou métalliques.

Les assemblages de la reconstitution

Pour la reconstitution, on s'autorise à employer des assemblages modernes avec notamment des plaques métalliques, du moment que les pièces modernes restent invisibles. Ces assemblages sont décrits précisément dans la troisième partie sur le dimensionnement.

2.4 Les finitions

Les façades

Comme les autres tours d'assaut de l'époque, la partie de la tour exposée aux tirs ennemis était très probablement protégée par des peaux de bêtes mouillées (pour la protection contre le feu), fixées sur des planches de bois.
On peut supposer que les peaux étaient des peaux de bœufs, comme les peaux qui recouvraient les boucliers, ces peaux provenant du bétail qui accompagnaient les légions en campagne. Par ailleurs, si à l'époque il s'agissait de véritables peaux de bête, il est difficile pour une construction moderne de mettre en œuvre autant de peaux de vaches ou autre. Cela évoquerait en effet un peu trop un carnage. Sans doute faudra-t-il tendre à la place des « peaux » dans un textile imprimé dont la forme et la couleur évoquent une peau de bête.
Cependant, des ouvertures doivent être ménagées à travers ces façades au dernier étage, pour permettre aux soldats romains de prendre position face à l'oppidum, mais également pour dégager la vue sur cette façade pour les visiteurs.

Les autres façades ne sont pas protégées par le bardage. Pour l'accueil du public, il est donc nécessaire d'installer des garde-corps pour éviter la chute de visiteurs.
La dimension des gardes corps est réglementée. Pour coller à l'esprit de la structure, on propose qu'ils soient réalisés à partir de planches de bois clouées horizontalement à l'extérieur de la structure. Leur hauteur doit être de 1 m minimum, et l'espacement entre deux planches horizontales doit être de 18 cm minimum. Ces garde-corps sont représentés sur les vues 3D de la tour à la fin de la sous partie sur les finitions (images 2–13 et suivantes).
Les escaliers doivent également être munis de gardes-corps, la différence étant cette fois qu'ils doivent seulement atteindre 0,9 m de hauteur.

Enfin, au pied de la tour, une entrée et une sortie doivent être ménagé pour les visiteurs. Il faut pour cela retirer une barre de contreventement. Les calculs montreront que les contreventements sont surabondants, on peut donc se permettre cette suppression nécessaire pour les accès à l'intérieur de la tour (image 2-16)

Occupation du dernier étage de la tour

D'après le plan réalisé, il existe au dernier étage un espace entre les deux escaliers que nous pouvons exploiter.

Quelle était l'occupation historique de la plate-forme sommitale ?

Les traductions de la Guerre des Gaules parlent de la présence de soldats romains, mais aussi d'artillerie au sommet de la tour, mais sans préciser quel était le type d'artillerie utilisé. S'agissait-il d'une artillerie légère de type archers ou frondeurs ? ou d'une artillerie plus lourde comportant des machines ? Et quel genre de machine ? Pour quels projectiles ? En effet les auteurs latins (César, Tacite, Orose…) citent plusieurs types de machines d'artillerie, les tormenta, les ballistae et les catapultae, chacune étant spécialisée dans le jet de un ou plusieurs types de projectiles.
Pour en savoir plus, il peut être intéressant de revenir aux sources latines, et d'étudier les textes relatant le siège d'Uxellodunum. En effet, les textes latins sont plus précis, et utilisent des mots différents pour chaque type d'armes et d'artillerie, ces mots étant ensuite souvent traduits indifféremment par artillerie dans les textes français.

Ainsi, dans *La Guerre des Gaules,* VIII, 40, on peut lire « Caesar *sagittaris funditoribus*que dispostis, *tormentis* etiam conlocatis, aqua fluminis prohibeat oppidanos ». Sagittaris signifie archers, funditor frondeur, et tormentum fait référence à une machine de jets, pouvant lancer tous types de projectiles (des pierres, des javelots, des brandons enflammés). La phrase est traduisible par : « César, au moyen d'archers et de frondeurs, et aussi de *machines d'artillerie de type tormentum*, interdisait aux assiégés l'accès à l'eau de la rivière », la rivière en question étant la Tourmente, à laquelle les assiégés allaient chercher l'eau avant de s'approvisionner à la source une fois l'accès à la rivière empêché. Donc les légions présentes au siège comptaient bien dans leur rang une artillerie complète, à la fois lourde et légère, mais on ne sait pas encore qui était disposé au sommet de la tour, ni les projectiles lancés par les tormenta.

Pour cela, nous sommes éclairés par un deuxième passage de *La Guerre des Gaules :* (VIII, 40) : « Ex ea cum tela tormentis iacerentur ad fontis aditum » : aidés par des traits (ou javelines) lancés vers la source par des tormenta du haut de celle-ci (la tour) .
Ce passage confirme la présence de tormenta au sommet de la tour pour atteindre la source, et surtout nous renseigne sur la nature des projectiles : ce ne sont ni des pierres, ni des brandons enflammés, mais des « telum », c'est à dire des traits de la taille d'une javeline. Une telle machine de guerre peut éventuellement être installée entre les deux escaliers de la reconstitution.

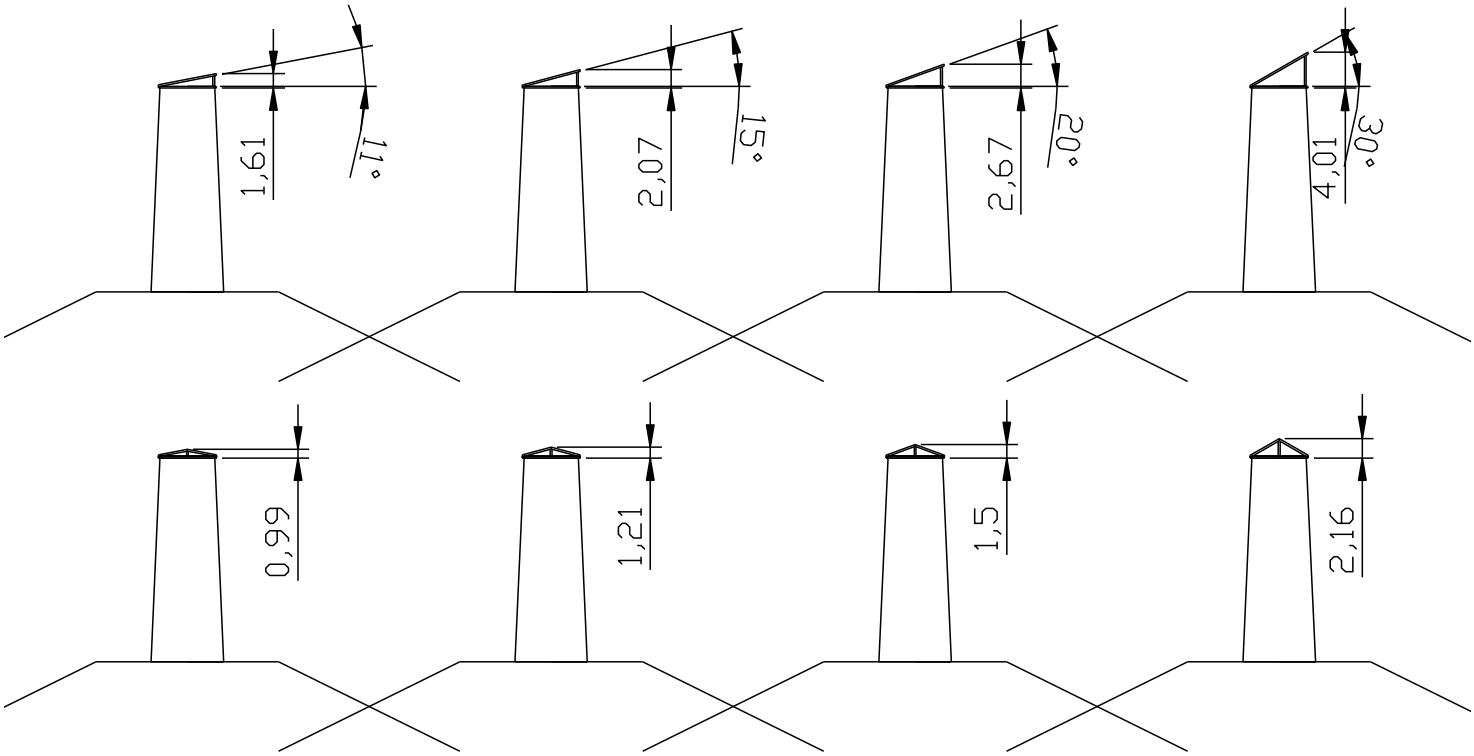
Le toit

La plate-forme supérieure de la tour était atteignable par les tirs gaulois, il est fort probable qu'elle était protégée par une toiture. Cette toiture aura l'avantage dans la reconstitution de servir de protection contre la pluie pour les visiteurs, et de protection contre l'humidité pour les éléments en bois de la tour.

Il reste à définir les paramètres de la toiture, à savoir :
- le revêtement
- le nombre de pentes

- l'inclinaison des pentes

Tout revêtement ou couverture du toit en tuiles ou ardoises est interdit pour d'évidentes raisons historiques. Un revêtement discret et efficace contre l'humidité est le revêtement par bardeaux bituminés.
La réglementation pour la construction avec des bardeaux bituminés est donnée dans le DTU 40.14.
Les toitures à 4 pentes ou plus sont trop compliquées géométriquement et n'apportent rien sur le plan militaire. C'est pourquoi le choix se fera entre une toiture à pente unique et une toiture à double pente.
L'inclinaison ne doit pas être trop grande pour ne pas que la toit soit trop haut et n'offre trop de prise au vent ou aux flèches/frondes gauloises. Elle doit être suffisamment importante pour permettre l'écoulement de l'eau et éviter les poches de stagnation d'eau, à l'origine du pourrissement du bois.
Pour une couverture avec bardeaux bituminés, la pente minimum est de 20% (11,3°). Le dessin 2-20 ci dessous montrent l'apparence des tours pour les deux types de toiture avec des angles allant de 11,3° à 30°.

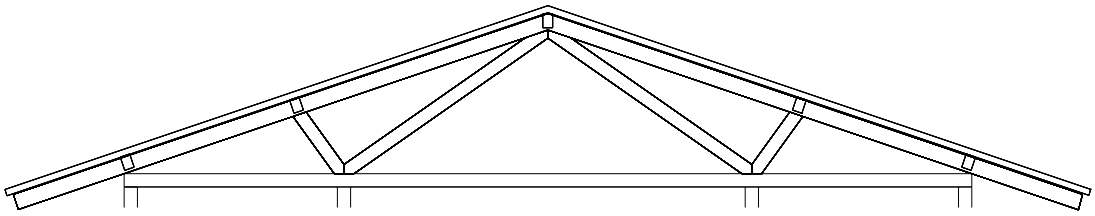


dessin 2-20 : toitures à pente unique et à double pente pour des pentes de 11,3°, 15°, 20°, et 30°

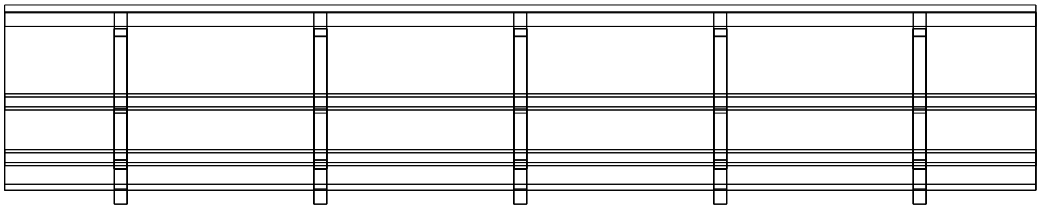
Les pentes de 30°, surtout pour le toit à pente unique, impliquent une hauteur de toit trop haute.
La réalisation des toits à pente unique en général s'avère difficile aussi à cause de la longueur des chevrons qu'elle demande. Les solutions les plus simples et élégantes sont finalement les solutions à double pente, avec une inclinaison de 15 ou 20°, qui correspondent à des hauteur de toit respectivement de 1,2m et 1,5m. Nous choisissons une pente de 15°.

Pour protéger également le pied de la tour de la pluie, la toiture doit déborder de chaque côté de la tour.

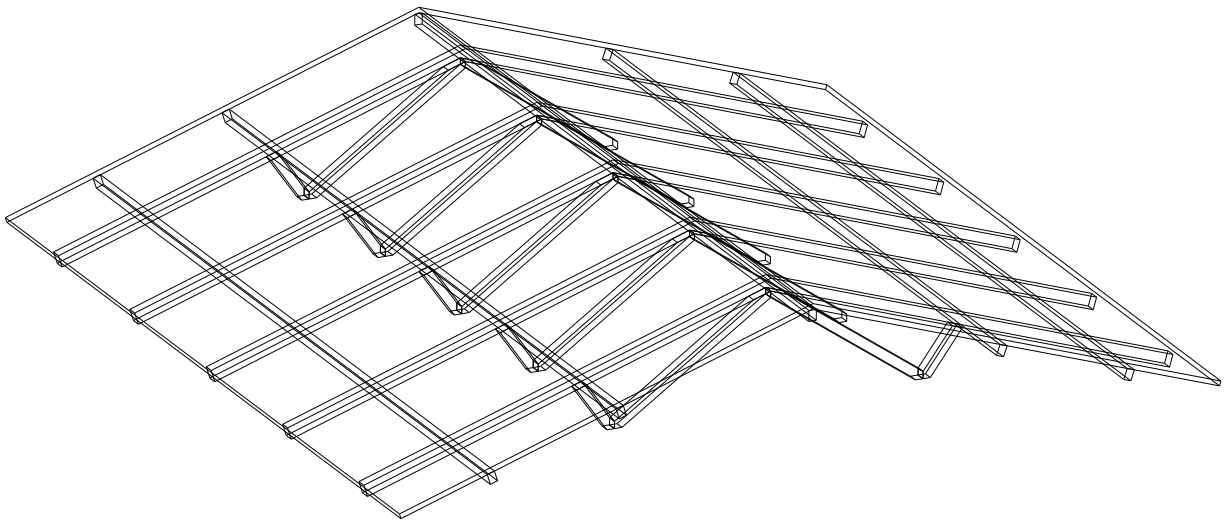
Du point de vue de la structure du toit, et pour profiter des appuis intermédiaires des poteaux de la tour, il est possible de prévoir des fermes en w (dessin 2-21 à 2-23).



dessin 2-21 : ferme de charpente en W



dessin 2-22 : charpente constituée de 5 fermes successives



dessin 2-23 : vue 3D de la toiture.

La toiture est donc soutenue par une série de 5 fermes en W. Exceptée la ferme du milieu, les fermes reposent sur les poteaux de la tour.
Avant de passer au dimensionnement et aux calculs justificatifs de la structure, regardons l'apparence de la tour.
Les premières images (2-9 à 2-11) sont une insertion de la tour dans le relief du Puy. Il faut s'imaginer que le Puy d'Issolud culmine encore à 100 m d'altitude supplémentaires au dessus ce qui est représenté sur les images.

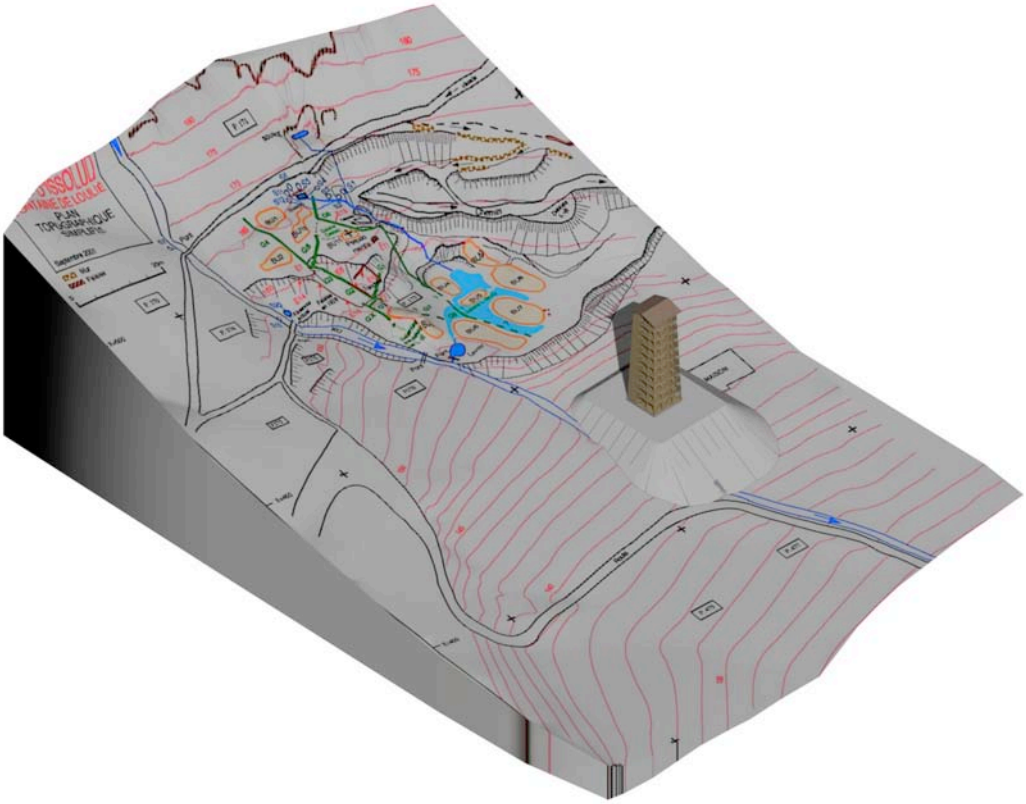


image 2-9

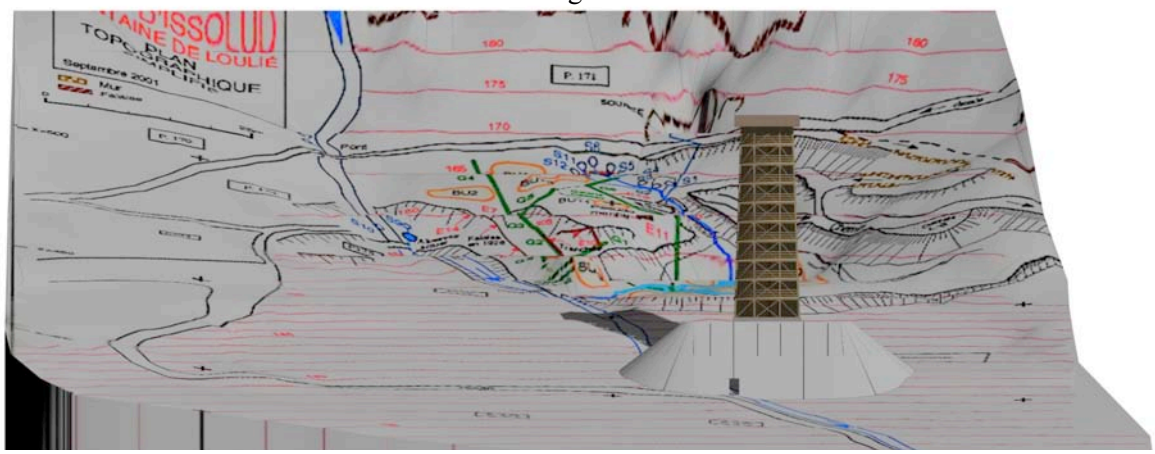


image 2-10 : élévation nord-sud

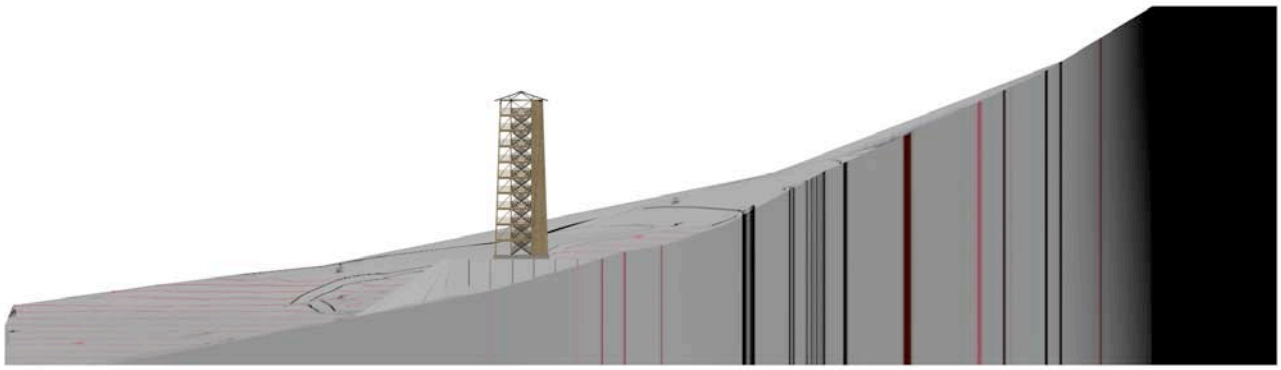


image 2-11 : élévation ouest-est

image 2-12 : perspective de la tour sur son remblai, face au Puy d'Issolud

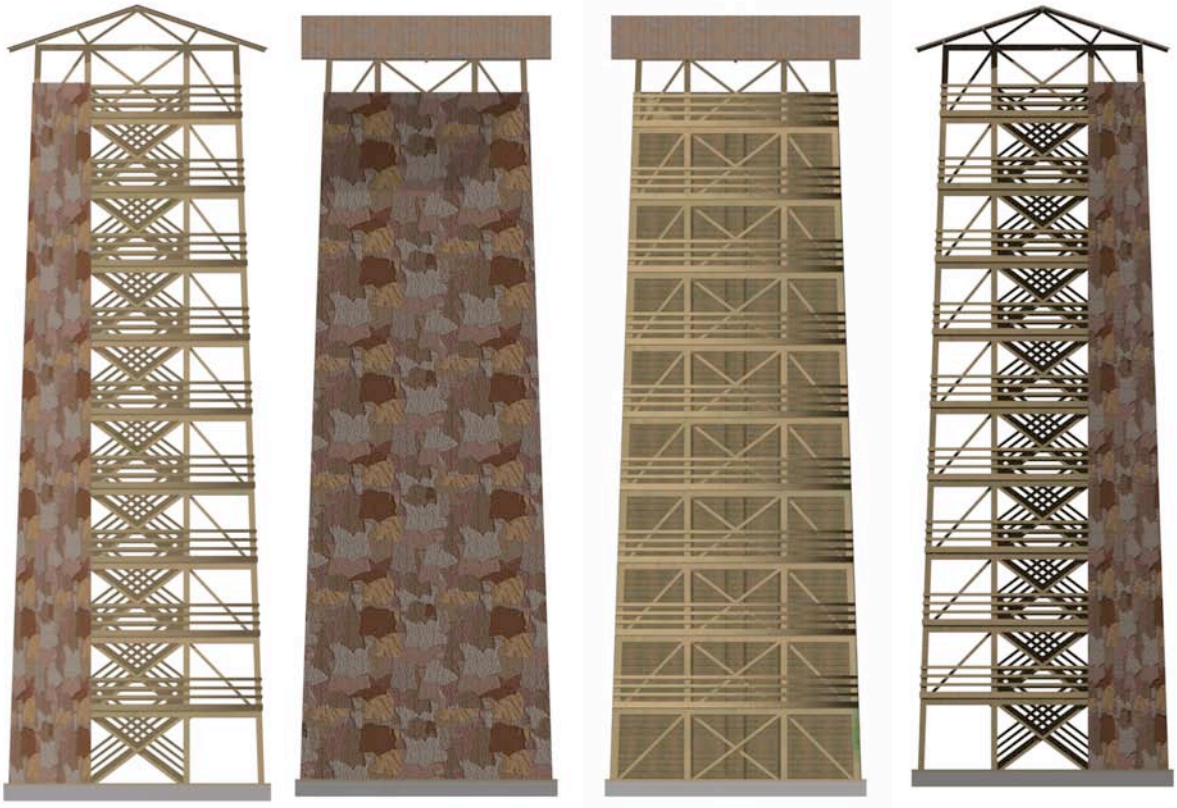


image 2-13 : élévations des façades nord, est, ouest et sud

Pour mieux se représenter la conception de la tour et l'agencement des éléments en bois, on peut la dépouiller successivement comme des poupées russes pour arriver jusqu'au noyau central (images 2-14 et 2-15)

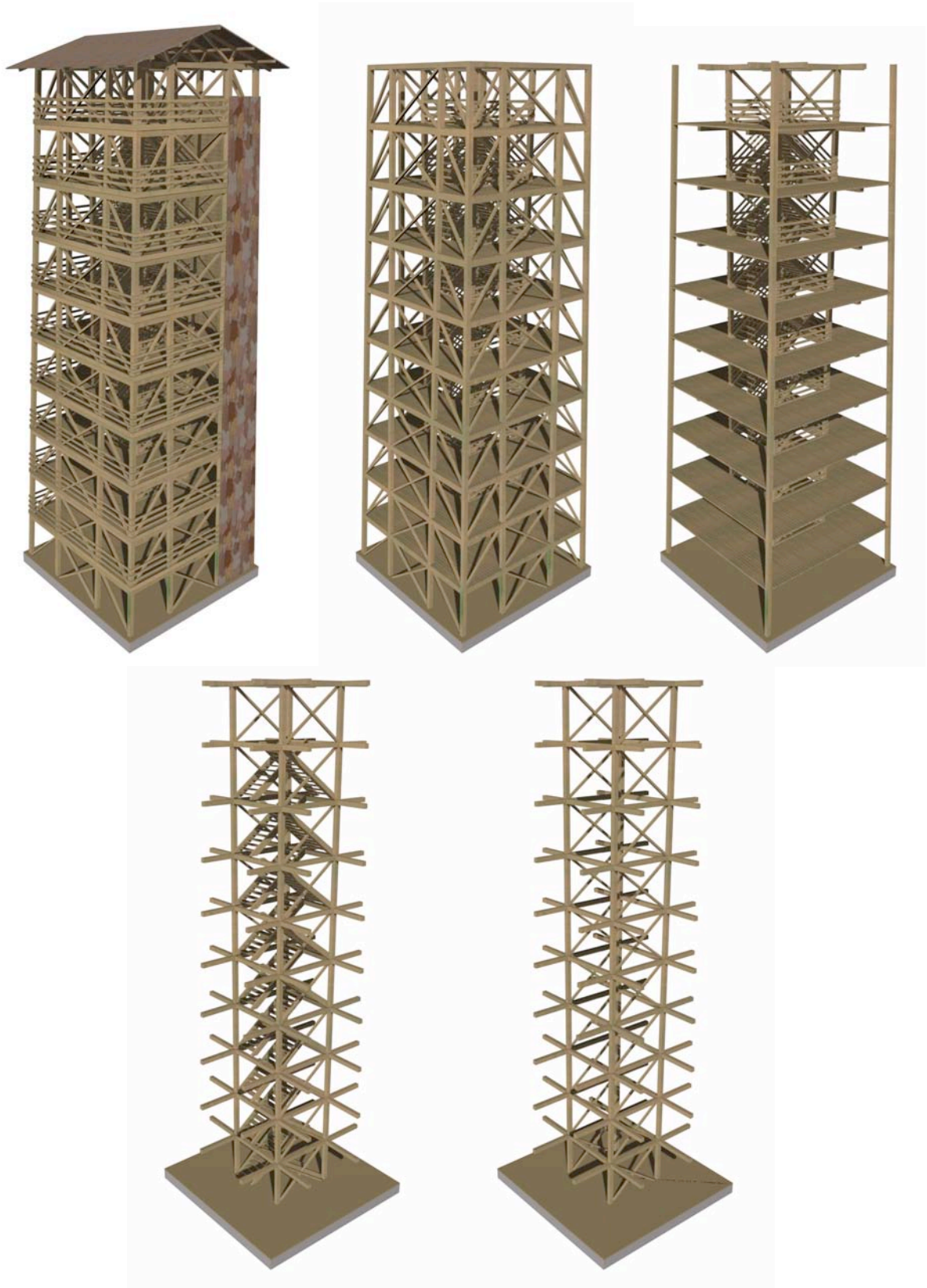


image 2-14

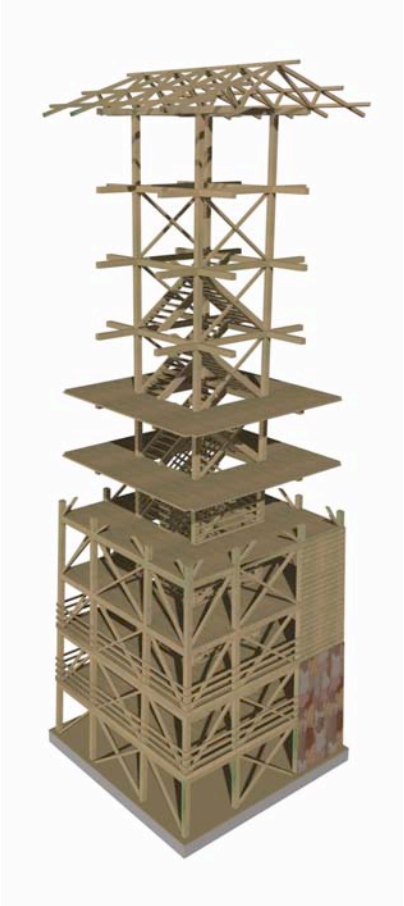


image 2-15

Enfin, on peut finir cette galerie d'images de la tour par des images prises avec le point de vue du visiteur, à l'entrée de la tour (image 2-16), à son arrivée au pied de la cage d'escalier (image 2-17), pendant l'ascension (image 2-18), et à son arrivée au dernier étage (image 2-19).

image 2-16

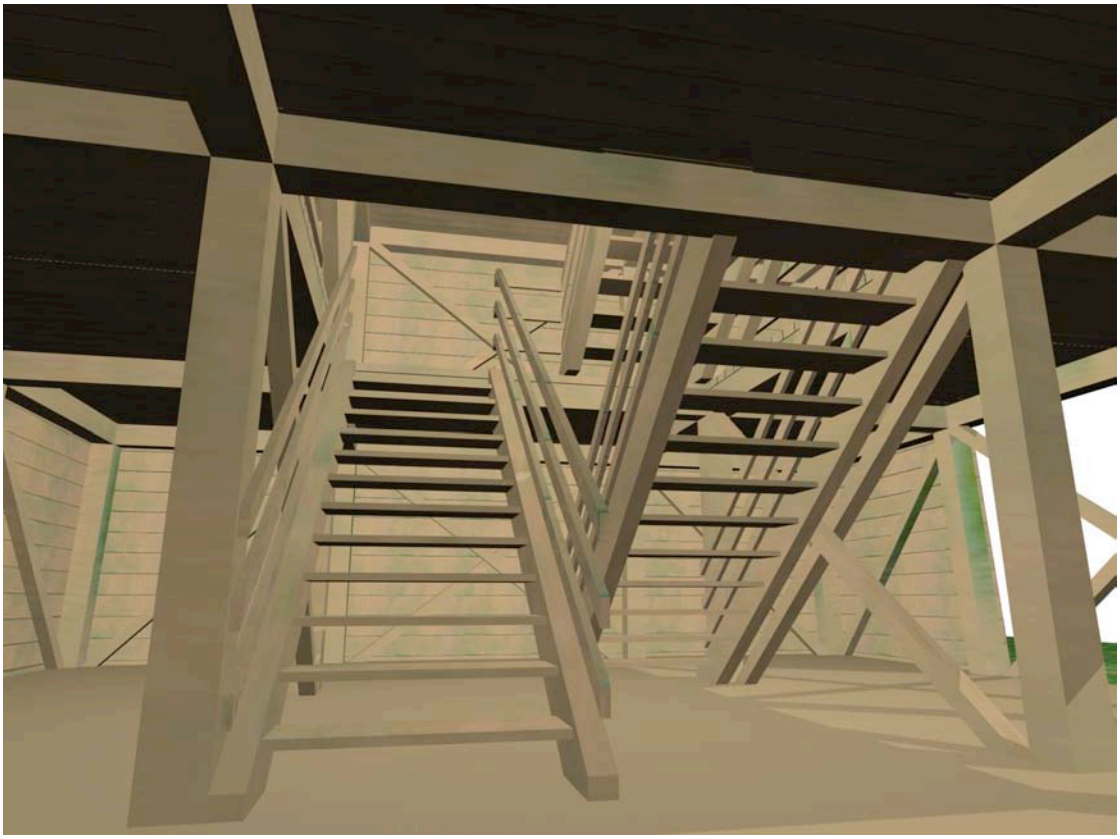


image 2-17

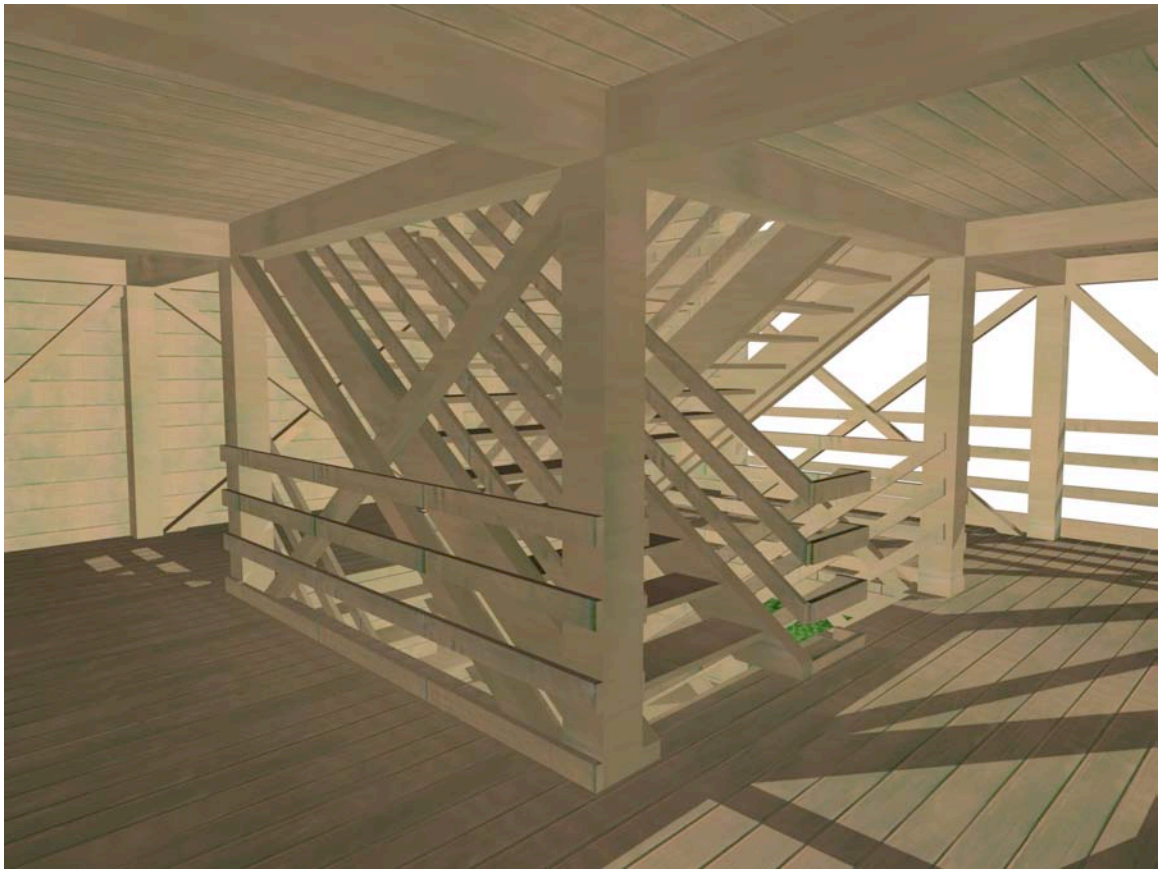


image 2-18

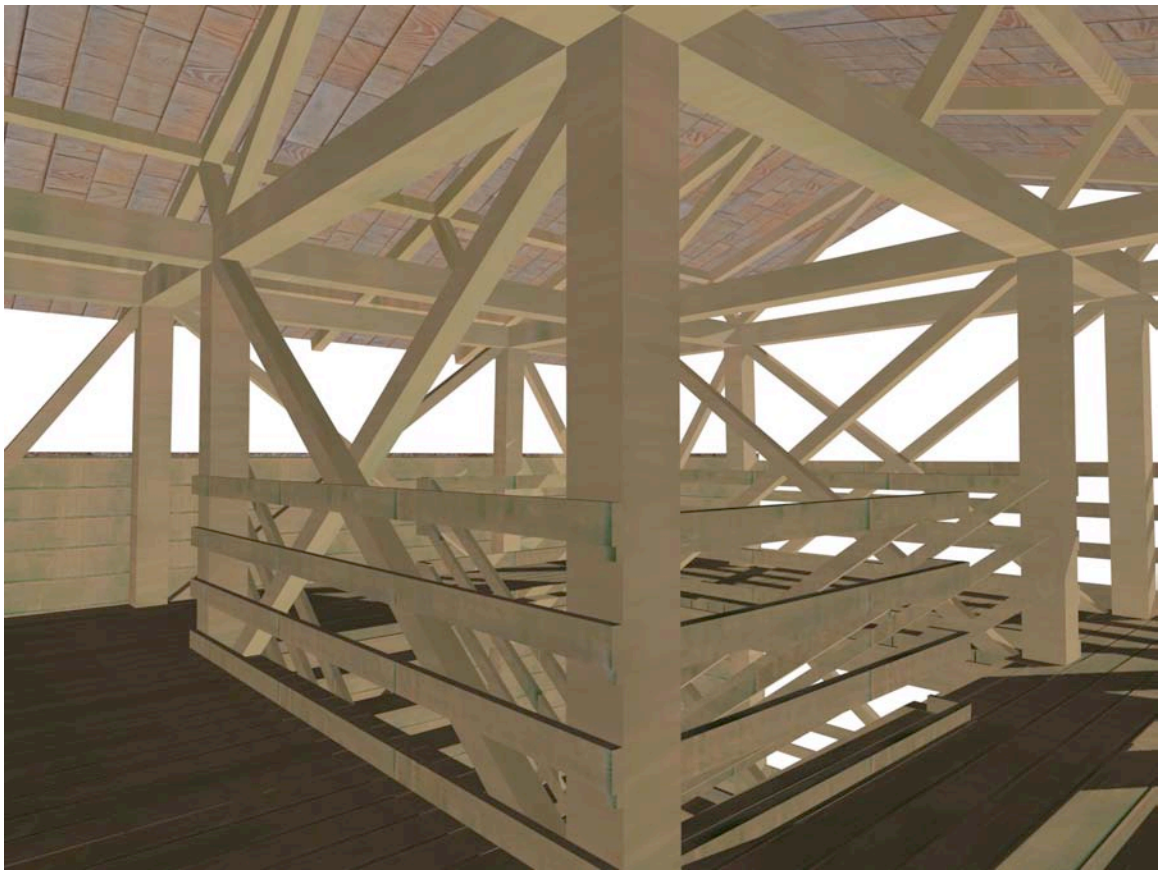


image 2-19

3. Dimensionnement et note de calcul

3.1 Modélisation

La tour est modélisée avec les logiciel Robot Millenium en tant que structure 3D à barres.
Le matériau est le chêne, nous le classerons donc dans la catégorie des feuillus D35 de la norme NF EN 338 préconisée dans l'Eurocode 5. Le matériau aura donc les caractéristiques mécaniques suivantes (tableau 3-1) :

Masse volumique	560 kg/m3
Module d'élasticité E0.05	8700 MPa
f m,k	35 MPa
f t,0,k	21 MPa
f t,90,k	0,6 MPa
f c,0,k	25 MPa
f c,90,k	8,4 MPa
f v,k	3,4 MPa
G	650 MPa

Tableau 3-1

Où m correspond à la résistance à la flexion, t à la traction, c à la compression, et v au cisaillement.
0 correspond à une à une sollicitation dans le sens du fil du bois, 90 perpendiculairement au fil du bois.

Par ailleurs, le chêne est un bois qualifié de naturellement durable face aux attaques de champignons et insectes , de classe de résistance 3 sans traitement préventif s'il est purgé d'aubier, ce qui est le cas ici. Il ne demande pas d'entretien régulier, sauf si on veut éviter qu'il ne perde sa couleur et vire au gris. Dans ce cas il faut y passer une couche de lasure.

Comme on l'a dit, les éléments en bois de la tour sont standardisés un maximum pour faciliter et accélérer la construction. Ainsi, les éléments de structure sont de 3 types différents :

- les poteaux: courant chacun sur deux étages, de section 20 cmx20 cm.
- les poutres : éléments horizontaux de section 20 cmx20 cm.
- les éléments de contreventement : éléments obliques de section 10 cmx10 cm.

Toutes les liaisons seront modélisées par des rotules, étant donné la difficulté de réaliser des assemblages suffisamment rigides pour constituer des encastrements.

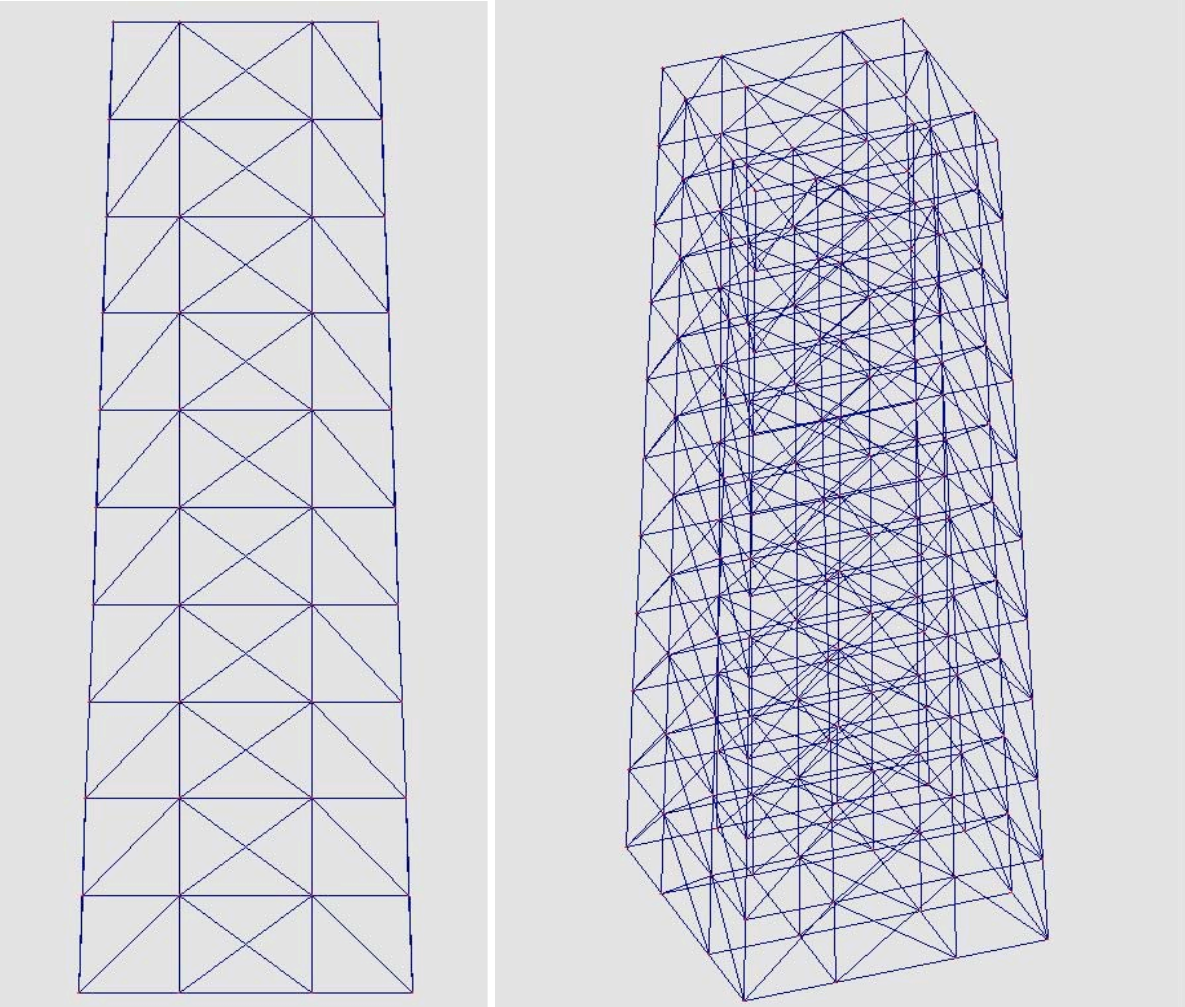


image 3-1 : vues 2D et 3D de la modélisation Robot

La justification du dimensionnement sera réalisée selon les Eurocode 0 (sollicitations) et 5 (calcul des structures en bois).

3.2 Sollicitations

- les charges permanentes : de la structure, du toit et du plancher

La masse volumique du chêne D35 est de 560 kg/m3.

- les charges d'exploitation : dues aux visiteurs

Il s'agit d'un établissement recevant du public, les étages ne servent uniquement qu'aux circulations et escaliers. On prend donc une charge d'exploitation de 2,5 kN/m2.

- les charges climatiques : le vent (tableau 3-2)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4
q0 en site normal (daN/m²)	50	60	75	90
q0 en site exposé (daN/m²)	67,5	78	93,8	108

tableau 3-2

Le lieu de d'implantation de la tour est situé dans le Lot, en zone 2 sur la carte des vents. Situé en site normal (pas particulièrement exposé), il faut prendre une force surfacique de vents de 0,6 kN /m2.

- les charges climatiques : charges de neige (tableau 3-3)

Charges de neige	1A	1B	2A	2B	3	4
« Surcharge normale » pno (daN/m²)	35	35	45	45	55	80
« Surcharge extrême » p'no (daN/m²)	60	60	75	75	90	130
« Charge accidentelle » pna(daN/m²)	-	80	80	108	108	144

tableau 3-3

Le lieu de d'implantation de la tour est situé en zone 1B sur la carte des zones de neige.

- les charges climatiques : charges sismiques (image 3-2)

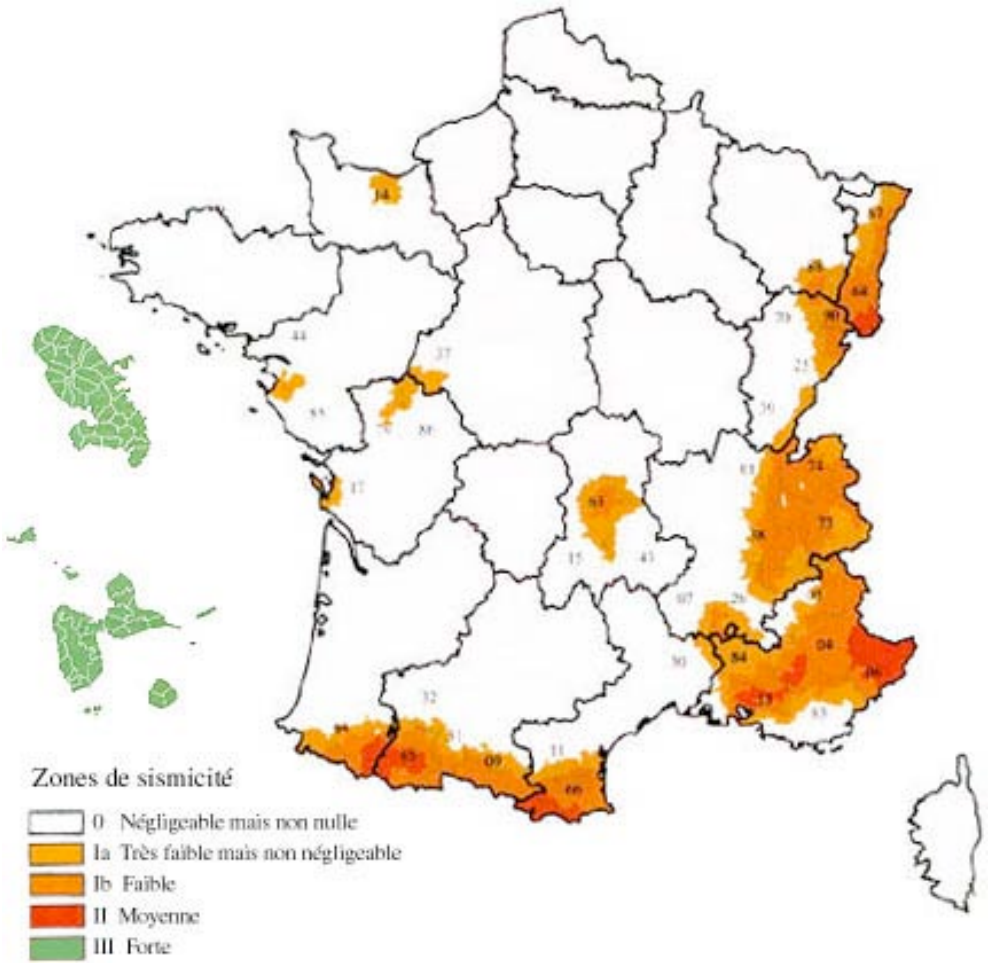


image 3-2

Le lieu de d'implantation de la tour est situé en zone 0 sur la carte des zones sismiques. Les contraintes sismiques sont négligeables, mais non nulles.

3.3 Calcul à l'état limite ultime ELU

Le calcul ELU se fera en 3 phases :

- Dimensionnement des barres par une analyse globale des efforts et contrainte dans la structure et dans les barres, vérification par rapport à la résistance élastique
- Stabilité au flambement pour les éléments en compression.
- Dimensionnement au niveau local par une étude de la résistance des assemblages.

Etude des efforts et contraintes dans les barres

Les contraintes de compression dans les barres doivent être inférieures aux contraintes de résistance en compression de calcul

$$f_{c,0,d} = k_{\mathrm{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M}$$

où
k mod est un facteur de modification qui tient compte de l'effet de la durée de la charge et de l'humidité. Pour du bois massif, en classe de service 2 (condition d'humidité intermédiaire) kmod = 0,6 pour des actions permanentes (poids propre) et 1,1 pour des actions instantanées (charges d'exploitation des visiteurs). On prendra k mod = 0,85.
ɣ M est un coefficient de sécurité propre au matériau. γ M = 1,3
fc,0,k est la résistance caractéristique de compression dans le sens du fil du bois. fc,0,k= 25 MPa.

fc,0,d= 16,3 MPa

Les contraintes de traction dans les barres doivent être inférieures aux contraintes de résistance en traction de calcul

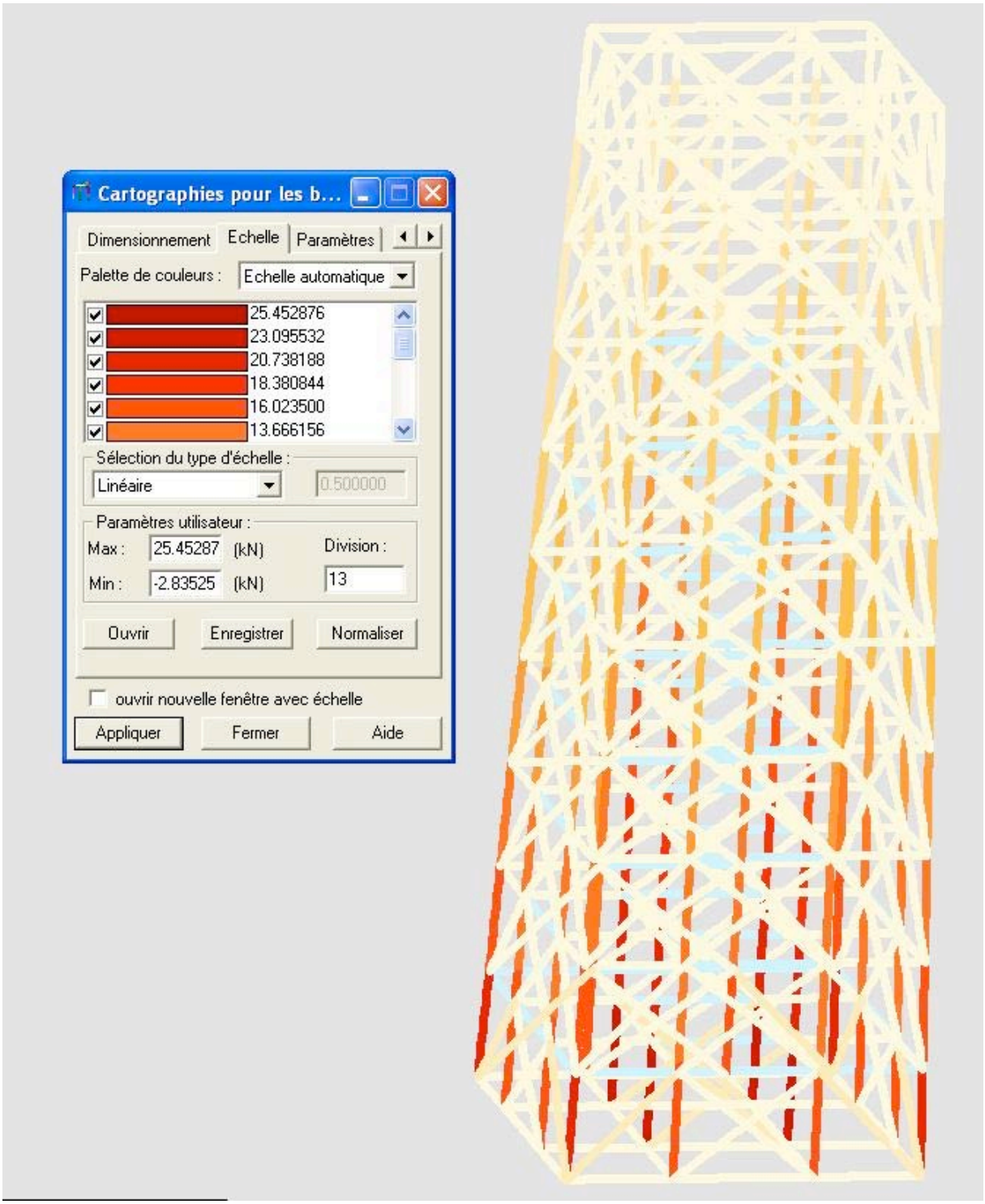
$$f_{t,0,d} = k_{\mathrm{mod}} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M}$$

où
ft,0,k est la résistance caractéristique de traction dans le sens du fil du bois. ft,0,k= 21 MPa.

ft,0,d= 13,7 MPa

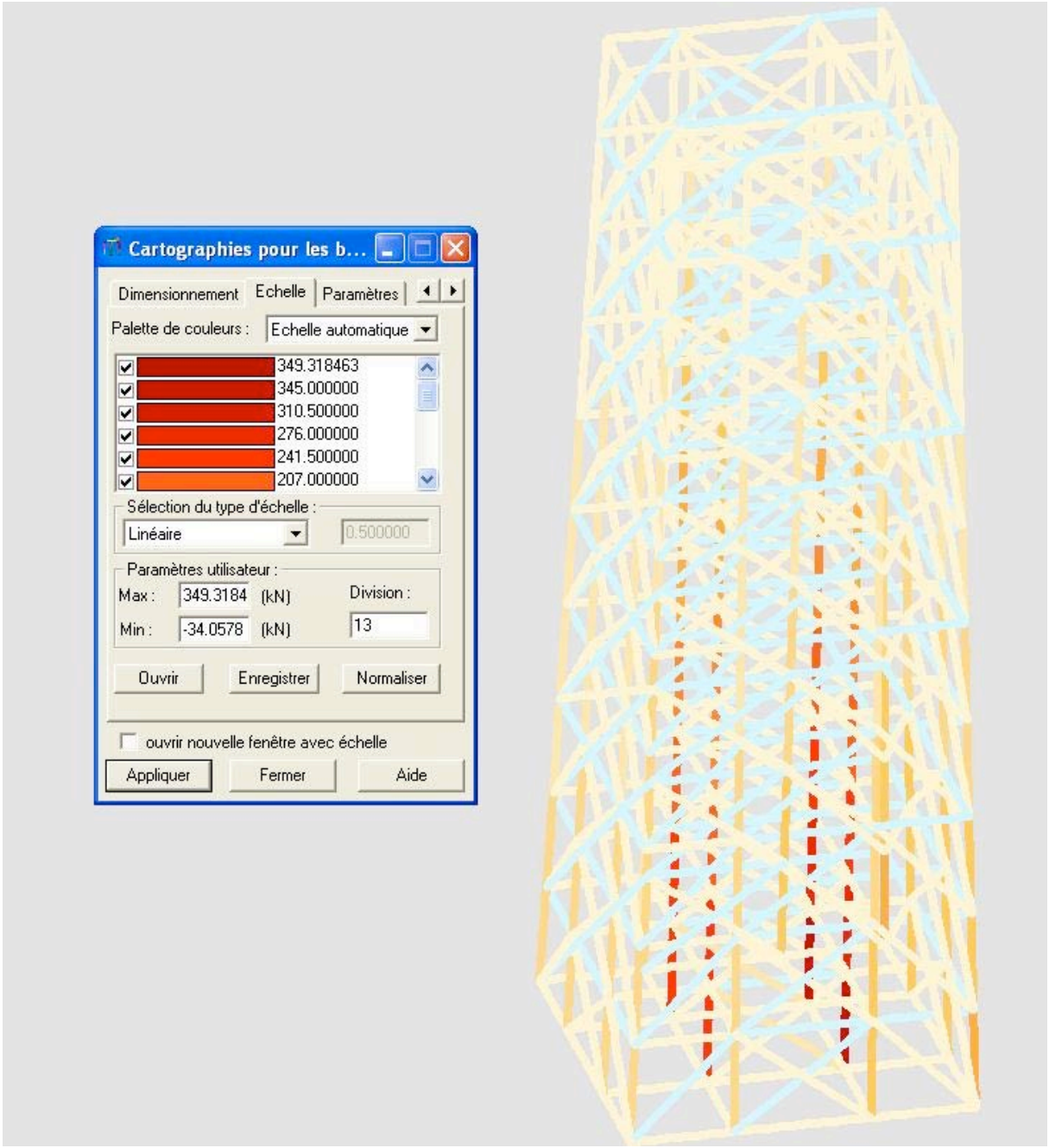
Résultats des calculs avec Robot Millénium

Le calcul avec Robot Millenium nous donne les résultats suivants (images 3-3 à 3-7) :



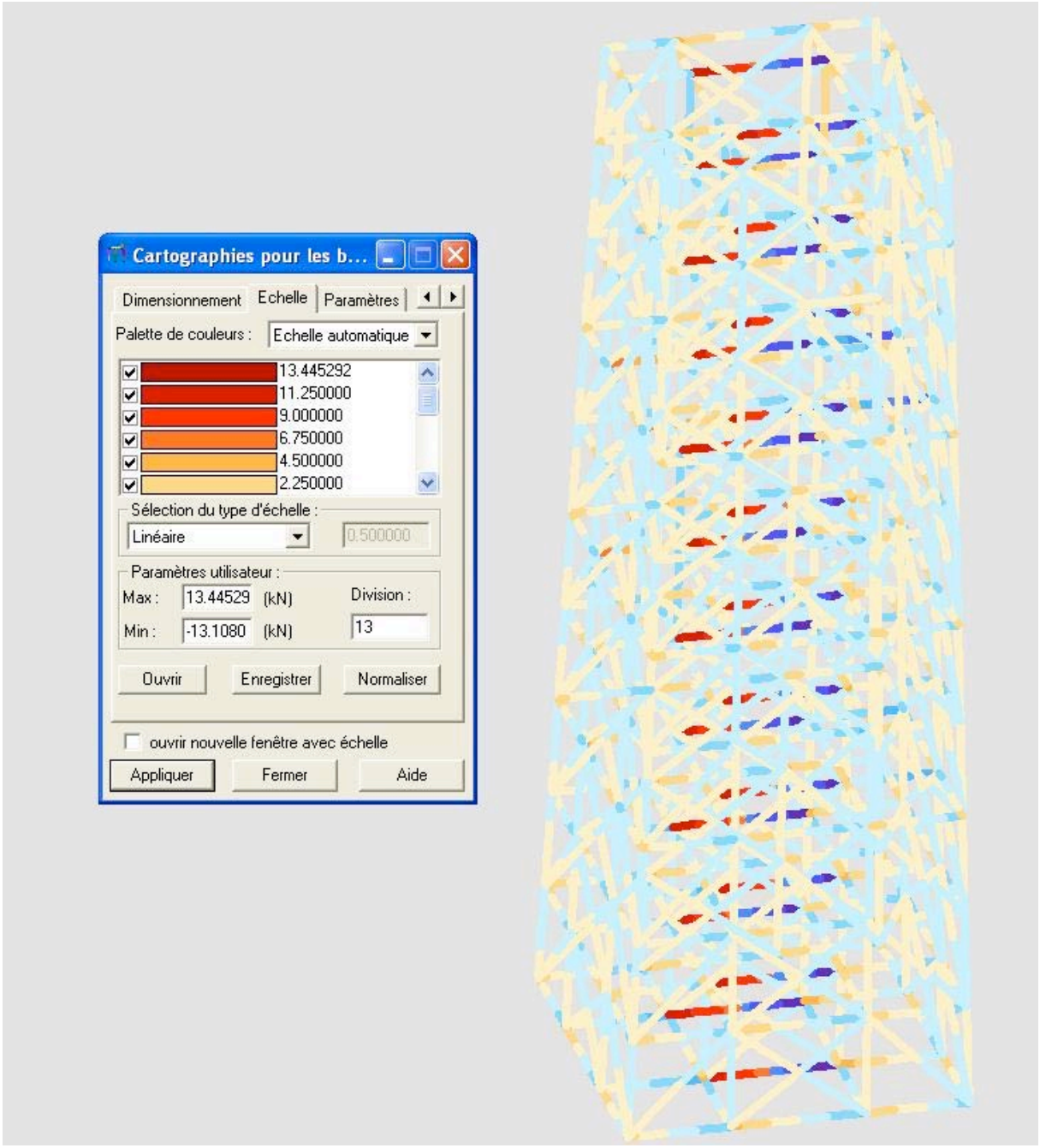
images 3-3 : effort normal dans les barres sous poids propre

La cartographie des efforts proposée par Robot montre des efforts dans les barres plus importants en bas de la structure. De plus, la descente de charge est la plus importante au niveau des 4 poteaux du milieu de la structure, ce qui est conforme à ce qui est prévu du fait de la disposition des planchers. La modélisation apparaît donc fiable.



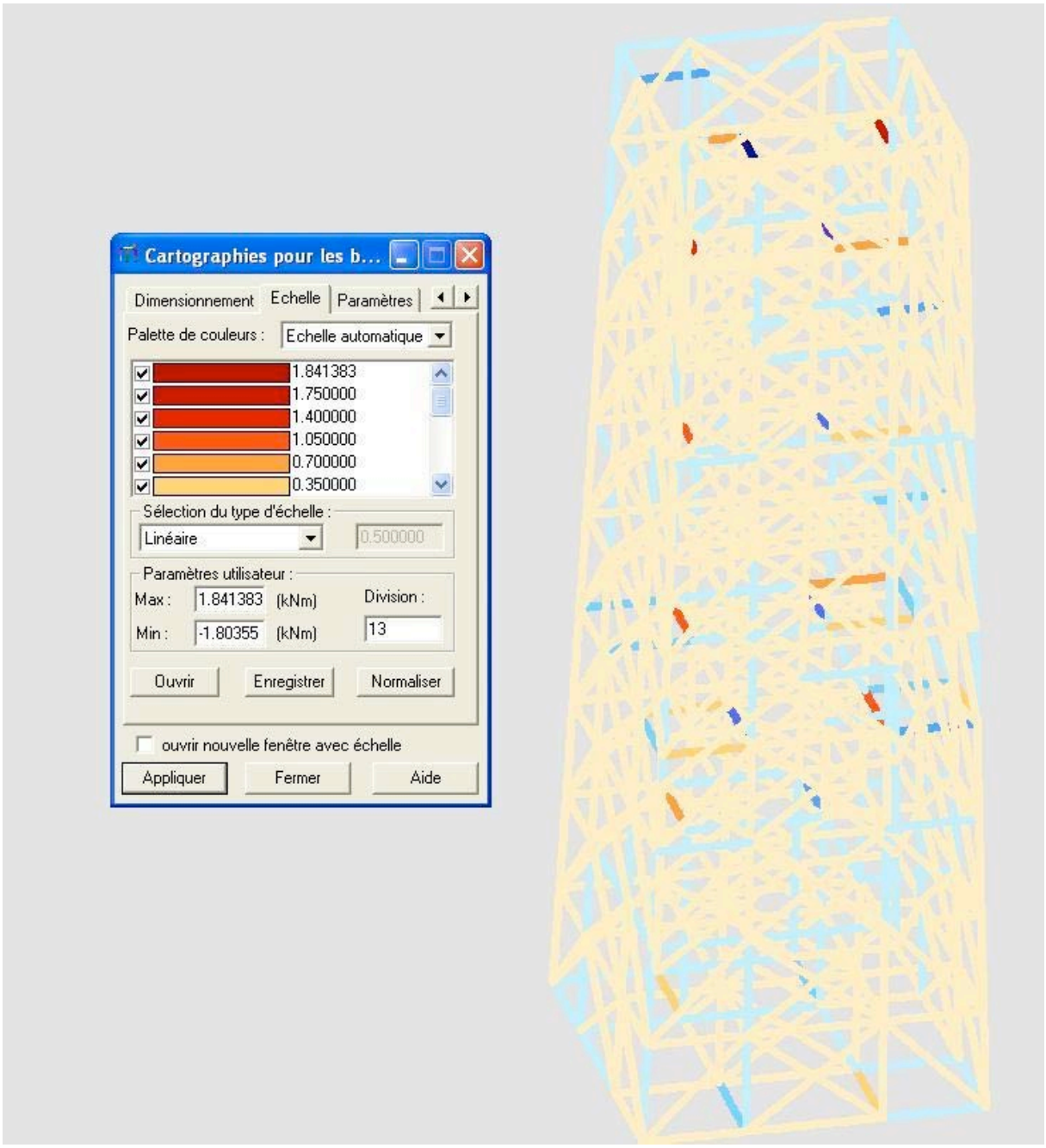
images 3-4 : effort normal dans les barres sous combinaison ELU (poids propre, exploitation et vent)

Sur le schéma, le vent va de gauche à droite. Logiquement, les poteaux de droite sont donc plus comprimés, tandis que le vent soulage les poteaux de gauche d'une partie de la descente de charge. On voit également clairement quelles barres de contreventement travaillent en compression vis-à-vis du vent et celles qui travaillent en traction.
Même si les barres de contreventement paraissent moins comprimées que les poteaux, il faudra étudier également leur stabilité au flambement car elles sont seulement de section 10x10.



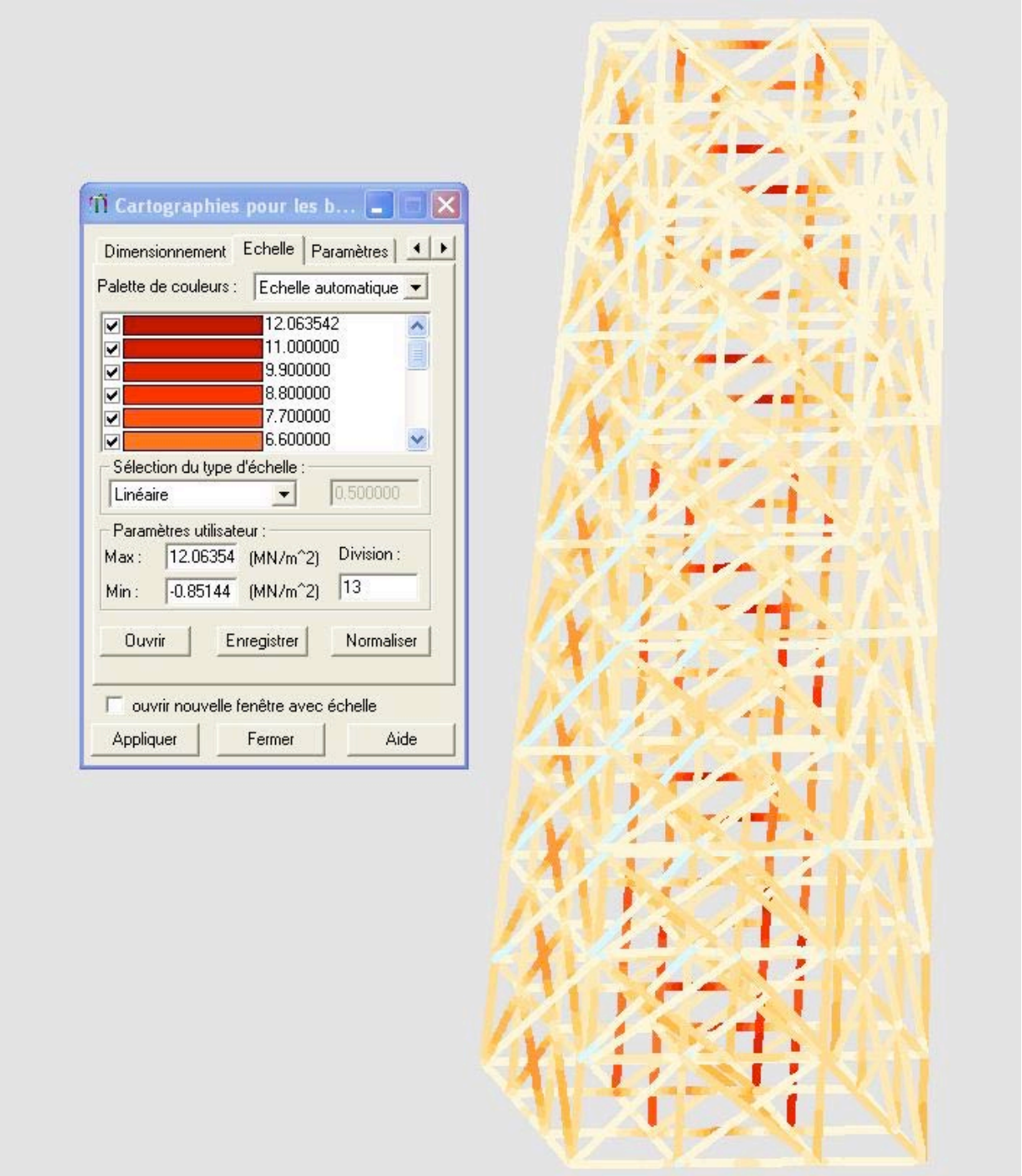
images 3-5 : Cartographie des efforts tranchants dans les barres sous combinaison ELU.

Les efforts tranchants les plus importants se situent dans les poutres au niveau des liaisons poteau poutre, et atteignent 13,4 kN



images 3-6 : Cartographie des moments fléchissant sous combinaison ELU

Les moments fléchissant sont faibles du fait des liaisons qui sont toutes des rotules. Ils atteignent un maximum de 1,8 kN.m et ne dépassent pas 0,35 kN.m dans la plupart des barres.



images 3-7 : cartographie des contraintes max dans les barres

A cause des différences de section entre les éléments de contreventement (10x10 cm) et les autres (20x20 cm), on assiste à un équilibrage des valeurs des contraintes max dans les barres.

efforts maximaux selon les éléments:

	Cisaillement (kN)	**Effort normal** (kN)	**Flexion** (kN.m)
poteaux		349	
poutres	13,4		1,84
contreventement		38	

Tableau 3-4
Contraintes maximales dans les barres

	σc max (en MPa)	**σt max** (en MPa)
poteaux	11,21	1,36
poutres	12,06	12,98
contreventement	4,3	5,38

Tableau 3-5

Les poteaux subissent de fortes contraintes positives (compression) à cause de la descente de charge.
Les poutres subissent d'assez fortes contraintes positives et négatives à cause de la flexion due aux charges d'exploitation, les contraintes positives étant sur la fibre supérieure et les contraintes négatives sur la fibre inférieure des éléments.
Les contreventements subissent des contraintes positives et négatives moyennes, dues principalement à l'action du vent.

Vérification des éléments

On compare ces contraintes calculées aux capacités résistantes de calcul en compression (16,3 MPa) et en traction (13,7 MPa).
On a bien **σc max < fc,0,d** et **σt max < ft,0,d.**

Etude de stabilité de la tour

La stabilité des éléments en compression n'est pas acquise même si les contraintes dans les barres sont inférieures aux contraintes de résistance. En effet, il y a un risque de flambement pour ces éléments.

Les éléments en compression qui présentent un risque sont les poteaux et les contreventements.
Ces éléments sont soumis à un effort normal et à une flexion. La stabilité de ces éléments est donc étudiée selon l'article 6.3.2 de l'Eurocode 5.

Stabilité des poteaux

Les poteaux sont soumis à une contrainte de compression maximale de 11.2 MPa. De plus, l'effort tranchant de 13,4 kN transmis par les poutres ajoute en tête de poteau un moment
M x d = 13,4 kN x 0,1 m = 1,34 kN.m, ce qui se traduit par une contrainte de flexion $\sigma_{m,d} = {M_d x 6}/{bh^2}$, où b = h = 0,2m.
σm,d= 1,05 MPa.

Il faut maintenant vérifier que

Selon y : $\frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1$

Et selon z : $\frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} < 1$

	y	z
élancements relatifs		
λ rel	0,61	0,61
élancements réduits		
1	40,70	40,70
k	0,72	0,72
kc	0,91	0,91

L en m	2,35
I en m4	1E-04
A en m2	0,04

s c,0,d		11,20
f c,0,d		16,30
s m,y,d		1,01
f m,y,d		22,88
km		0,70
s m,z,d		1,01
f m,z,d		22,88

selon y	$\frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$	0,86<1
selon z	$\frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} =$	0,86<1

Tableau 3-6

Stabilité des contreventements

Le même calcul doit être réalisé avec les barres de contreventement.
Malgré des contraintes de compression moins importante (4,3 MPa maximum) certaines barres flambent du fait de la faible section des éléments de contreventement. En fait, on se rend compte que tout élément soumis à une contrainte de compression de plus de 2,8 MPa est instable. On vérifié alors la tenue de la tour en lançant des calculs sous Robot en supprimant ces barres instables de la structure, le contreventement étant alors assuré par les barres en traction, et on constate que les contraintes de traction restent admissibles dans ces éléments.

Etude des assemblages

Description des assemblages

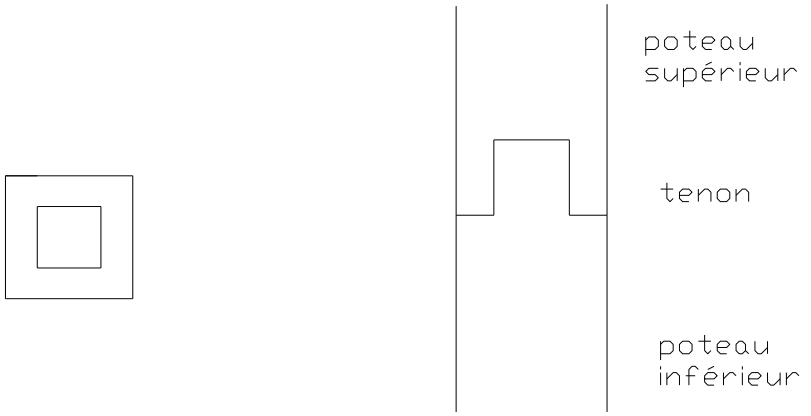
Grâce à la standardisation de la construction les assemblages sont de 3 types seulement :
- les assemblages poteau-poteau
- les assemblages poteau-poutre
- les assemblages poutre-contreventement

En plusieurs endroits, ces assemblages se concentrent en un seul nœud. Une attention particulière doit donc être portée sur la compatibilité de ces assemblages.

- les assemblages poteau-poteau

Efforts à reprendre	Modélisation du nœud	Assemblage choisi
- **Efforts normaux** de compression, dus à la descente de charge - **Efforts tranchants** dus au vent	rotule	Tenon-mortaise : Assemblage connu des romains, les efforts de compression sont repris par l'appui simple face contre face d'un poteau sur l'autre, les déplacements latéraux sont bloqués par la mortaise

Tableau 3-7



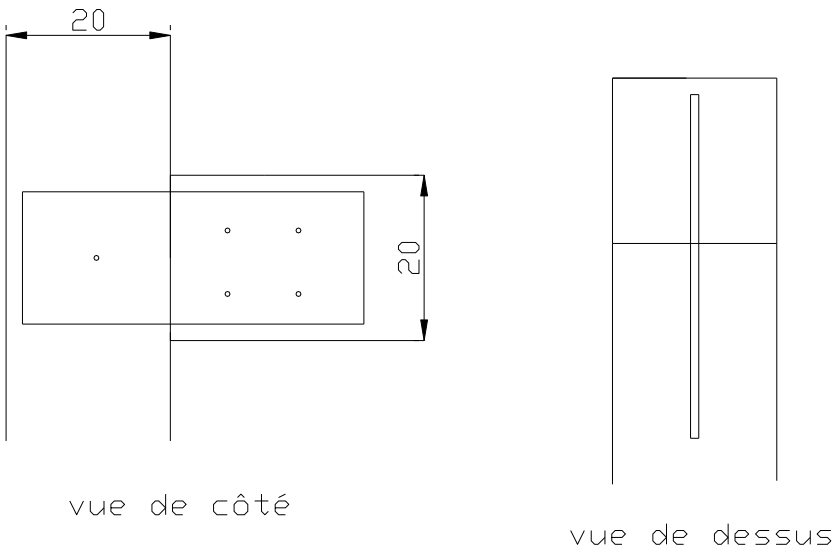
dessin 3-1

- Les assemblages poteau-poutre

Efforts à reprendre	Modélisation du nœud	Assemblage choisi
- **Efforts tranchants**, dus à la descente de charge des planchers	rotule	Plaque métallique ancrée dans les éléments par des broches, invisible pour cacher la modernité.

Tableau 3-8

Les romains auraient utilisé un assemblage par mi-bois avec une cheville en bois, qui ne répond pas aux normes actuelles. Cependant, pour donner une apparence (auth)antique, il est possible de prolonger les broches jusqu'aux faces des sections par des bouchons en bois pour masquer les composants métalliques.

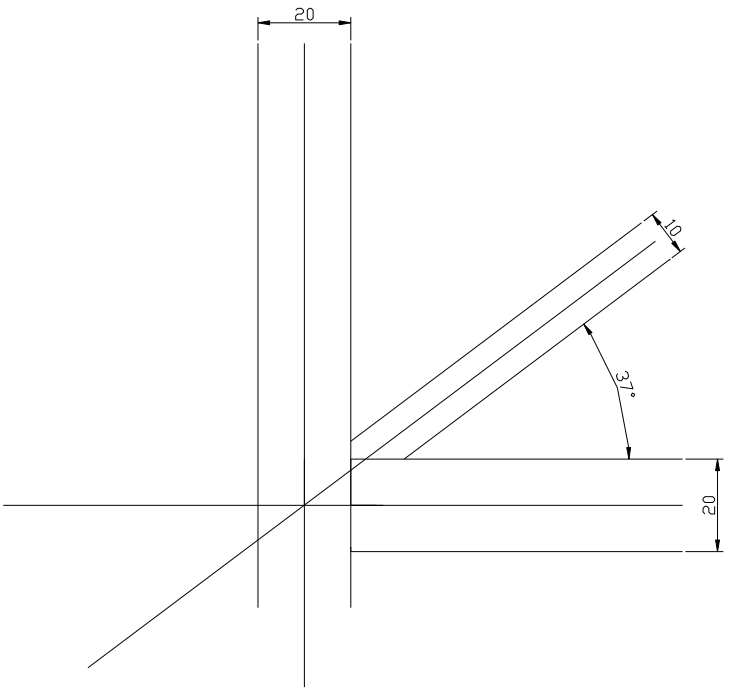


dessin 3-2

Les dimensions de la plaque et des broches sont à déterminer.

- Les assemblages poutre-contreventement

Cet assemblage est positionné de telle sorte que les axes des poutres, contreventements et poteaux soient bien concourants (dessin 3-3).



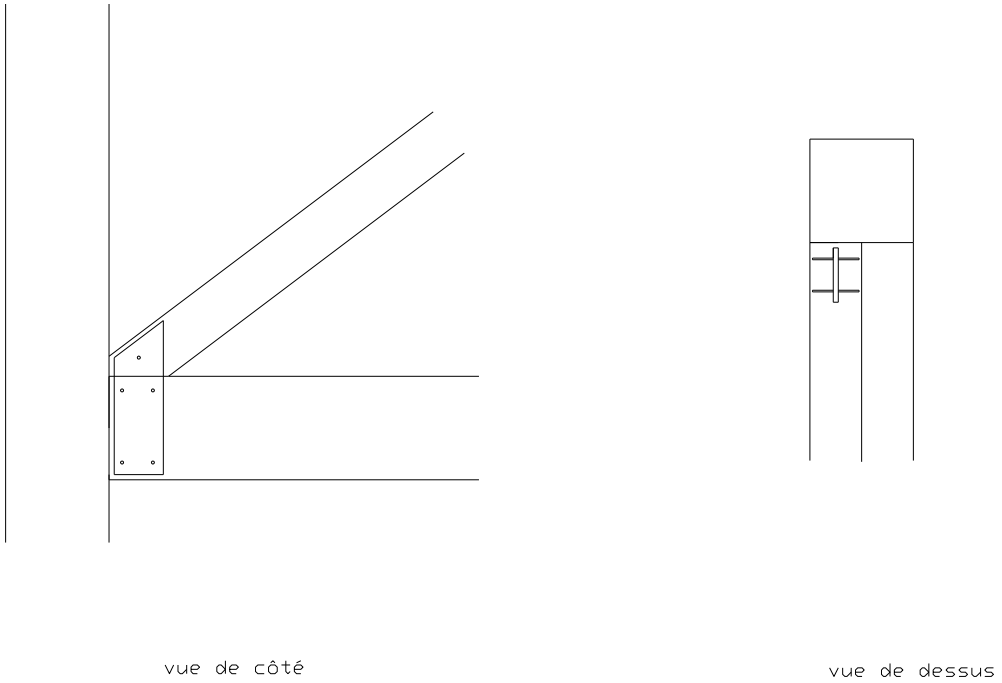
dessin 3-3

La surface de contact est plus grande entre le contreventement et la poutre que entre le contreventement et le poteau, c'est donc la géométrie qui indique de réaliser un assemblage poutre-contreventement.

Efforts à reprendre	Modélisation du nœud	Assemblage choisi
- **Efforts normaux** de compression ou traction, selon le mode de travail de l'élément de contreventement - **Effort tranchant** du à l'inclinaison des barres.	rotule	Plaque métallique ancrée dans les éléments par des broches, invisible pour cacher la modernité.

Tableau 3-9

Les barres de contreventement sont de dimension 10x10. Elles sont disposées côte à côte 2 à 2 sur une poutre de section 20x20.



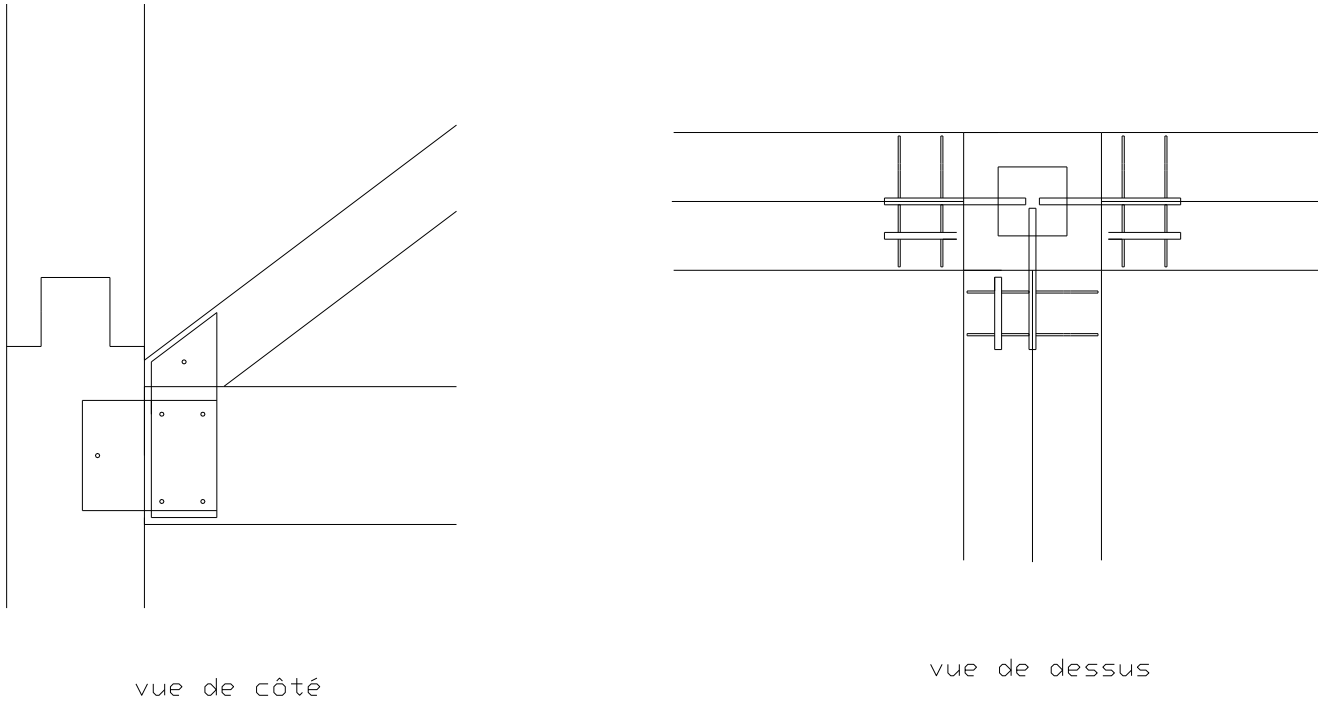
dessin 3-4

Les broches et la plaque métallique restent à dimensionner.
Par ailleurs, le caractère tridimensionnel de la structure permet de reprendre la légère torsion induite par l'excentrement des diagonales.

- Compatibilité des assemblages

La plaque métallique de l'assemblage poteau-poutre risquerait de se trouver au même endroit que le tenon du poteau. Pour éviter cela, la jonction poteau-poteau se fera juste au-dessus de l'assemblage poteau-poutre.
De plus certains poteaux reçoivent en un même nœud plusieurs assemblages poteau-poutre orthogonaux. Pour éviter le chevauchement des plaques métalliques, celles-ci ne devront pas dépasser la moitié de la section.

Par ailleurs, les plaques des assemblages poteau-poutres et celles des assemblages poutre-contreventement sont situées sur deux plans parallèles, et peuvent donc gêner la mise en place des broches. Il est alors intéressant que les 4 broches de la poutre soient les même pour les 2 assemblages, et dimensionnées en conséquence.

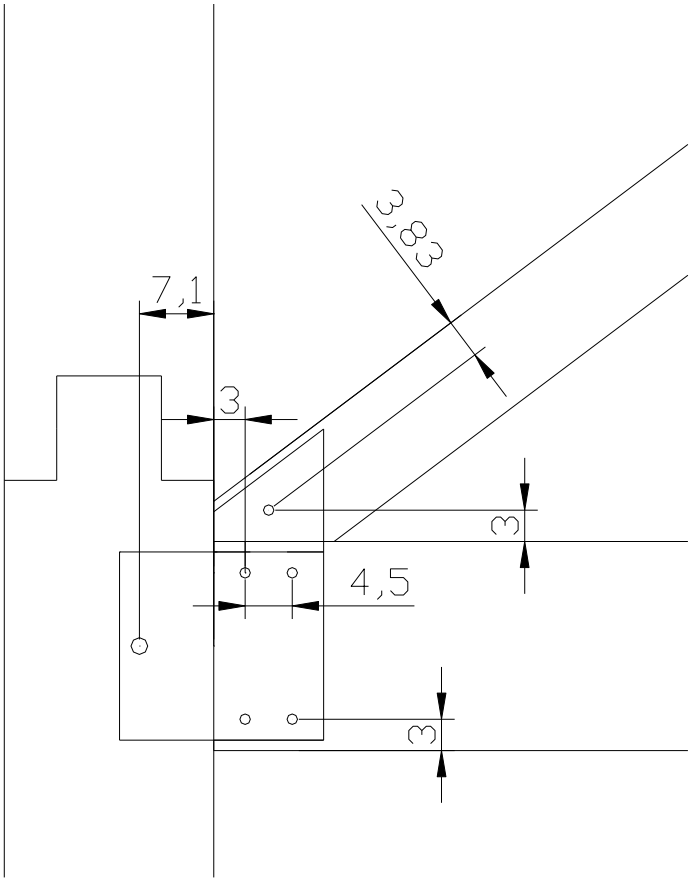


dessin 3-5

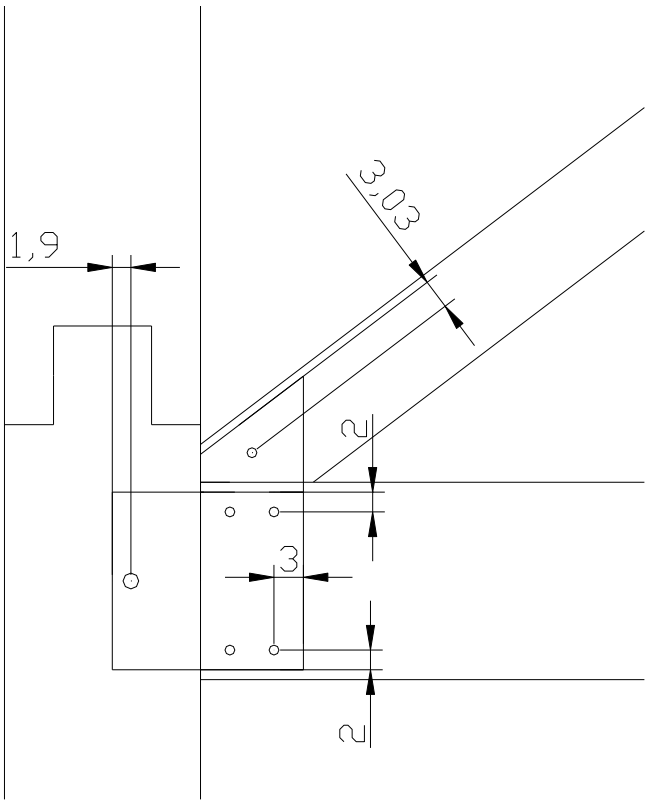
- disposition des broches

La mise en place des broches nécessite le percement de trous, obéissant à des critères de distance et d'espacement différents selon que les trous soient percés dans le bois (EC5, tableau 8.5) ou dans l'acier (EC 3, partie 1.8).

Ainsi l'espacement axe-axe entre deux trous est limité à 3d pour le bois et 2,4d pour la plaque en acier, la distance axe- extrémité est limitée à 3d pour le bois et 1,2d pour l'acier.



dessin 3-6 : distance par rapport aux extrémités bois



dessin 3-7 : distance par rapport aux extrémités acier

Calcul des assemblages

- calcul des assemblages poteau-poutre

Les calculs relatifs au dimensionnement des assemblages sont présentés à l'annexe 1.

3.4 Calcul à l'état limite de service ELS

Nous étudierons dans cette partie :
- les déplacements dus au glissement des assemblages
- les flèches des poutres

glissement des assemblages

Le glissement dans les assemblages est calculé selon les paragraphes 2.2.2 (3) et 7.1 de l'EN 1995 1-1.

Pour un effort de calcul Fd, le déplacement u ser vaut $u_{ser} = \frac{F_d}{K_{ser}}$, où Kser est un module de glissement qui vaut pour des broches $K_{ser} = \frac{\rho^{1,5}{}_m . d}{23}$.

broche	A	B	C, D	E, F
pm	700	700	700	700
d	16	11	10	10
Kser	1277,3	878,1	798,3	798,3
Fd (kN)	7,5	30,1	23	9,6
u ser (mm)	0,00587195	0,03427794	0,02881169	0,01202575

Tableau 3-10

Les glissements des assemblages sont donc très faibles, à comparer avec les flèches des poutres.

calcul des flèches des poutres.

On distingue deux types de flèche : la flèche instantanée u inst et la flèche de fluage u creep.

Au final, u fin = u inst + u creep.

Ces deux flèches diffèrent par :
- un chargement différent : charges d'exploitation instantanées pour la flèche instantanée, et uniquement les charges permanentes pour u creep
- un module d'Young différent : module d'Young instantané E mean contre module d'Young de long terme E fin.

$$E_{fin} = \frac{E_{mean}}{1+\psi_2 k_{def}}$$

où :
E mean = 10 000 MPa pour du chêne D35.
ψ2 = 1 pour des actions permanentes
f def= 0,8 pour une classe de service 2 (niveau d'humidité intermédiaire).

E fin = 55 555 MPa

Le tableau 7-2 de EN 1995-1-1 donne les valeurs des flèches admissibles pour des poutres sur deux appuis, des valeurs qui sont plus sécuritaires par rapport aux poutres sur 4 appuis de la structure
.
Le calcul avec Robot Millenium nous donne les valeurs suivantes (en mm) pour les flèches des plus grandes travées de poutre :

	flèche de calcul	flèche admissible		
u inst	7,20	L/300	10,33	*OK*
u creep	0,46			
u fin	7,66	L/250	12,40	*OK*

Tableau 3-11

Pour les petites travées :

	flèche de calcul	flèche admissible		
u inst	0,49	L/300	7,57	*OK*
u creep	0,02			
u fin	0,51	L/250	9,08	*OK*

Tableau 3-12

Les flèches de calcul sont inférieures aux flèches admissibles.

3.5 Calcul de résistance au feu

Le chêne, bois dense, est mauvais conducteur de chaleur. Cette mauvaise conductibilité constitue un véritable atout pour lutter contre les incendies et offre une meilleure sécurité aux utilisateurs.

Selon la réglementation des ERP, la tour doit être stable au feu pendant une heure. C'est à dire que pendant une heure, le feu va attaquer le bois. Au bout d'une heure, une certaine épaisseur sera carbonisée, et les sections des éléments en bois seront réduites d'autant. La tour doit encore tenir debout avec ces sections réduites.

La profondeur de carbonisation pour des éléments de petite section carrée est donnée par le paragraphe 4.4.2 (2) de NF EN1995-1-2.

$$d_{char,n} = \beta_n . t$$

t est le temps de stabilité au feu, en minutes. T=60 minutes.
Les surfaces des éléments de bois ne sont pas protégées. Les valeurs de calcul de βn sont donc données dans le tableau 3.1 de NF EN 1995-1-2.
Pour un feuillu massif de masse volumique > 450 kg/m3, on prend βn= 0,55 mm /min.

La profondeur de carbonisation vaut donc

d char, n = 33mm

Il faut reprendre les calculs avec des sections réduites de 33 mm dans chaque direction pour les éléments porteurs, à savoir les poteaux et les poutres.
Les calculs sont donc menés avec Robot et des sections de 17x 17 cm. Les résultats concernant les contraintes maximums dans les barres sont données à l'image 3-8.

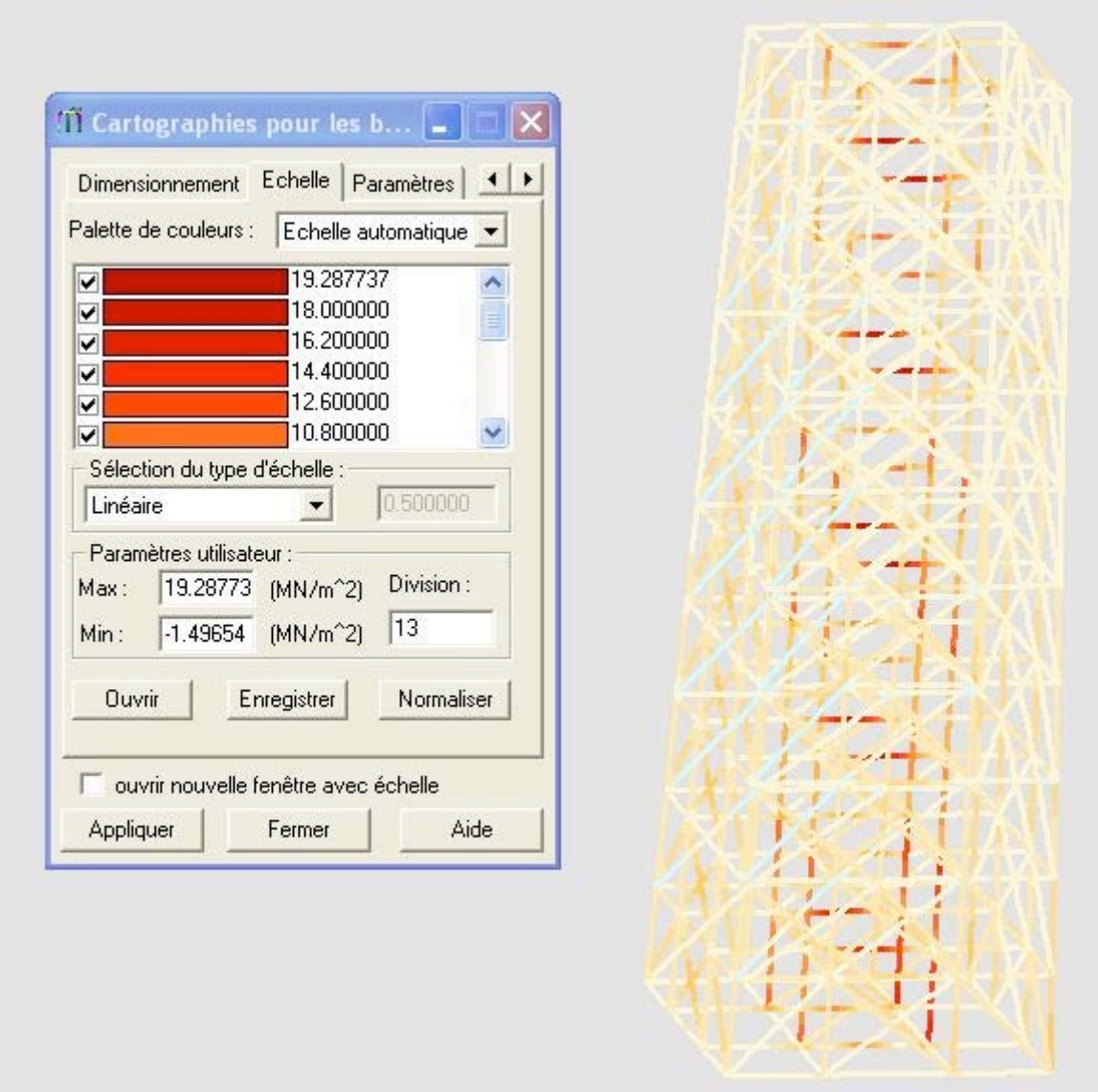


image 3-8 : cartographie des contraintes dans les sections réduites

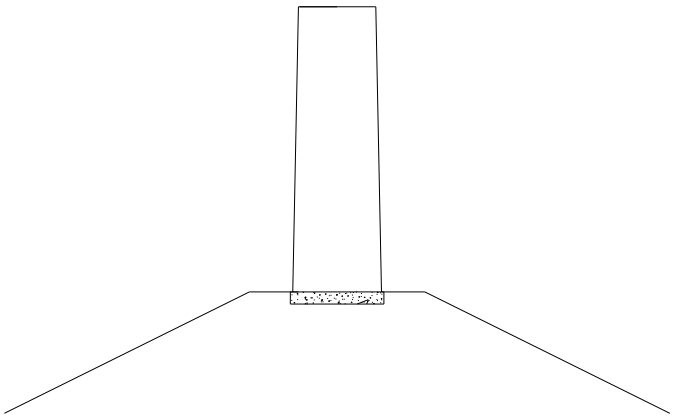
Dans les poteaux centraux des niveaux inférieurs, la contrainte 19 MPa dépasse la valeur limite de résistance à la compression du bois (16,3 MPa comme nous l'avons vu précédemment). Deux solutions peuvent maintenant intervenir : soit on remplace ces poteaux par des poteaux 23x 23 cm. Une fois leur section réduite après une heure de feu, ils seront de section 20x 20 et donc stables d'après les calculs précédents. Soit on remplace tous les poteaux par des poteaux 23x 23 pour garder une standardisation de sections de poteaux.

Résistance au feu des assemblages :

Les plaques métalliques des assemblages sont totalement insérées dans le bois massif et sont donc directement protégées de la chaleur. Ils ne risquent donc pas de céder prématurément en cas d'incendie.

3.6 Calcul des fondations

On essaie en premier lieu de se diriger vers une fondation superficielle, moins coûteuse. On fait reposer la tour sur une semelle en béton armé de 1m d'épaisseur (dessin 3-8), cachée dans le talus. Pour le talus, on prévoit de l'argile car nous avons vu que l'argile est présent et facilement disponible peu profondément dans la région. Le talus, en remblai, sera totalement drainé.



dessin 3-8

Pour la liaison entre les poteaux et la semelle, on la fait déborder de chaque côté de 0,2m. Cependant, on ne comptera pas ce supplément de semelle dans la résistance.

Sollicitations sur les fondations :

A cause du vent, la charge appliquée sur la fondation n'est pas verticale. On peut la décomposer en :

- une partie verticale V. V est la descente de charge totale, égale à la somme des descentes de charge des 16 poteaux de la tour. V= 3087 kN
- une partie horizontale. H= surface de façade x charge surfacique de vent. H = 101 kN.

Capacité résistante de la fondation

La fondation résiste jusqu'à une contrainte de rupture ql.

ql est la somme de trois termes :

- un terme de surface : il est fonction de la largeur de la fondation B et du poids volumique γ du sol sous la fondation. C'est la charge limite pour un massif pesant et frottant uniquement.
- Un terme de cohésion : c'est la charge limite pour un sol frottant et cohérent, mais non pesant.
- Un terme de surcharge : c'est la charge limite pour un sol uniquement frottant et chargé latéralement (q étant la charge volumique du sol au dessus du niveau de la base de la semelle).

$$q_l = 1/2\gamma.B.s_\gamma i_\gamma.N_\gamma(\varphi) + c.s_c.i_c.N_c(\varphi) + (q+\gamma.D)s_q.i_q.N_q(\varphi)$$

où :
q est une surcharge verticale latérale à la fondation. q=0.
c est la cohésion du sol sous la fondation
D est la profondeur de la base de la semelle.
Nγ, Nc et Nq sont des facteurs de portance ne dépendant que de l'angle de frottement interne f du sol sous la semelle.
iγ, ic et iq sont des coefficients traduisant l'influence de l'inclinaison de la charge
sγ, sc et sq sont des coefficients traduisant l'influence de la forme de la semelle.
Les coefficients N, i, et s sont déterminés selon la méthode classique à partir d'essais de laboratoires dite « c-φ ». Cette méthode est décrite dans de nombreux livres de géotechniques et de calculs de fondations.

Par comparaison, le calcul de la capacité de la fondation a été calculé avec du sable et de la grave, mais on voit que l'argile est bien suffisant. C'est bien de l'argile qui sera utilisé en raison de sa disponibilité.

	argile	sable	grave
propriété matériau			
g en kN/ m3	19	22	21
f	28	35	40
c	8	0	0
qg en kPa	797,1	2526,9	5866,0
q c en kPa	258,9	0,0	0,0
q q en kPa	248,7	684,6	1259,5
paramètres communs			
B en m	7,7	7,7	7,7
L en m	7,7	7,7	7,7
q en kPa	0	0	0
D en m	1	1	1
N g	15	41,1	100
N c	29	46	75,3
N q	14	33,3	64,2
forme de la fondation			
s g	0,8	0,8	0,8
s c	1,2	1,2	1,2
s q	1	1	1
inclinaison de la charge			
i g	0,91	0,91	0,91
i c	0,93	0,93	0,93
i q	0,94	0,93	0,93

V en kN	3087	3087	3087
H en kN	101,1675	101,1675	101,1675

contrainte de rupture en kPa			
ql en kPa	1304,8	3211,5	7125,5
contrainte de sollicitation en kPa	52,1	52,1	52,1
	OK	OK	OK

Tableau 3-13

Les fondations superficielles en radier général sont donc largement suffisantes, on ne prévoit donc pas de semelle sur pieux qui aurait été beaucoup plus coûteuse.

Conclusion

Au moment de conclure, nous pouvons en arriver au constat suivant. La présente étude n'est pas une reproduction, mais bien une reconstitution. Certes, la conception proposée ici ne correspond certainement pas à la tour construite il y a 2000 ans. En effet les sources dont nous disposons sont trop maigres et nous poussent à faire des hypothèses, et la volonté de construire une tour durable qui assure à ces visiteurs des conditions de confort et de sécurité réglementaires nous conduit à prévoir des adaptations et des compromis de temps en temps bien visibles (par exemple pour les dimensions et l'aspect du talus). Mais une fois cette illusion de reproduire la tour à l'identique tombée, la reconstitution proposée conserve les ordres de grandeurs et une apparence authentique qui, si elle ne trompera pas un public averti, permettra aux visiteurs de rentrer dans une ambiance et de se représenter facilement les grands moments de la bataille. En effet, la structure est accompagnée de détails travaillés (façade en peau de bête, début de galerie sous le talus) qui, s'ils sont accompagnés par d'autres aménagements autour de la tour (mantelets …), autour de la source gauloise et de l'oppidum notamment, permettront une compréhension vivante et détaillée des événements dramatiques qui se sont déroulés ici, de l'encerclement de l'oppidum jusqu'au tarissement de la source.

Suite à cette étude, qu'est ce qui pourrait entraver la réalisation de la reconstitution ?
Tout d'abord, la situation foncière est compliquée. L'emplacement de la tour et le site du siège sont à cheval sur plusieurs propriétés privées. Rien ne pourra être réalisé évidemment sans l'accord des différents propriétaires, qui reste à obtenir. Par ailleurs, le talus de la tour intercepte aussi un ru et une route, qui devront être détournés.
Une autre difficulté concerne le coût de la construction. Le choix d'utiliser du chêne s'imposait pour des raisons historiques, mais ce n'est pas le bois le meilleur marché. En plus le volume de matériau est assez conséquent (plus de 100 m3), si on additionne les éléments de structure, le plancher, les garde-corps et la toiture. Enfin, le site est abrupt, ce n'est pas un hasard si les Gaulois ont choisi de s'y retrancher, les conditions des travaux seront d'autant plus difficiles.
Aussi, réaliser la reconstitution à l'emplacement même de la bataille détruirait tous les vestiges et les richesses qui n'ont pas encore été mises à jour. Malgré une évidente volonté de valoriser le site, la reconstitution pourrait priver les générations futures d'archéologues de découvertes enrichissantes. En cas de réalisation un inventaire complet de la situation du site avant travaux devra être effectuée.
Pour parer à ces difficultés (foncières, topographiques et archéologiques), la solution de réaliser la reconstitution sur un terrain avoisinant existe, mais reste quand même décevante.

En dépit de ces difficultés, le projet pourra s'appuyer sur le soutien des collectivités territoriales concernées par le Puy d'Issolud, les communes de Vayrac et de Saint Denis les Martels, et le conseil général du Lot. En effet ces organismes cherchent à mettre en valeur leur patrimoine, et le siège d'Uxellodunum en fait partie. La richesse des évènements qui s'y sont déroulés est tout à fait susceptible d'attirer un tourisme vert que les collectivités veulent développer. D'ailleurs, le site du Puy d'Issolud a déjà ses inconditionnels, regroupés dans l'association des Amis d'Uxellodunum (présidée par l'archéologue Jean Pierre Girault), et dont les membres n'ont de cesse de faire parler du site par leurs activités et nombreux projets (réalisation de diaporamas, fouilles, conférences, journées portes ouvertes, voir le site www.uxellodunum.com). Les différents partenaires privés, publics, et associatifs tentent en ce

moment de s'organiser et de former une institution chargée de coordonner la protection, l'aménagement et la mise en valeur du site. La prochaine étape est sans aucun doute de se rapprocher de ces personnes pour faire adhérer l'ensemble des intervenants à un projet commun.

Bibliographie :

La construction romaine, de Jean-Pierre ADAM, édition Picard

Le pont avant le temps des ingénieurs, de Jean MESQUI, édition Picard

Les charpentes du XIème au XIXème siècle, typologie et évolution en France du Nord et en Belgique, Monum, éditions du patrimoine (2002).

Beffrois de charpentes, études de structure, publication du CRMH

Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle , de Eugène Emmanuel Viollet le Duc. Bibliothèque du centre des hautes études de Chaillot.

Histoire de l'architecture, de Auguste Choisy. Bibliothèque du centre des hautes études de Chaillot.

La Guerre des Gaules, de Jules Cesar. Gallica, bibliothèque en ligne de la Bibliothèque François Mittérand.

Histoire de Jules César, de Napoléon III Gallica, bibliothèque en ligne de la Bibliothèque François Mittérand.

Charpentier d'aujourd'hui, R. DEMOTZ, édité par R. Demotz. Genève (1969).

Règlement de sécurité contre l'incendie, relatif aux établissements recevant du public, éd. Fransel.

Le guide Bonhomme. Le Moniteur, actualisation 2005.

Les normes NF EN 1995 1-1 et NF EN 1995 1-2 (eurocode 5), ainsi que leurs livres d'application *Structures en bois aux états limites*, édition Eyrolles.
La norme NF EN 1990 (eurocode 0).

thèse sur la stratégie militaire romaine
Les armées au combat dans les Annales de Tacite : étude de tactique, mémoire d'histoire ancienne de Laurent FLEURET, université de Nantes, 1997.

Les assemblages dans la construction en bois. Ouvrage réalisé par le CTBA.

Calcul des fondations superficielles et profondes, de Roger FRANK, presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

De l'architecture, de Vitruve. Gallica, bibliothèque en ligne de la Bibliothèque François Mittérand.

Guide du constructeur en bâtiment, R. Adrait, J.-P. Battail, D. Sommier, édition Hachette *technique*

Les sites internet www.quercy.net; www.uxellodunum.com.

Annexe : Vérification et calcul des assemblages :