



HAL
open science

L'écrin de Coraulis, morphogenèse et conception de l'enveloppe d'un dispositif immersif

Amin Bouattour

► **To cite this version:**

Amin Bouattour. L'écrin de Coraulis, morphogenèse et conception de l'enveloppe d'un dispositif immersif. Architecture, aménagement de l'espace. 2019. dumas-02492106

HAL Id: dumas-02492106

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02492106>

Submitted on 26 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Sur la place haute de l'école, serré entre le plafond et le sol de béton, un nouvel alien s'est lové. Son enveloppe cache un dispositif d'immersion à 360° projeté sur une surface conique.

Le renflement circulaire qui ourle la forme, cache une coursière intérieure. Elle offre un point de vue circulaire, surplombant le théâtre d'images. Les fonctions définissent la forme mais l'objet ne dévoile rien de son intérieur.

L'objet est juste une enveloppe souple, brillante et continue au plus près de ce qu'elle contient. Voilà l'énigme.

Elle ne présente aucune similitude ou ressemblance avec une architecture connue. C'est un peu l'antithèse de l'Absence, le bar bleu dégoulinant de Joep van Lieshout. Ici, pas de débordement, pas de coulure, un objet lisse et bien fait, comme un beau bidet de Luigi Colani. La couleur rouge est un principe, pur, sans mélange. Il rompt le silence du béton.

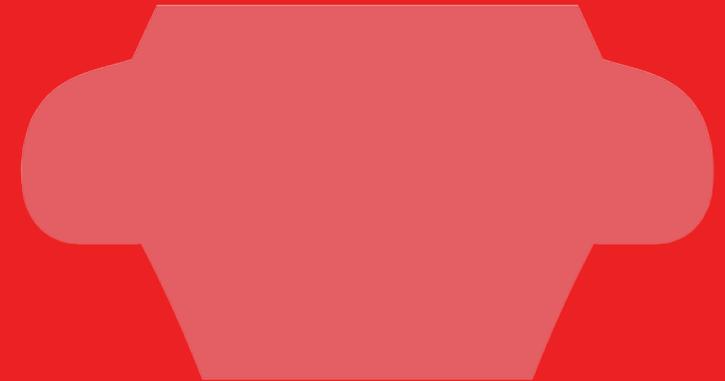
À la faveur d'un jeu de réflexions, d'un effet de masse, Coraulis affirme son statut d'objet. Jouant sur la surface et l'apparence des choses, la peau est une frontière entre l'extérieur et l'intérieur. L'enveloppe cache une structure sophistiquée et savante de membrures de bois entrecroisées. Coque paramétrique qui sera bientôt disséquée sous Grasshoper et découpée sur les machines de l'école.

Coraulis est un lieu de sensations, son épiderme rouge isole de l'espace agité du forum. L'isolement doit être total pour que l'expérience immersive vous transporte ailleurs, vers les rêves augmentés de la réalité virtuelle.



L'écrin de CORAULIS

AMIN BOUATTOUR



L'écrin de CORAULIS

Morphogénèse et conception de l'enveloppe d'un dispositif immersif

L'écrin de CORAULIS

Morphogénèse et conception de
l'enveloppe d'un dispositif immersif

AMIN BOUATTOUR

Mémoire-action
sous la direction de
Francis Miguet - 2019

Je tiens à remercier Francis Miguet pour son encadrement, sa disponibilité et ses conseils décisifs, qui ont permis de rendre ce travail de mémoire agréable et motivant.

Je souhaite aussi remercier ma famille, pour leur amour et leur encouragement depuis le début de mes études d'architecture.

Je tiens aussi à remercier mes colocataires, pour leurs présences et leur bienveillance tout au long de ce travail. Tout particulièrement pendant ces longues heures de travail à la maison où chaque pause-pétanque était la bienvenue.

Contexte

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

CORAULIS : Centre d'**O**bservation en **R**éalité virtuelle **AU**gmentée et **L**ieu d'**I**mersion **S**onore, est un nouvel outil né dans le cadre du Contrat de Plan Recherche État/Région. Il est le produit d'un travail de recherche effectué entre le CRENAU (Le Centre de REcherche Nantais Architectures Urbanités), l'école nationale supérieure d'architecture de Nantes (ensa Nantes) et Centrale Nantes¹ (école d'ingénieur) depuis 2014 et permet de s'immerger à 360° dans l'image et le son.

Coraulis se nourrit des travaux conduits sur les différentes versions de *Naexus*, dispositif de visualisation immersif développé, à l'origine, à l'université Hochschule Anhalt de Dessau et inscrit désormais en coproduction scientifique et technique avec l'école nationale supérieure d'architecture de Nantes et le Crenau.



Photo
du dispositif *Naexus*
©Yan Breuteux

1 - L'École centrale de Nantes (ECN) est une école d'ingénieurs nantaise associée à l'ensa Nantes dans le cadre du double diplôme ingénieur-architecte

Il s'agit désormais d'offrir un dispositif panoramique constitué d'un écran circulaire clos à 360° dans le plan horizontal, doté d'une spatialisation sonore à très haute définition et stabilisée sur l'ensemble de l'aire d'évolution du dispositif. Cet écran rabaissé pour faire contact avec le sol se trouve complété par de la projection au cœur du dispositif, associée à de la capture de mouvement. Il s'agit ici de concilier les deux vues principales de l'architecte/urbaniste utilisées en conception, comme en décision : la vue allo-centrée, qui permet d'avoir une vision d'ensemble du projet inséré dans son environnement urbain via l'utilisation d'une maquette ou d'une carte et d'informations projetées ; tandis que la vue égocentrée permet d'insérer l'observateur dans son futur environnement.

En son centre, au sein du cône de projection, les mouvements des corps et des objets peuvent être capturés en temps réel, pour élaborer de nouvelles formes d'interaction pour la conception architecturale et urbaine, la création artistique et la médiation auprès du public. Il s'adresse à la fois aux étudiants, aux enseignants et aux chercheurs, qui s'intéressent au projet architectural ou urbain, mais également aux professionnels de la ville et du territoire.

Ce dispositif, permettra trois types de représentation : immersive dite classique, dans un système conçu comme une corolle à 360° autour des utilisateurs ; à base de maquettes utilisant la notion de réalité augmentée projective appelée également mapping ; et une combinaison des deux dispositifs précédents, qui peut être simultanée ou successive.

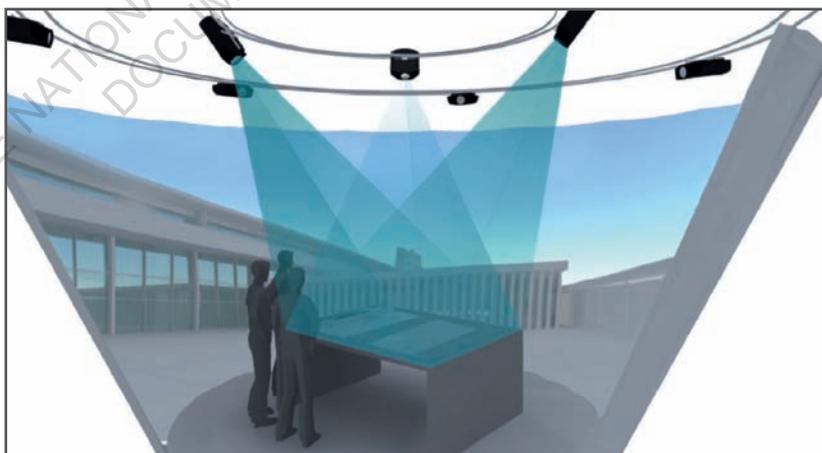
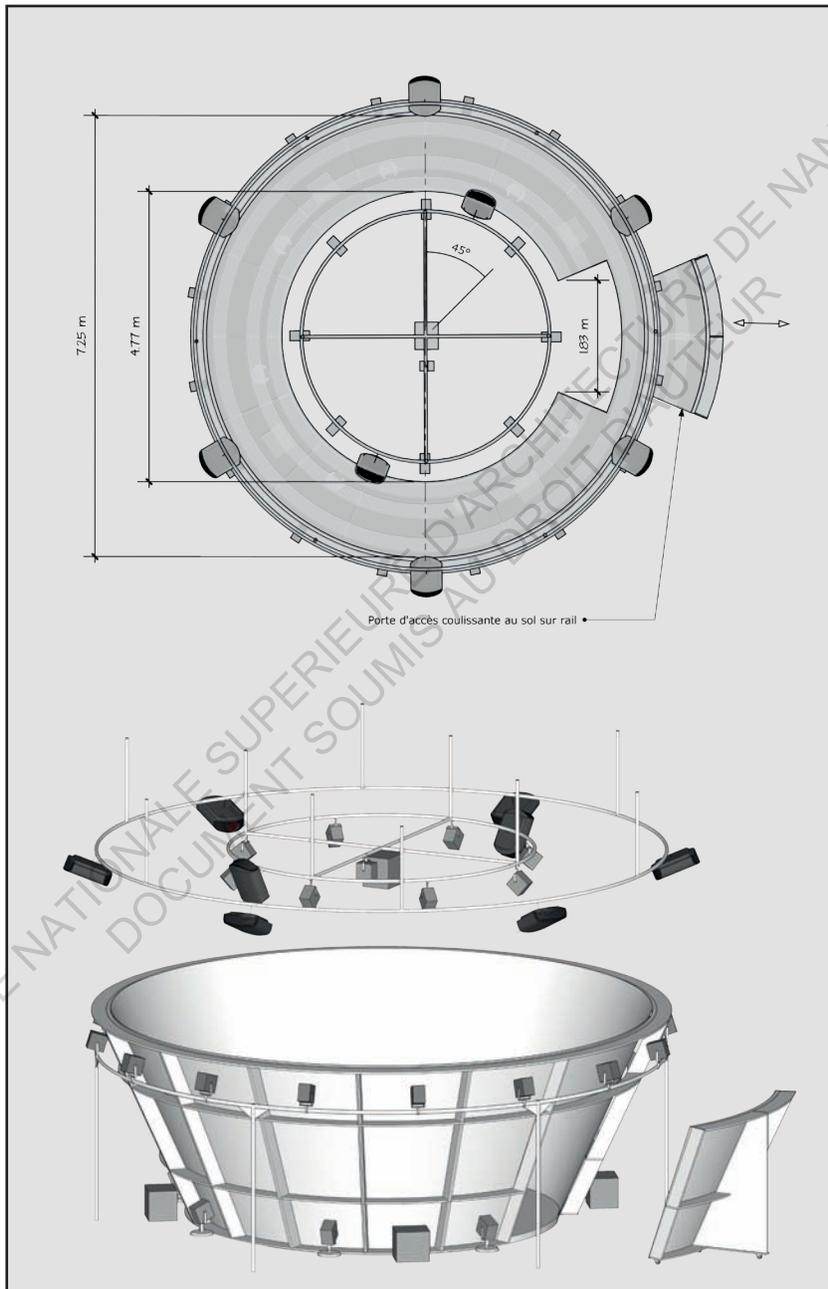


Image 3D
du dispositif Coraulis
© Bruno Suner

Image 3D
& plan côté du dispositif Coraulis - sans échelle



Les problématiques abordées incluent la réalité virtuelle ou augmentée en tant qu'objet de recherche, la représentation de la ville dans le cadre des méthodes de conception en architecture et urbanisme, la gestion de la ville et des territoires. Les données liées à la conception et à la gestion des villes qui se sont constituées en vastes réseaux de collecte d'information rentrent dans le cadre du « Big Data » pour lequel *Coraulis* propose une solution, se plaçant dans le domaine du « visual analytics ».

Sur le plan pédagogique, *Coraulis* a pour objectif de former les étudiants et les professionnels aux nouvelles formes de représentation de la ville, de les accompagner dans la prise de décision. Il permettra de faire travailler ensemble les étudiants de l'ensa Nantes et ceux de Centrale Nantes (option « réalité virtuelle » et surtout option commune ensa-ECN « Société numérique et enjeux contemporains »). D'autres applications sont d'ores et déjà en chantier comme la conservation du patrimoine culturel, la visite et la présentation de musées et de sites virtuels.

Sur le plan des relations avec le milieu artistique et la scénographie, cet outil permet d'offrir une plateforme d'expérimentation en direction d'artistes œuvrant dans le champ de la création numérique et en particulier du vidéo mapping. Il prolonge des collaborations initiées avec le Laboratoire Arts & Technologies de Stereolux¹ et le festival Scopitone² dans le cadre du Quartier de la Création sur l'Île de Nantes. Enfin, l'outil a vocation à s'adresser aux professionnels en leur fournissant un lieu de discussion et d'aide à la décision dans le cadre de projets architecturaux et urbains. Un tel dispositif permet de proposer une représentation partagée mais aussi multivoque d'un projet : la maquette donne la vue globale tandis que la vue en corolle permet d'immerger les décideurs dans le futur projet.

Le dispositif *Coraulis* vient compléter les dispositifs déjà existants de la région dans le domaine de la réalité virtuelle : Clarte³ et CIRV⁴.

1 - Espace de création et de diffusion situé à La Fabrique, à Nantes

2 - Scopitone est un festival annuel transdisciplinaire d'art numérique se déroulant dans plusieurs endroits de la ville de Nantes

3 - Centre de ressources technologiques spécialisé en réalité virtuelle, réalité augmentée et technologies émergentes, situé à Laval

4 - Centre industriel de réalité virtuelle basé à St Nazaire

Il est également complémentaire du projet Solar Recherche qui viendra compléter sur le terrain les représentations mixtes construites dans *Coraulis*.

Sur un plan scientifique, ce projet aborde des problématiques scientifiques pluridisciplinaires en matière de réalité virtuelle (présence, perception en environnement virtuel), de réalité augmentée projective, mais aussi d'étude des processus de conception projectuelle et de décision en architecture et urbanisme.

Sur le plan de l'enseignement, ce dispositif prolonge et s'appuie sur les travaux entrepris sur le système *Naexus* en coopération avec des applications plus particulièrement orientées vers la conservation de patrimoine culturel, la visite et présentations de musées et de sites virtuels, dans le cadre du département Scénographie de l'ensa Nantes. Pour ce qui concerne Centrale Nantes, le système permet de proposer un environnement de formation dans le cadre des nouvelles options Intensci (Calcul intensif, portée par A.Leroy) et « Société numérique et enjeux contemporains » (M.Servières, commune à l'ensa Nantes et à l'ECN).¹

¹ - Partie «contexte» emprunté au texte de présentation de *Coraulis* écrit par Bruno Suner

Introduction

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

En **février 2018**, un concours à idées est lancé pour réaliser « l'écrin de *Coraulis* ». L'objet limité de ce projet court¹ devait permettre aux étudiants d'aboutir sur une semaine à une proposition, tant au niveau des choix constructifs et de matériaux que des effets produits. Le rendu se fait sous forme d'un dossier et mobilisera les outils numériques de conception et de rendu. Alexandra Pasturel² et moi-même, participons à ce concours d'idée, le remportons et commençons alors un stage. De mars à juillet 2018 (4 mois), nous travaillerons au sein du laboratoire de recherche du Crenau dans le but de concevoir cet écrin et permettre une réalisation future de notre idée. Ce stage fut encadré par Francis Miguet³, Michel Bertreux⁴ et Bruno Suner⁵.

Ce mémoire-action se porte alors sur ce projet, mais aussi sur l'aventure *Coraulis*. D'une simple idée à l'entrée en stage au Crenau et pour bientôt, peut-être, une construction au sein de l'école.

À partir de notes prises sur le vif, de comptes rendus synthétiques et d'un journal de bord. Des textes contenant des réflexions personnelles, le déroulement quotidien de la conception, l'intégration des idées émises par les différents intervenants, les expériences vécues et nos impressions mais aussi nos erreurs et nos confusions, les relations et les réactions, positives ou négatives, ont permis l'écriture de ce mémoire.

Ce mémoire-action, fait état de cette expérience immergée aux côtés d'Alexandra, il expose les différentes démarches engagées au cours de la conception, retrace les objectifs atteints, et vise à mettre au jour une partie du travail investi durant ces 4 mois. Il présente aussi les résultats de toutes nos recherches, la confrontation de données et à pour but de décrire, de façon exhaustive, le déroulé de toute cette période de conception pour ensuite en extraire un « manuel explicatif » de l'écrin de *Coraulis*.

1 - Exercice de projet réalisé au cours du master d'architecture à l'ensa Nantes

2 - Etudiante de master 2 à l'ensa Nantes, camarade et collègue durant le stage

3 - Professeur à l'ensa Nantes et membre du Crenau

4 - Maître de conférence à l'ensa Nantes et membre du Crenau

5 - Maître assistant à l'ensa Nantes et membres fondateurs de l'agence d'architecture TETRARC

Dans un premier temps, nous aborderons la morphogénèse de l'écrin et son esthétique ; de son profil singulier au choix de sa couleur et de sa texture ; les différentes étapes de réflexion qui lui ont apporté sa qualité d'objet d'architecture, tout en tenant un rôle éducatif au sein de l'école d'architecture de Nantes.

Dans un deuxième temps, nous exposerons les différentes étapes d'évolution de la structure porteuse, son interaction, les contraintes et les impératifs d'ordre géométrique, mécanique et technologique ,qui ont rendu difficile l'émergence d'un compromis idéal.

La troisième partie portera sur l'étude de conception de la coque/ de sa membrane/de sa carapace. Les différentes recherches, l'application de la réglementation incendie et les impératifs d'ordre budgétaire qui ont rendu difficile sa conception. Elle présentera aussi les différentes étapes d'évolution au travers d'un processus fait de nombreux allers et retours avec des intervenants extérieurs.

De plus, dans ces trois parties, nous exposerons le rôle que nous avons eu, Alexandra et moi-même, dans chaque étape du projet, au travers d'un travail d'introspection..

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



CONTEXTE	~~~~~	4
INTRODUCTION	~~~~~	10
1-NAISSANCE DE L'ÉCRIN	~~~~~	17
1.1 Parasitus		19
emplacement		
niche sensorielle		
connotations		
1.2 Morphogénèse		30
rationalisation conceptuelle		
l'outil numériques		
aménagement intérieur		
1.3 Couleur et symbolique		38
l'animal		
la navette spatiale		
l'objet		
2-STRUCTURE OSSEUSE	~~~~~	51
2.1 Du concours au stage		54
ossature mixte : métal-bois		
début du stage		
ossature simple : contreplaqué		
2.2 Évolutions et temporalité		64
du 21 mars au 18 avril 2018		
19 avril - rencontre avec Socotec		
du 19 avril au 9 mai		
10 mai - rencontre avec LeichtFrance		
de LeichtFrance à la fin du stage		
2.3 - Optimisation - le paramétrique		94
serpentine gallery		
déroulement		

3-DE L'HYPODERME À L'ÉPIDERME ~~~~~ 99

3.1 Inspirations	102
mouvement pop	
bulle six coques	
3.2 Ossature métal et coque autoportante	108
séquençage	
mise en oeuvre et composition	
3.3 Ossature métal-bois et coque non autoportante	114
séquençage	
mise en oeuvre et composition	
3.4 Ossature bois et polystyrène	118
l'igloo	
le «total covering»	
socotec - réglementation incendie	
3.5 Départ à zéro	124
artisan Staffeur	
thermoformage de polymères	
stratification sous vide de bois	
prototypage	

RETOUR SUR EXPÉRIENCE ~~~~~ 136

 cadre du stage
 communication et apprentissage

CONCLUSION ~~~~~ 140

BIBLIOGRAPHIE ~~~~~ 142

 médiagraphie

ANNEXES ~~~~~ 148

« Je pense qu'il n'y a pas de spectateur innocent. La vision s'accompagne toujours de complications, d'une histoire, d'un passé plus ou moins réel. L'art abstrait, et en particulier la sculpture, travaille cette idée que le spectateur participe à la fois avec son corps et sa mémoire. Le corps et la mémoire sont tous deux mis en jeu dans le regard. Et ce qui m'intéresse, c'est ce qu'il advient du sens, dans ce processus : quand la mémoire et le corps parcourent, traversent une œuvre d'art, quelque chose se passe, quelque chose change. »

Anish Kapoor

1.1 - Parasitus

Premier jour d'intensif. Après une matinée d'état de l'art sur la réalité virtuelle et l'immersion panoramique, nous prenons conscience de l'étendue du travail à effectuer pendant cette semaine d'intensif. Pour le moment, *Coraulis* se compose d'un écran en forme de cône inversé, posé au sol et entouré de trois couronnes de source audio et d'une couronne de vidéos projecteurs, disposées en périphérie et au dessus de l'aire d'évolution. *Coraulis* est donc à nu, il ne peut fonctionner, comme un châssis-moteur, le dispositif ne peut être mis en route et parfaitement approprié à son usage sans son habitacle, sa carrosserie, sa transmission et ses accessoires.

Ainsi, cet « écran » doit répondre à plusieurs fonctionnalités importantes (accès au dispositif –pompiers, public, personne à mobilité réduite-, entretien, maintenance), et conforme à des performances au vu du programme technique (exigences acoustiques, isolation, éclairage et règles de sécurité d'un établissement recevant du public). La réflexion sur cet objet doit aussi s'inscrire dans la perspective historique des panoramas et doit permettre d'aboutir sur une semaine à une proposition cohérente, tant au niveau des choix constructifs et de matériaux que des effets produits. Il devra comporter une valeur de signal, avoir une insertion dans le bâtiment existant cohérente et rendre compte d'une originalité et d'une créativité. Cet écran ne peut se résigner à n'être que quatre murs de placo-plâtre, *Coraulis* est une porte d'entrée à un nouveau monde virtuel, l'enfermer dans ce qui s'apparenterait à une salle de classe ferait perdre à ce dispositif son impact visuel et sa signification forte.

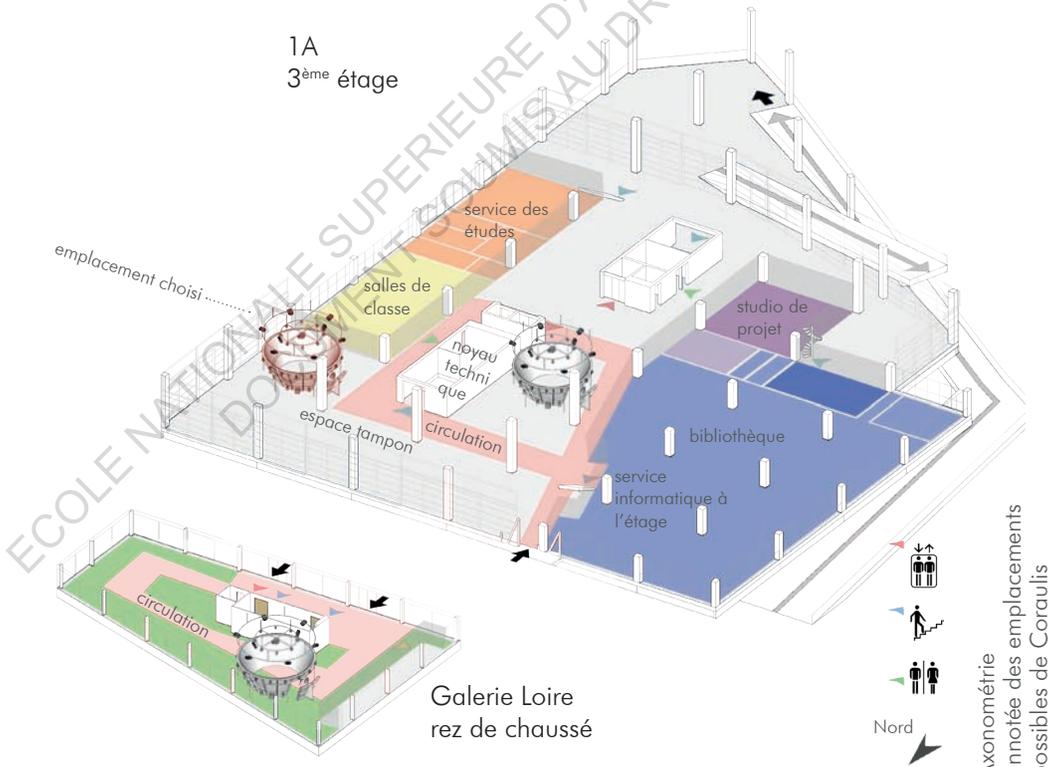
Emplacement

Nous mettons de côté l'aspect technique exigé et prenons ce projet comme un concours à idées pour du mobilier, ou une œuvre de design. Cette œuvre sera lunaire, spatiale et « nasaïque ». Il fallait tout d'abord choisir son emplacement dans l'école. Au plateau 1A¹ deux espaces sont proposés, une autre implantation est envisagée dans la Galerie Loire². Ces implantations sont en accord avec la volonté d'en faire un outil ouvert tant sur la recherche que sur les missions de communication dans le cadre d'expositions, de journées portes ouvertes, de conférences etc.

1 - 3^{ème} étage de l'ensa Nantes ; superficie : 3600 m²

2 - Espace d'exposition de l'ensa Nantes ouvert sur l'espace public ; superficie : 600 m²

Nous excluons rapidement la possibilité de s'installer dans la Galerie Loire, faire perdre 1/7^{ème} d'espace d'exposition à cet unique et vaste plateau modulable serait dommage. Et notamment, à l'inverse d'optimiser la fonctionnalité du lieu, *Coraulis*, en s'y installant, allait réduire un espace de déambulation libre à une étroite bande de circulation entre son écran et un des murs de la galerie. Il nous restait alors deux espaces. De la même manière que dans la Galerie Loire, *Coraulis*, implanté entre le noyau technique du 1A et la bibliothèque, aurait réduit considérablement l'espace de déambulation qui rejoint - les ascenseurs, le service des études, les toilettes, et la terrasse - à - la bibliothèque, le service informatique, l'administration et le laboratoire de recherche-. Cet espace de déambulation très utilisé tout au long de la journée, se serait alors transformé en une étroite bande de circulation entre l'écran de *Coraulis* et les baies vitrées de la bibliothèque.



Nous décidons d'implanter *Coraulis* au 1A du côté de la façade Nord-Est, lieu inutilisé de l'espace tampon. Cet espace, en plus de ne dérangé aucune activité, permet à *Coraulis* de se pourvoir d'un espace délimité naturellement par les éléments existants et les flux de circulation. En effet, *Coraulis* vient s'appuyer contre un mur de placo-plâtre (mitoyen aux salles de classe), futur emplacement du sas d'entrée et de la régie, ainsi que du matériel électrique permettant la sanabilité du dispositif. Il se positionne tout le long d'une paroi de polycarbonate, espace ouvert sur la métropole, *Coraulis* s'implanterait en son bord permettant la visibilité du dispositif depuis l'espace public, un accès pompier direct et le désenfumage naturel en cas d'incendie ou de surchauffe du matériel électronique. Ainsi, *Coraulis* s'intègre, son emplacement stratégique incite à la reconnaissance d'un espace propre, sans pour autant marquer une frontière nette dans l'espace tampon, il participe à la couture entre enseignement, recherche, architecture et design. Entre flux de circulation, sieste dans la bibliothèque et parties de badminton, *Coraulis* fera partie du paysage, offrant une nouvelle matérialité à l'espace tampon. Espace de contemplation, il entraînera une nouvelle définition de ce lieu formé exclusivement de polycarbonate et de béton.

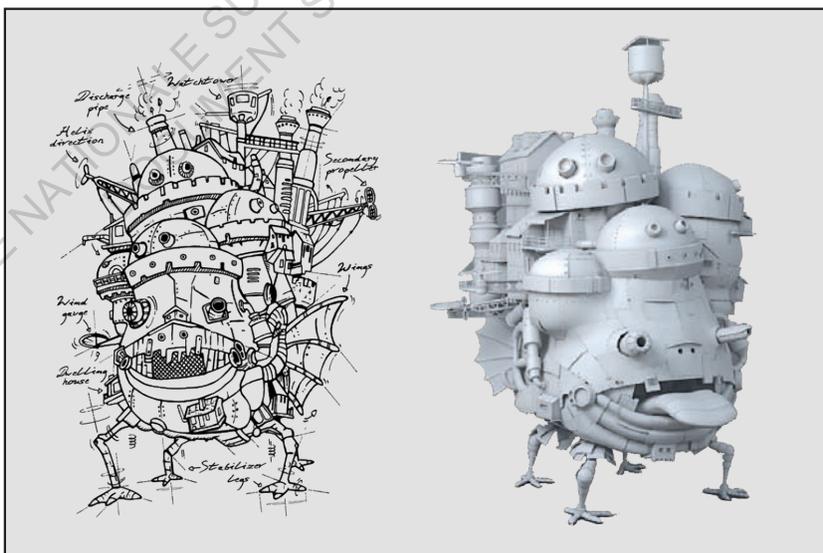


Photo de
l'emplacement définitif de *Coraulis*
©Bruno Suner

Niche sensorielle

Coraulis ouvre les portes à un monde situé à mi-chemin entre réel et virtuel, afin de plonger l'utilisateur dans un bain de sensations de telle sorte que le virtuel perçu se confonde avec le réel. Un peu comme une déréalisation, ce nouveau dispositif est la promesse de vivre des réalités qui ne sont pas les nôtres ou qui peuvent le devenir dans un futur proche. Mais si *Coraulis* ouvre les portes à ces nouveaux mondes, qu'en est-il de son monde à lui ? *Coraulis* est un dispositif scientifique, censé s'installer dans une école d'architecture ; alors l'immersion dans un monde virtuel, fictionnel ou fantastique, doit-elle commencer après être entrée dans le dispositif ?

Ce nouvel outil de recherche, peut accueillir jusqu'à 19 personnes, c'est un espace à part entière, ce n'est pas juste un casque de réalité virtuelle que chacun enfilerait pour faire une partie. Avec Alexandra, nous souhaitons que « l'objet *Coraulis* » soit lui-même perçu comme venant d'un nouveau monde, former l'intrigue dès la perception de l'objet dans son champ visuel, l'utilisateur quittant sa sphère d'influence pour vouloir accéder à cette niche cognitive et culturelle. Comme dans *Le Château ambulante* de Miyazaki (film d'animation sorti en 2004), la machine permettant le voyage, est déjà, en elle-même une allégorie du voyage ou d'un monde fictionnel.



Esquisse et
modélisation 3D du château du sorcier Hauru
©Studio Ghibli

L'idée du vaisseau spatial à rapidement surgit dans nos esprits remplis de connotations fantastique et fictionnel. La littérature, le cinéma et la bande dessinée ont abordé ce thème à de nombreuses reprises, notamment dans la saga *Star Wars*¹ avec entre autre le Faucon Millenium ou la série télévisée *Star Trek*² avec le vaisseau USS Entreprise.

*« Espace, frontière de l'infini, vers laquelle voyage notre vaisseau spatial. Sa mission de cinq ans : explorer de nouveaux mondes étranges, découvrir de nouvelles vies, d'autres civilisations, et au mépris du danger avancer vers l'inconnu. »*³

1 - *Star Wars* est un univers de fantasy et de science-fiction créé par George Lucas, la saga comptabilise 8 films au jour d'aujourd'hui ; 1977-2019

2 - *Star Trek* est une série télévisée de science-fiction américaine en 79 épisodes de 50 minutes, créée par Gene Roddenberry 1965-1969

3 - Générique de la série *Star Trek*

Connotations

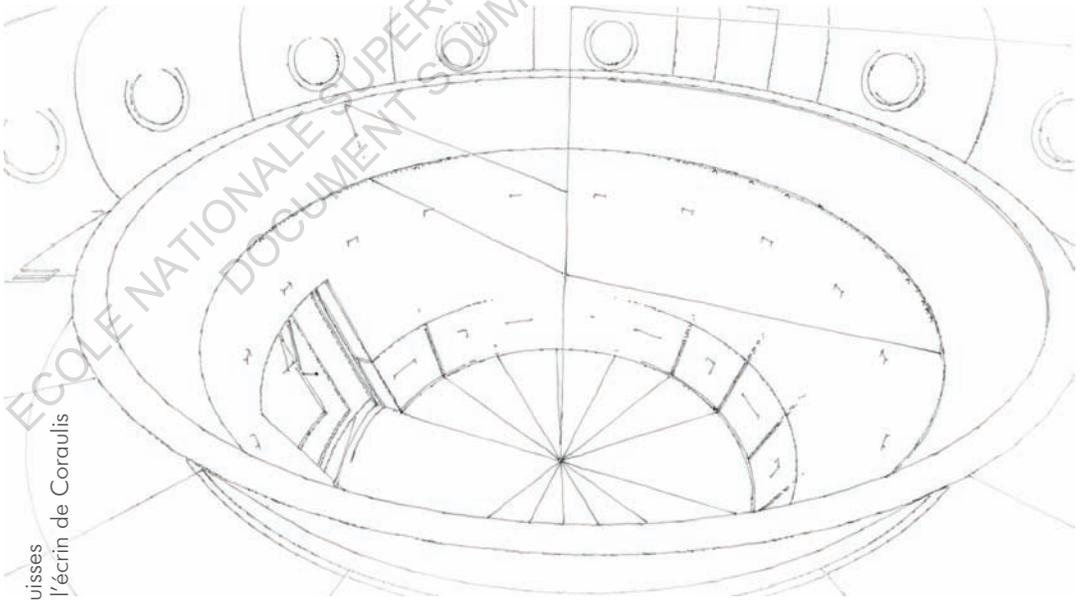
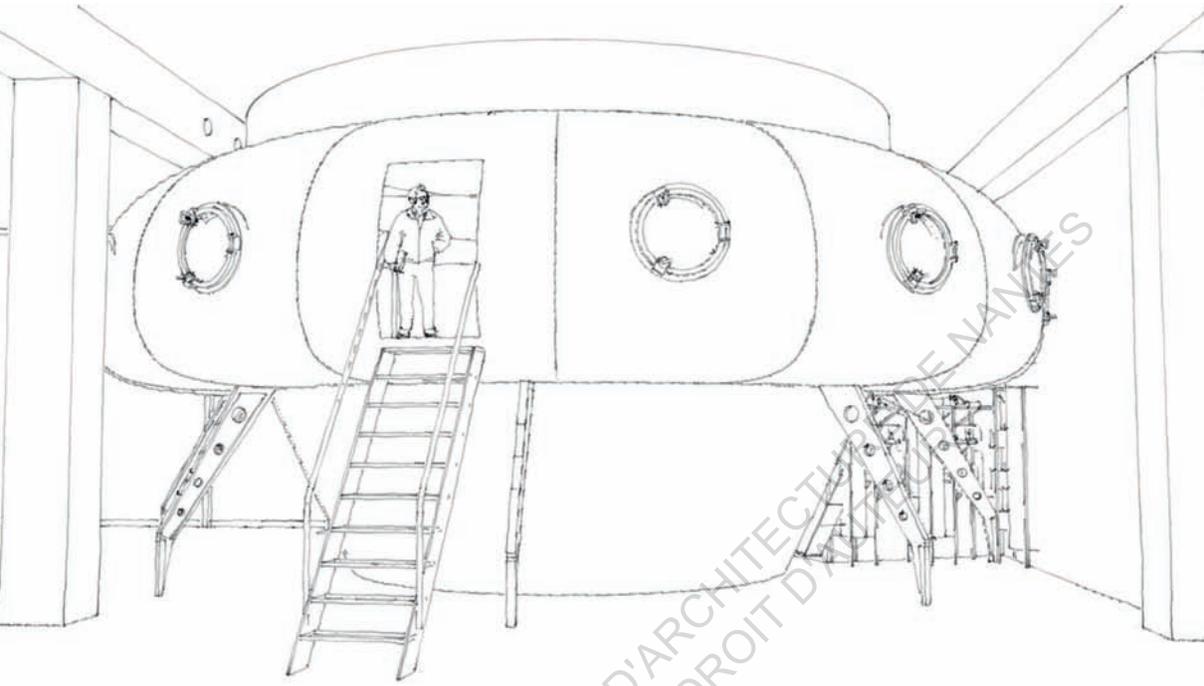
La forme des vaisseaux spatiaux s'inspire de sources diverses : du monde militaire (avion de chasse, navire de guerre, sous-marin), du design automobile, planétaire (*l'étoile noire* dans la saga *Star Wars*), de monuments tels que les pyramides de Gizeh ou encore de formes naturelles comme le vaisseau de nature animale dans *Stargate Atlantis*¹. Nous avons donc commencé par esquisser ce que pourrait devenir le vaisseau *Coraulis*. Mélange entre navettes spatiales et soucoupes volantes. Rapidement nous avons voulu offrir un nouvel espace à cette navette, très souvent, le vaisseau est en premier lieu un véhicule : on l'emprunte pour se déplacer dans l'espace mais lui-même est peu détaillé.

La fonction de déplacement n'est pas nécessairement l'unique intérêt dans l'univers de science-fiction, un vaisseau spatial peut souvent devenir un huis clos où se déroulera une histoire fictionnelle, comme dans *Alien*².³ Nous avons alors imaginé un espace de corole surplombant l'espace d'immersion. À l'image d'un cockpit ou d'un ancien théâtre anatomique, un espace permettrait aux usagers de contempler l'expérience immersive en tant que spectateur et de permettre aux professeurs ou étudiants d'expérimenter et de contrôler l'immersion dans un espace extérieur à celui de l'aire d'évolution de l'écran. Ainsi, l'écrin prenait forme, une carapace venait faire le tour de l'écran pour s'apparenter au réacteur du vaisseau ; une forme bombée, ronde et aplati venait se poser sur le réacteur pour former le cockpit ; cet espace supérieur était maintenu par un support métallique s'apparentant à des pieds ou trains d'atterrissage. Puis, plusieurs autres caractéristiques techniques venaient se rajouter, comme des hublots pour apporter de la lumière à l'intérieur de la passerelle supérieure, un escalier escamotable comme celui des petits avions permettait l'accès au dispositif depuis le dessus. Enfin, la partie comportant le sas d'entrée inférieur et la régie nodale formait la partie machinerie du vaisseau, comme un cube recouvert de tuyauteries, de câblages divers et de grilles d'aération. Il venait s'accrocher au mur de l'école pour puiser dans ses ressources calorifiques.

1 - *Stargate Atlantis* est une série télévisée tirée du film *Stargate* ; 100 épisodes de 42 minutes ; 2003-2009

2 - *Alien* est un film de science-fiction réalisé par Ridley Scott, sorti en 1979

3 - *Paragraphe inspiré de l'article «Vaisseau spatial» de Wikipédia*

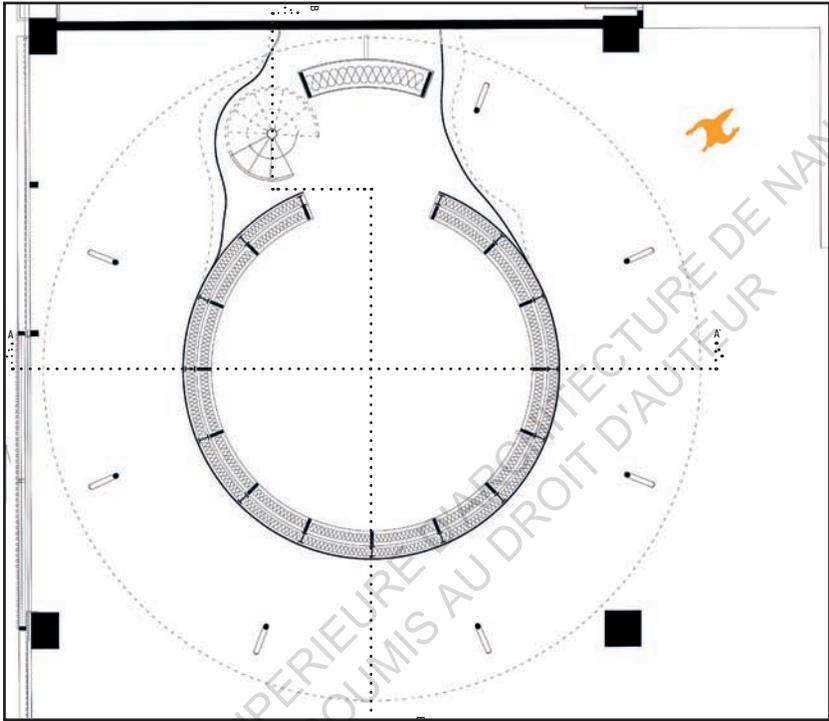


Imaginé comme cela, notre vaisseau nous plaisait, mais l'image que pourrait véhiculer cet écran était beaucoup trop enfantine. C'est par le biais des professeurs que nous nous en sommes rendu compte, ce qui s'apparentait à une microarchitecture ou mobilier de design ressemblait plutôt à un décor de cinéma, remplie de connotation littéraire et cinématographique. Nous avons décidé d'épurer cet objet. Après suppression des hublots et de l'escalier escamotable, de la transformation du cube recouvert d'éléments décoratifs en une coque organique continue, et l'amincissement des trains d'atterrissage en fines pattes métalliques, ainsi est né « *Parasite* ».

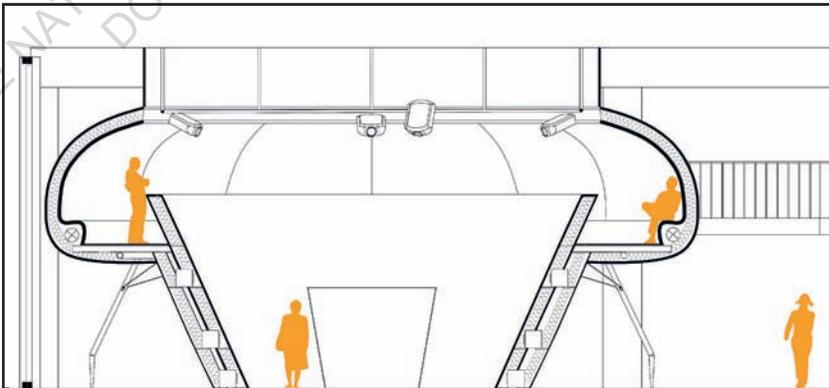
« Nom masculin du latin *parasitus*, du grec *parasitos*, de *sitos*, nourriture. C'est un être qui vit aux dépens d'un autre sans le détruire (ex. le pou, le ténia). Comme un organisme vivant, le *Parasite* s'installe dans l'école d'architecture sur la place du 1A, occupant un espace jusqu'alors inutilisé. Il se greffe, mute, évolue et vie en fonction de l'énergie créative de l'école. Comme l'Absence (cf. page 30), cet objet sans identité propre, attire l'attention. Sa fonction se découvre une fois entré à l'intérieur de sa carapace, cette enveloppe atypique n'est pas seulement une seconde peau, c'est une coque habitée. Entre quatre poteaux et deux dalles béton de l'Ensan, le *Parasite* occupe l'espace. Comme en suspension, la partie haute du 1A est occupé par sa carapace orange, tout en laissant l'espace du dessous libre à la déambulation. À l'intérieur, celle-ci permet aux occupants de s'asseoir et de profiter de la vue plongeante sur *Coraulis* en fonctionnement. Un squelette métallique vient supporter la coursive supérieure qui permet d'ouvrir un nouveau champ d'utilisation du système à 360° de *Coraulis*. Cet espace est une zone de travail et d'observation. L'écran de *Coraulis* se projette jusqu'en haut du garde corps, augmentant alors l'espace de projection. Ses pattes métalliques stabilisent son squelette et viennent, sur l'espace du plateau 1A, rappeler celles d'une tique. Une enveloppe poli-miroir¹ vient recouvrir le cœur du *Parasite*, laissant penser qu'il s'est dressé sur ses pattes, ne touchant ainsi pas le sol. Dans cette coque miroitante se cachent l'entrée du dispositif, l'escalier d'accès et la machinerie. »²

1 - Surface métallique miroir, traitée pour qu'aucun défaut, aucune rayure ne soient visible

2 - Texte co-écrit avec Alexandra Pasturel pour le rendu du projet court



Plan et coupe
du Parasite - rendu du projet court
sans échelle





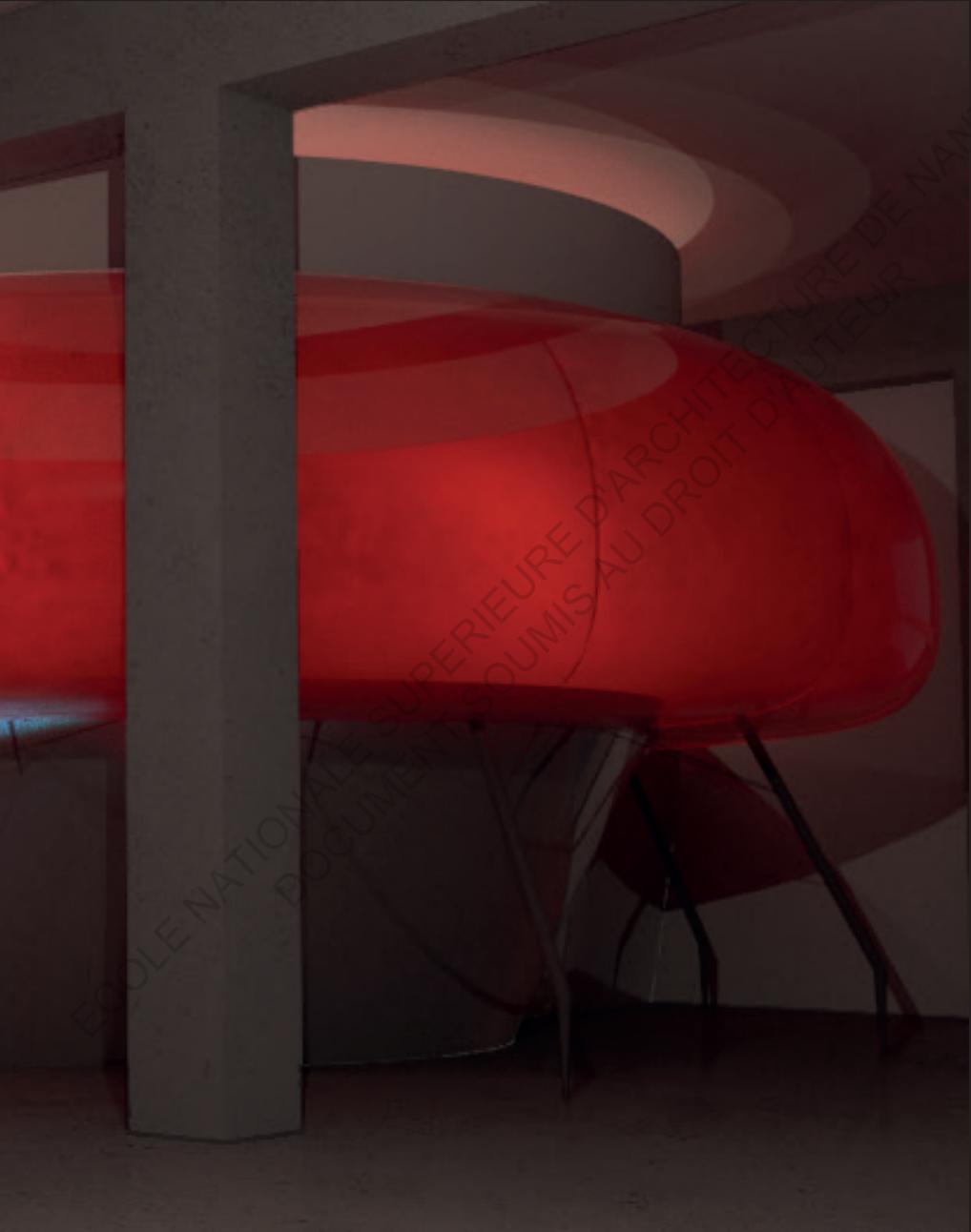


Image de nuit
du Parasite - rendu du projet court

1.2 – Morphogénèse

*« Ce n'est pas l'angle droit qui m'attire
Ni la ligne droite, dure, inflexible,
Inventée par l'homme.
Seule m'attire la courbe libre et sensuelle,
La courbe que je rencontre dans les montagnes
De mon pays,
Dans le cours sinueux de ses rivières,
Dans les vagues de la mer,
Dans le corps de la femme préférée.
De courbes est fait l'univers,
L'univers courbe d'Einstein. »¹*

Le tracé de la forme ne s'est pas fait à la manière d'un peintre lyrique, laissant courir les lignes, sans retenir la main, jouant avec des formes libres, faisant tourner le compas et libérant le perroquet, ou à la manière de l'atelier Van Lieshout pour *L'Absence*. Cette microarchitecture installée sur le parvis de notre école est envisagée comme une sculpture haute de 6 mètres. Joep Van Lieshout a imaginé cette masse en mouvement résultant d'un coup de crayon instinctif. Contrastant avec l'architecture rectiligne de l'école, cette masse bleutée est une forme dénuée de contours très définis ou d'intention particulière.



¹ - Oscar Niemeyer (architecte Brésilien) - propos recueillis par Cynthia Garcia

Photo
de l'Absence



À l'inverse, nos références fantastiques et spatiales nous ont amené à définir une intention morphologique nette à *Coraulis*, une navette spatiale est un assemblage d'éléments mécaniques avec une fonction propre. Là était notre base.

Ce sont les fonctions qui ont permis de définir la forme, cependant, c'est nous qui avons décidé quelle forme allait prendre ces fonctions. Et de l'extérieur, l'objet ne dévoile rien de son intérieur. Il y a un côté sculpture dans le dessin de cet écran, ce projet a pris forme lorsqu'on s'est libéré des attentes de performance, des problèmes techniques et économiques. La forme n'est donc pas le résultat d'une prise en compte exclusive, appliquée, rigoureuse de ces contraintes mais de leur dépassement. Alors, même si cet écran peut être considéré comme une forme complexe, c'est un assemblage de formes simples, strictement limitées à l'usage : «une carapace venait faire le tour de l'écran pour s'apparenter au réacteur du vaisseau ; une forme bombée, ronde et aplati venait se poser sur le réacteur pour former le cockpit».

Cette carapace et ce cockpit auraient pu prendre énormément de forme, mais nous y avons appliqué une certaine logique, sinon, comment défendre aux yeux du jury et du public le fait d'avoir obtenu telle forme et non telle autre, quand cette forme est alors soutenue par ses seules qualités intrinsèques et ne peut plus être associée à priori à une fonction.

Rationalisation conceptuel

Nous avons commencé à définir cette morphologie par de nombreux croquis très sommaire. Avec Alexandra, nous n'avons pas la virtuosité du coup de crayon, nos dessins ne sont pas esthétisants, ce sont des formes brutes, sans détails ni ombres portées. Et, très rapidement dépassé par la complexité de la forme, nous l'avons modélisé et fait évoluer via l'outil informatique.

En effet, la conception de ce type d'architecture sollicite, au niveau cognitif, des mécanismes d'élaboration perceptive et procédurale différents par comparaison avec la conception traditionnelle. Par moment, il nous était très compliqué de nous comprendre nous même dans nos idées, nos formes tendaient à une absence totale d'orthogonalité et nous n'avions pas l'habitude de travailler uniquement avec des surfaces courbes continues. Il était alors difficile de dessiner sur papier les représentations mentales correspondantes et de ce fait, la résolution de problèmes dans le domaine spatial. C'est pour cela que nous avons avancé vers une rationalisation conceptuelle, tout d'abord à la main, puis grâce à l'appui informatique nous avons eu la possibilité de contrôler son évolution.

Alors bien sûr, nous n'avons pas limité notre architecture à la géométrie de Platon¹ et la définition de ses corps, mais nous avons réduit la complexité de notre forme par le biais de formes élémentaires.

Le « réacteur du vaisseau », partie basse de notre écran, venait entourer l'écran du dispositif et prenait la forme d'un cône inversé tronqué, comme un cornet de glace qu'on aurait croqué par le dessous. Sur ce « réacteur » venait ensuite se poser notre cockpit, espace permettant l'observation depuis l'intérieur du « réacteur », et de ce fait de l'écran. Pour avoir un maximum de champ visuel, nous voulions que cette passerelle fasse le tour complet de l'écran par le dessus, mais en raison de l'espace supérieur très restreint de notre emplacement (poutre en périphérie, engrenage permettant l'ouverture des baies de désenfumage, poteaux, paroi de polycarbonate et mur), il nous fallait un volume réduit au maximum pour s'y intégrer. Sur notre cornet de glace, nous y avons alors posé un donut.

1 - En géométrie euclidienne, un solide de Platon est un polyèdre régulier et convexe ; Il existe seulement cinq solides de Platon

De forme torique, cette passerelle vient occuper au maximum l'espace libre entre l'écran et le plafond sans rentrer en collision avec un élément existant, ce tore vient juste effleurer le contexte environnant.

Ensuite la salle des machines. Il nous fallait un espace comprenant tous les éléments techniques de *Coraulis*, mais dans un souci d'éclairage et d'acoustique, il ne pouvait être compris dans l'aire d'évolution de l'écran et de la passerelle. Alors, pour faire au plus simple, nous avons emboîté un cube entre le réacteur, le cockpit et le mur mitoyen aux salles de classe. Ainsi ont été décidés les formes élémentaires constituant notre base. Alors, ces géométries, certes, ne traduisent pas en clair la fonction principale qu'elles abritent. Néanmoins, il y a accord entre la valeur symbolique du cercle, qui rassemble, qui embrasse, et la destination éducative et théâtrale du dispositif. Faire cercle signifie bien : se rassembler, converger.

De plus, ces géométries permettent de limiter au maximum l'impact au sol du dispositif, comme un champignon, l'écran vient s'implanter dans l'espace du 1A en prenant un maximum de place en hauteur et un minimum de surface au sol.

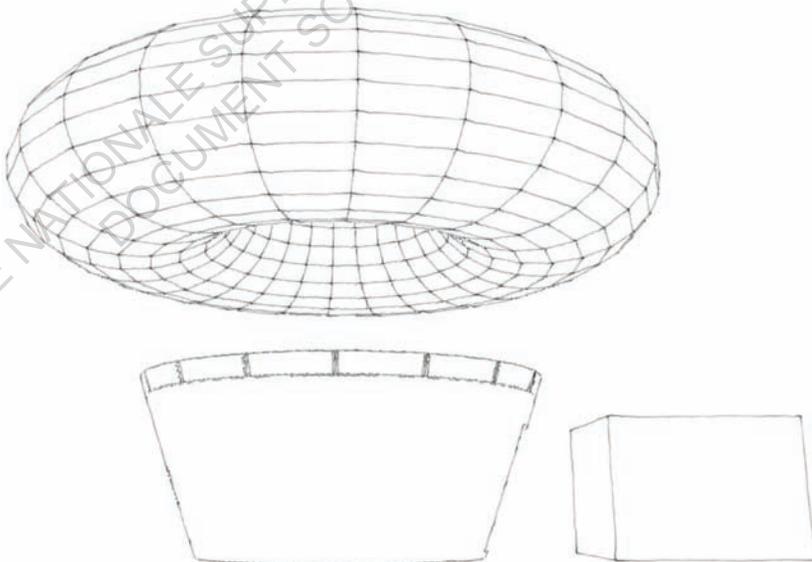


Schéma
des formes élémentaires
de l'écran

L'outil numérique

Ensuite, nous sommes passé sur l'outil numérique, et pour ne pas s'égarer dans la forme qui est modifiables à l'infini, nous avons toujours travaillé avec le contexte à l'aide d'une modélisation complète de l'emplacement dans lequel nous nous implantions. Puis en affinant les traits, en créant une continuité morphologique entre nos géométries, nous avons effectué de faible glissement sans bouleverser la forme de base. C'est en travaillant sur le logiciel Sketchup que la carapace du *Parasite* s'est en premier lieu développée.

Pendant la conception, il y avait une interaction constante entre notre représentation mentale, le monde binaire, et le monde physique, constitué de représentations bidimensionnelles, car le dessin détient un rôle fondamental dans la conception spatiale, comme outil mais surtout comme pratique mentale. À travers l'application de cette pratique, nous apprenions aussi à gérer efficacement la cohérence entre les qualités spatiales de *Coraulis* et à rendre plus efficace la communication lors de la conception. Puis nous sommes passé sur des modèles tridimensionnels. En effet, bien que notre forme n'exige qu'une représentation numérique et papier, la recherche d'une morphologie peut aussi faire appel à la fabrication de modèles physiques. Pour vaincre les limites des méthodes de représentations traditionnelles, nous avons exploité le mariage de l'ordinateur et des nouvelles machines de l'école pour faire du « prototypage rapide », et ainsi profiter des technologies d'impression 3D pour produire un modèle physique à l'échelle 1:100^{ème} de notre écrin.

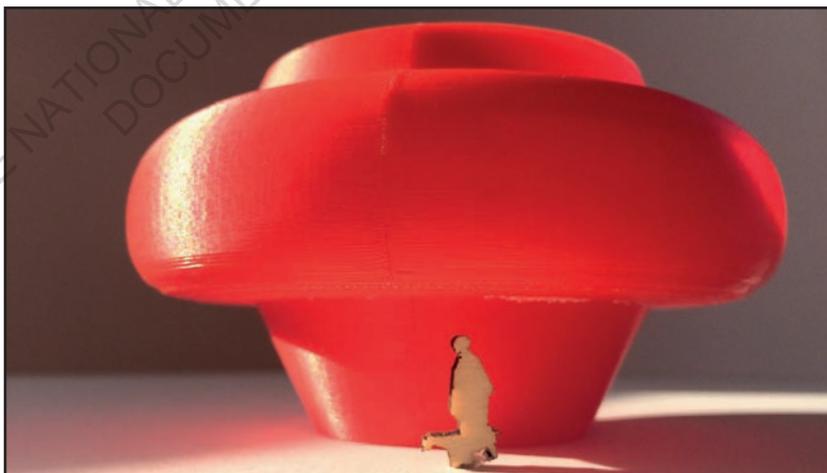


Photo de la maquette 1 : 100^{ème} de la forme de l'écrin

Aménagement intérieur

Un peu comme une sculpture, la forme extérieure de notre écrin était déterminée (non définitive), mais à l'inverse de la sculpture, il s'agit ici d'une conception qui définit des qualités spatiales déterminées par des nécessités, alors il nous restait l'intérieur de l'écrin à dessiner. L'usage de la double courbure dans le bâtiment entraîne le renouvellement de la plupart des équipements : fenêtres, portes, meubles. L'architecture de l'écrin en courbes ouvre de nouvelles et multiples perspectives, au sens propre et figuré. L'une des premières conséquences concerne les ouvertures. Elles peuvent être orientées dans toutes les directions, ce qui n'est pas le cas avec des façades plates, les ouvertures zénithales ou d'inclinaisons diverses selon l'usage de la pièce peuvent apporter un éclairage adéquat, une ventilation très efficace, et surtout sont orientées et dimensionnées pour offrir le point de vue intéressant sur l'extérieur. Cependant, à l'inverse de l'architecture d'Antti Lovag¹, *Coraulis* doit être confiné, seulement éclairé et ventilé mécaniquement en plus d'être « complètement étanche ». Alors nous nous sommes seulement penché sur l'aménagement de l'espace de la passerelle, en s'inspirant du travail de Matthias Pliessnig. Talentueux ébéniste et designer de meubles, Pliessnig s'aide de la modélisation paramétrique pour concevoir ses meubles en 3D. Chaque mobilier qui sort de son atelier est unique, toujours en bois, aux formes organiques et linéaires, épousant à la perfection les courbes du corps. M.Pliessnig sculpte l'espace en cintrant à la vapeur et en assemblant de fine lamelles de bois, le tout forme un mobilier évidé, une coque aérer, souvent de très grande dimension.

Nous aimerions avoir cette même douceur à l'intérieur de l'écrin, si *Coraulis* doit être confiné, alors autant qu'il soit aussi un espace confortable où la passerelle serait comme un cocon avec pour seule perspective : le monde virtuel projeté sur l'écran à 360°C.

Alors nous avons esquissé des espaces d'assise et de garde corps qui viennent épouser les formes des corps des usagers, le tout conçu comme un ensemble unifié et fixe. Celui-ci offrirait la meilleure adéquation possible à l'usage, en économisant les gestes et les déplacements, réduisant la perte d'espace, et rendant l'espace aux volumes exigus en un espace agréable pour se mouvoir seul ou en groupe.

1 - architecte « habitologue » hongrois spécialisé dans l'architecture organique





Image de l'intérieur
du Parasite - rendu du projet court

1.3 - Couleur et symbolique

*« Choosing colours should not be a gamble.
It should be a conscious decision.
Colours have a meaning and a function »¹*

Ce que l'on appelle le « syndrome de Stendhal », en référence à l'écrivain français Stendhal, qui sortit empli d'émotions craintive de l'église *Santa Croce* à Florence : « J'étais dans une sorte d'extase, par l'idée d'être à Florence, et le voisinage des grands hommes dont je venais de voir les tombeaux. Absorbé dans la contemplation de la beauté sublime, je la voyais de près, je la touchais pour ainsi dire. J'étais arrivé à ce point d'émotion où se rencontrent les sensations célestes données par les Beaux Arts et les sentiments passionnés. En sortant de Santa Croce, j'avais un battement de cœur, la vie était épuisée chez moi, je marchais avec la crainte de tomber. ».² Ce syndrome rend compte des désordres psychologiques profonds causés par le contact avec des œuvres d'art à la très grande vivacité et variété de tons.

L'animal

Depuis une quarantaine d'années, nous, consommateurs à outrance d'imageries variées, croisons chaque jour des milliers d'affiches, de signaux digitaux, d'écrans, d'enseignes, d'affichages publicitaires, de titres de journaux et d'objets de consommation courante. Sous l'effet de cet amas commercial, c'est peu dire que nos yeux, sollicités en permanence, se fatiguent.³

Nous voulions alors aller à l'encontre de ce branding coloré, rechercher une plus grande simplicité et une forte signification dans la représentation de cet écrin. De son premier nom *Parasite*, *Coraulis* se voulait comme un organisme vivant. Animal mutant et évoluant en fonction de l'énergie créative de l'école, son identité rappelait celle d'une tique. De sa connotation forte à une espèce animale extra-terrestre, l'idée était de rendre cet écrin étranger à notre « spectre visuel habituel ».

1 - Verner Panton - *Notes on colour*, 1997 . Danish Design Center ; 48 p.

2 - Stendhal - *Rome, Naples et Florence*, 1826 ; 423 p. ebook

3 - Paragraphe inspiré d' E.Brémont dans *L'intelligence de la couleur*, 2002 ; 255 p.

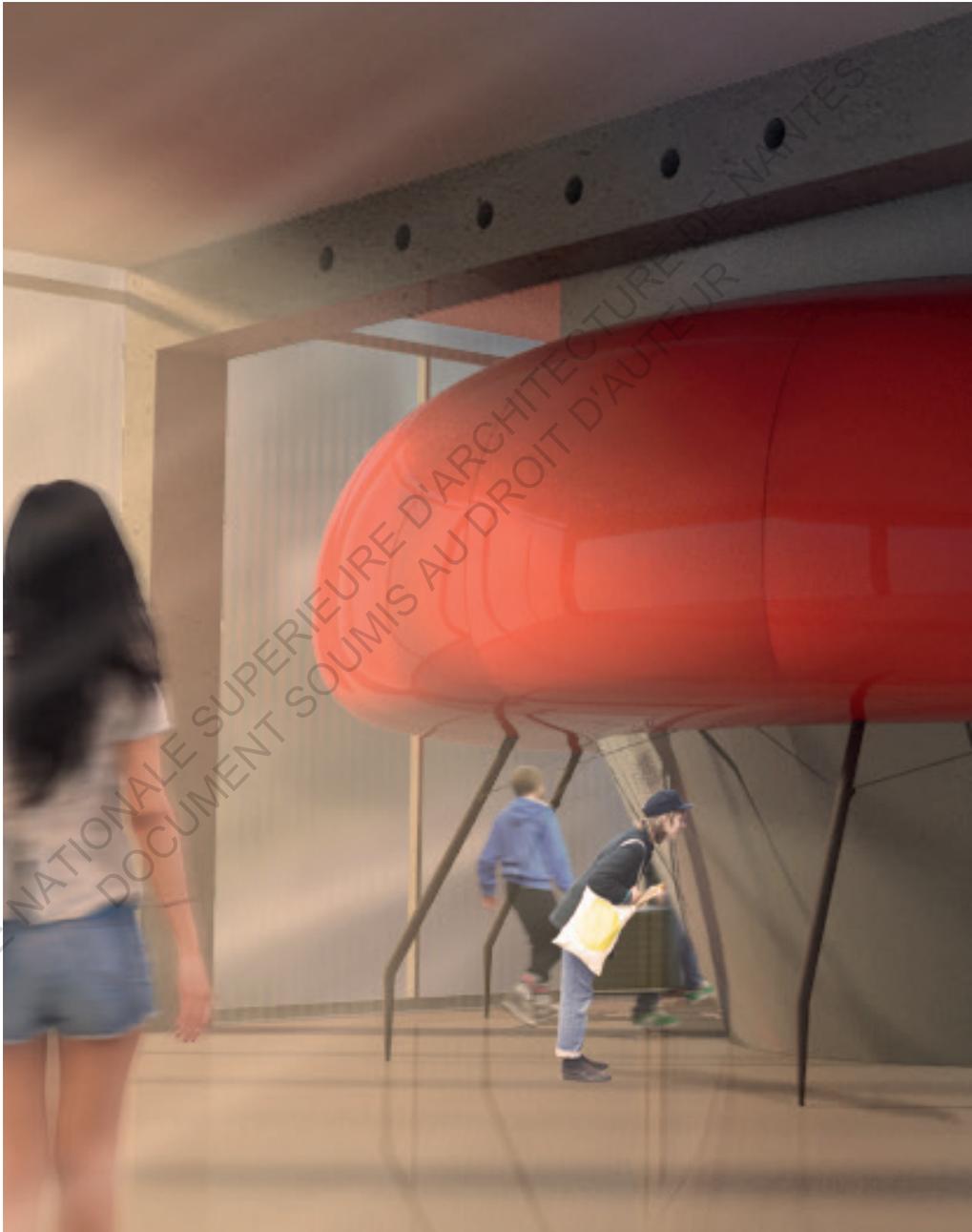
Image
d'un des monstres de Xana
© MoonScoop



En tirant l'inspiration dans la littérature et le cinéma de science fiction, nous avons pris en référence de nombreuses créatures fantastiques comme les monstres de Xana dans le dessin animé *Code Lyoko*¹, les créatures extra-terrestres dans le livre de H.-G. Wells *La Guerre des Mondes* ou encore les sentinelles dans le film *Matrix* des frères Wachowski.

Dans un désir d'une évocation mécanique et évolutive, une enveloppe poli-miroir venait recouvrir le cœur du *Parasite* (l'écran du dispositif), laissant penser qu'il se dressait sur ses pattes, ne touchant ainsi pas le sol. Pour son corps, nous voulions une couleur vive, fondamentale dans la mesure où elle contribue à révéler l'expression spatiale et la forme bombée de la carapace. L'effet de cette couleur est étroitement lié à la surface recouverte et à ses dimensions, aux plans adjacents, aux volumes qu'elle qualifie, à l'intensité de la lumière qui s'y projette et également à la texture. Le choix de cette couleur vive est une composante majeure du projet bien qu'elle ne constituera peut-être que l'ultime étape de la réalisation. Nous sommes alors parties sur un coloris orangé. L'orange se fait presque insignifiant dans le monde animal, seuls quelques coccinelles, grenouilles et poissons témoignent de sa présence dans le monde vivant. De plus la couleur orange dégage une lumière très riche, vive, elle éveille et donne toute sa mesure dans un environnement terne, les pièces exposées au nord ou qui ne profitent guère de la lumière naturelle gagneront à s'ennoblir de ces tonalités chaleureuses.

¹ - *Code Lyoko* est une série télévisée d'animation française réalisée par J. Mouscadet ; 97 épisodes de 24min ; 2003-2007



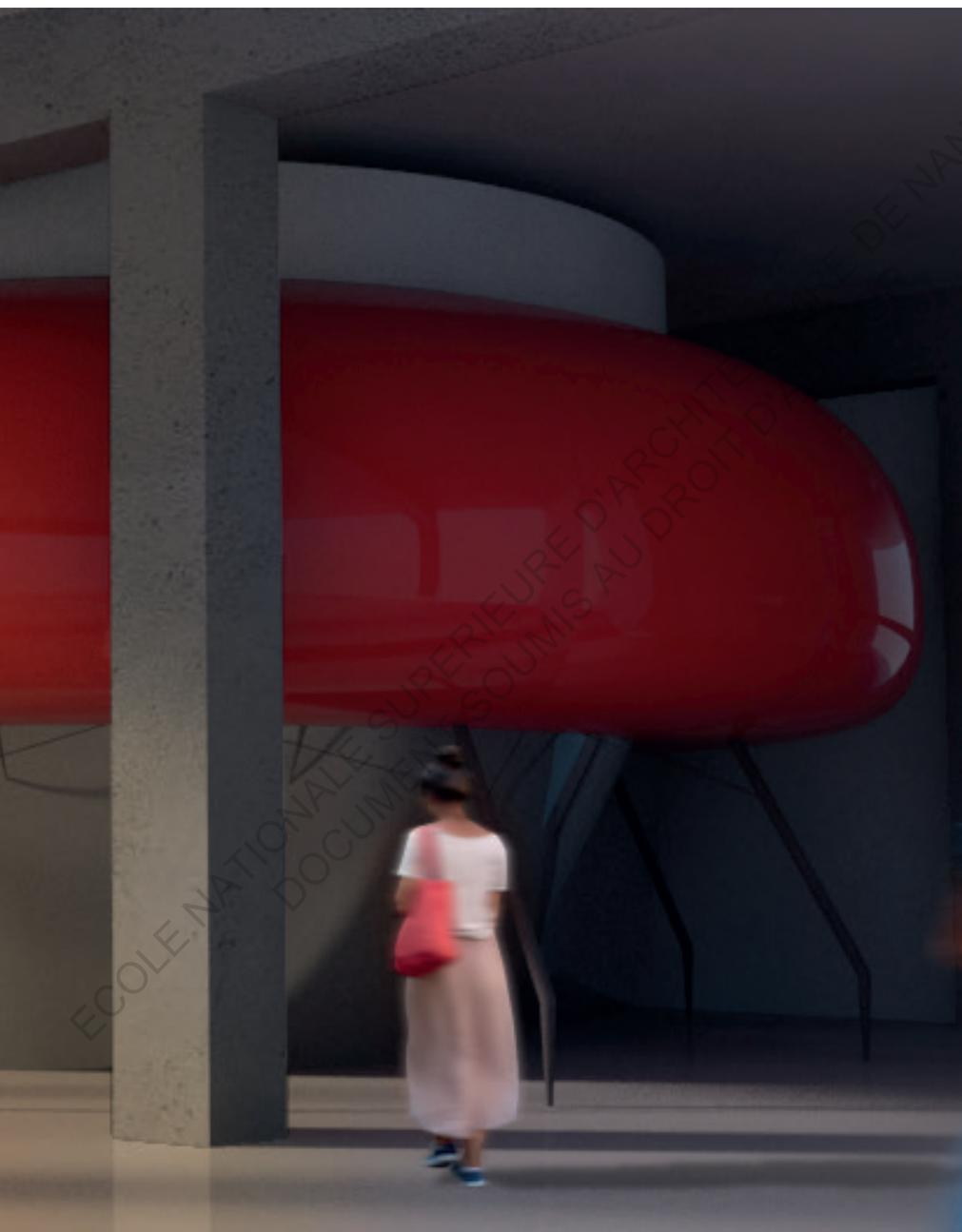


Image de jour
du Parasite - rendu du projet court

La navette spatiale

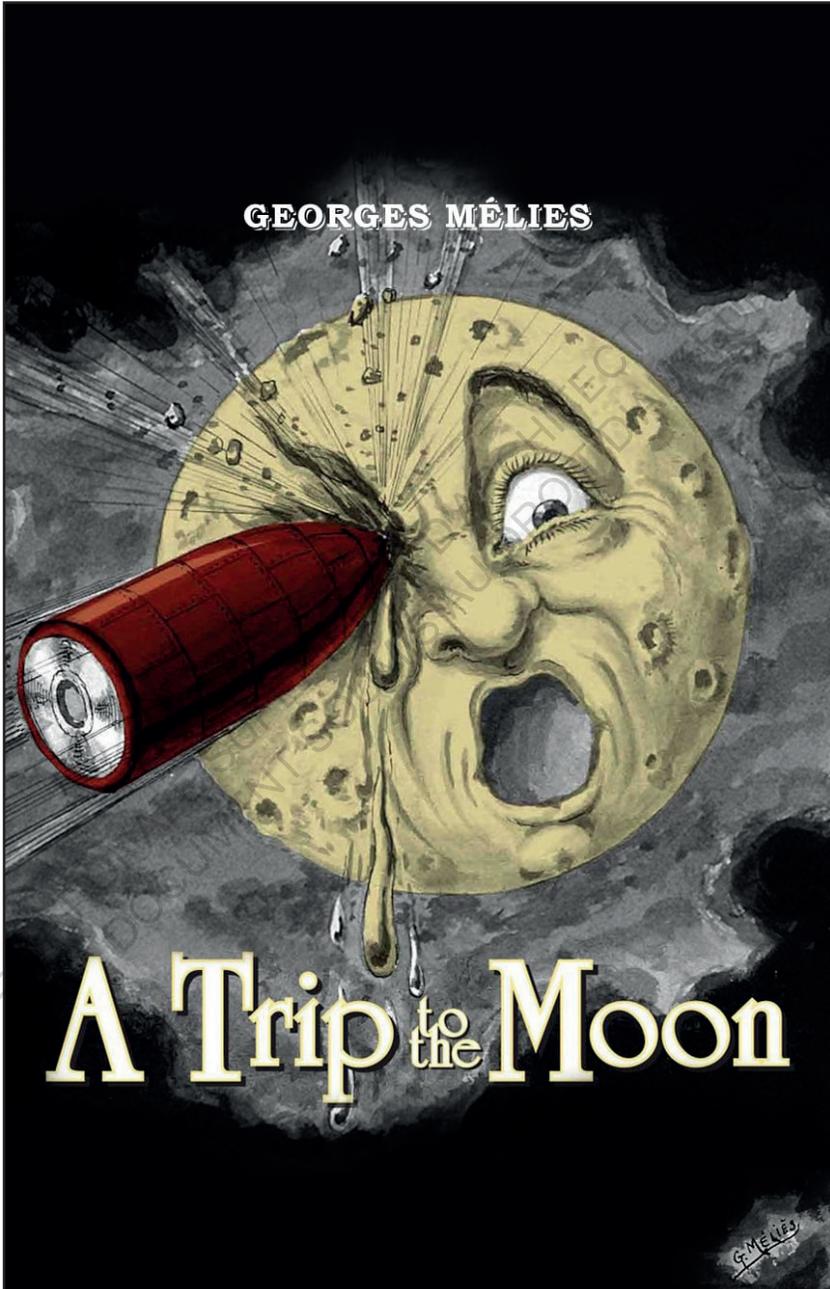
Par la suite, la structure de l'enveloppe de *Coraulis* a changé (cf. partie 2), les pattes servant de structure porteuse à la passerelle supérieur supprimées, l'image de l'organisme vivant n'était plus d'actualité.

Nous avons alors décidé de garder l'aspect poli-miroir de la partie basse, mais décidons de changer la couleur de la coque bombée. Toujours dans le désir d'une connotation spatiale, le *Parasite* se transforme en vaisseau, modèle lunaire ou fusée. D'une couleur forte et très significative de ce monde « nasaïque », représentative d'images véhiculées dans nos esprits à travers la télévision, le monde du cinéma ou la littérature, nous avons recherché une couleur rouge, vive, presque primaire. Prenant en référence le vaisseau du dessins animés *Les petits Einstein*, le modèle lunaire (colorisé) du film *Le voyage dans la lune* de George Méliès ou encore la fusée culte à damier rouge et blanche de Tintin¹. *Coraulis* serait formé d'une surface continue marqué par une bichromie tranchée nette, d'un poli-miroir en partie basse et d'un rouge intense en partie haute.

Puis s'est posé la question de la connotation. Comme expliqué précédemment, la couleur n'est pas que spatiale, elle vient apporter un sens à l'écrin de *Coraulis*, elle lui donne une image significative ; est-ce une créature ? un parasite ? une fusée ? un modèle lunaire ?

Mais avons-nous besoin de cette image ? Lors de la conception de l'écrin, comme expliciter dans la sous-partie précédente, nous étions partie d'une référence, puis nous avons continué à avancer avec ce désir de donner une connotation fictionnel ou « nasaïque » à *Coraulis*, mais est-ce nécessaire ?

¹ - Tintin est un personnage de fiction créé par le dessinateur belge Hergé



Dessin
de G. Méliès pour l'affiche
du film *Le voyage dans la lune*

L'objet

Lorsque A.Kapoor¹ a créé *The Farm* ou *Yellow*, il ne clamait pas représenter quelque chose. Ses œuvres ne sont pas réductibles à une dimension unique, ses sculptures monumentales, comme ses étranges miroirs vides, explorent les seuils du regard et donne une puissance de la forme et de la couleur quasi mystique. Par exemple le *Cloud Gate* parfois interprétée comme l'expression bouddhiste mais que les habitants de Chicago ont baptisé « The Bean » (le Haricot).

« L'interprétation des œuvres faite par les critiques occidentaux reflète cette variété de catégories interprétatives : certains commentateurs considèrent ses œuvres comme relevant du sacré, du mythologique, alors que d'autres comme une confrontation à l'« étrange freudien » ou encore les dénoncent comme des « artifices de fêtes foraines ». »²

Alors oublions la bichromie et la référence imagée, donnons un sens sculptural et mystique à *Coraulis*. Comme une peinture qui devient sculpture, on enlève le poli-miroir de cette forme continue et on garde le rouge. Henri Matisse, lui, aimait le rouge, au point de titrer bon nombre de ses peintures en y associant cette couleur (*Grand intérieur rouge*, *Les Tapis rouges*, *La Desserte rouge*, *Les Poissons rouges*). Il décrit même tout son atelier, dont il fera un tableau intitulé *l'Atelier rouge* : « le sol est rouge sang de bœuf comme les carrelages provençaux ; le mur est rouge ; c'est comme si le sang s'était infiltré pour tout teindre. Ce rouge est comme une nuit chaude (...)».

Alors pourquoi *Coraulis* ne serait pas entièrement fait de rouge lui aussi ? Et pour éviter toute connotation et tout effet « d'overdose de couleur », il n'y en aura qu'une.

1 - Anish Kapoor est un artiste plasticien britannique

2 - Tiré d'un article écrit par C.Vial-Kayser - *Anish Kapoor's Works Seen by Homi Bhabha* (cf. médiagraphie)

L'Atelier rouge
peinture à l'huile de H.Matisse
1911



Passons sur un écran entre référence cognitive et émotion sensible, passons sur de la représentation monochromatique, d'autres grands artistes peignent que Matisse réduisent aussi la peinture à une couleur unique pour renouveler leur pratique artistique. Vide de représentation et de forme, le monochrome est riche de toutes les intentions, « Malevitch le conçoit comme un passage vers l'infini, Rodtchenko peint une surface matérielle et vide, Newman et Rothko en font un grand champ coloré pour s'ouvrir à une expérience intérieure. Pour Ad Reinhardt, il est l'ultime peinture et pour Ryman ce qui lui permet de mesurer les effets de chaque matériau et support. »¹

Le monochrome représente ainsi une peinture non figurative, peint d'une seule couleur. C'est une peinture qui est libérée et délivrée de toute représentation du réel. C'est une autonomie de la peinture pour qu'elle se suffise par elle-même, pour elle-même. L'architecture, dans un souci de sensibilité picturale pur, a aussi son chef de file. Barragán², pour sa part, vient « conclure le projet par la mise en couleur » et joue principalement sur la matérialité du mur. En effet, la recherche esthétique de Barragán relève d'une astucieuse utilisation de couleurs aussi intense que contrastées, et de l'étude de leur « vibration ».

Nous décidons alors de traiter directement cet objet en tant que peau, comme l'épiderme, la membrane de l'écran serait monochrome, d'un rouge vif tirant vers un bleu céleste. À travers ce monochrome intense, nous cherchons à donner à la future coque colorée de *Coraulis*, de par sa taille, une force émotionnelle et inviter le spectateur à entrer dans la couleur et à s'y perdre. La couleur serait tellement présente que tout le reste disparaîtrait au profit de ce mur coloré qui s'anime au fil des heures grâce à la lumière diffuse de l'espace du 1A. La lumière est un élément primordial, comme pour la peinture et la sculpture, elle fait jouer les couleurs, elle les fait vibrer. La carapace de *Coraulis* devient couleur et non plus support de celle-ci. Il n'y aura donc pas de bichromie, la couleur que nous donnons à ce dispositif immersif est aussi celle de l'objet, de la fonction et de son usage. Nous décidons de son entité et de son identité.

1 - Denys Riout, *La peinture monochrome. Histoire et archéologie d'un genre*, Gallimard, folio Essais, p.14

2 - *Architecte mexicain connu pour son style, synthèse entre l'architecture vernaculaire et Moderniste*

Alors une fois que l'on rentre dans le magnétisme de l'objet et de sa couleur, à un certain niveau psycho-poétique, on laisse notre ressenti et notre imagination agir et on s'éprend à oublier que ce que l'on contemple n'est qu'un objet avec un revêtement ou une peinture.

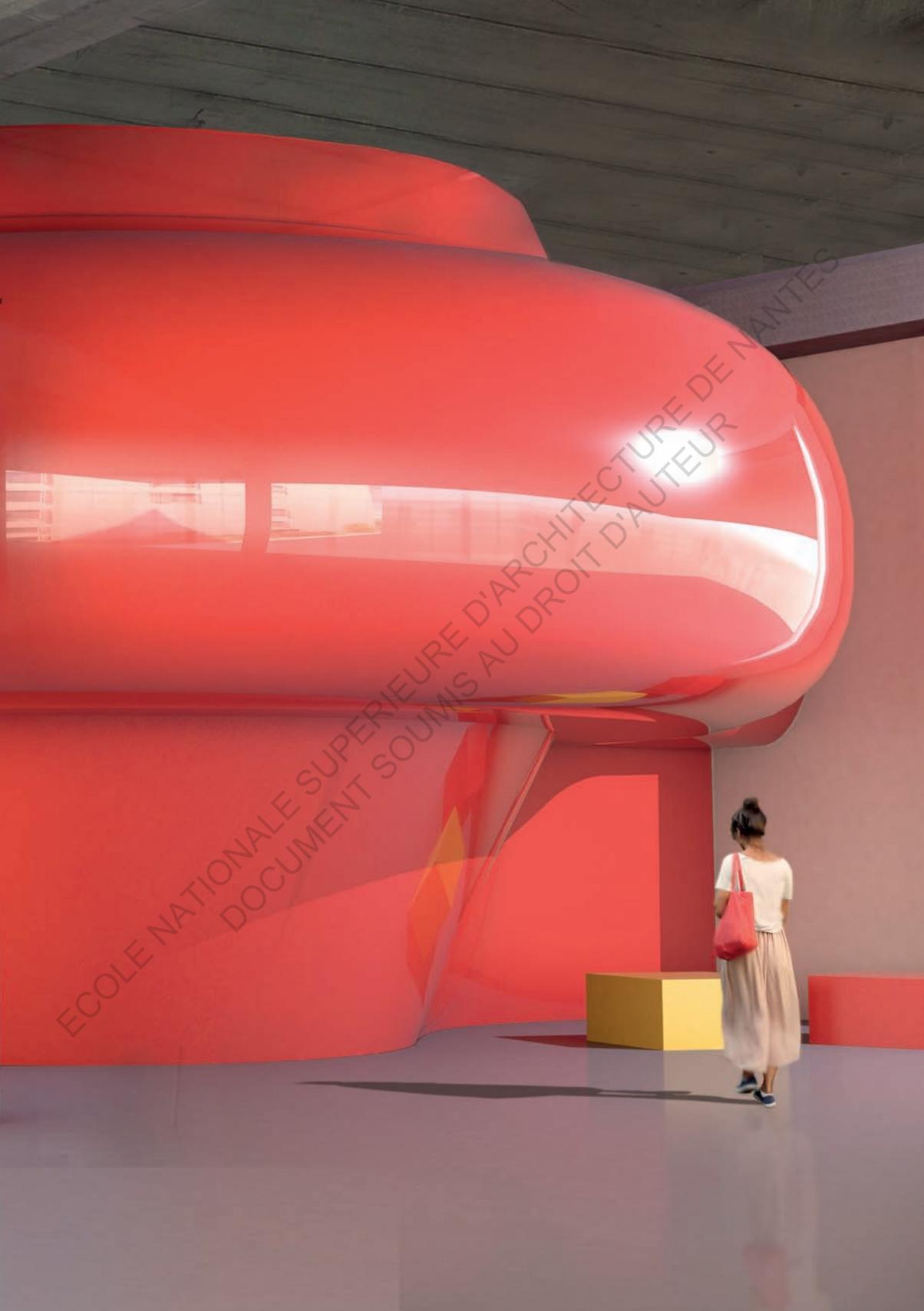
Pour la texture, à l'inverse de Barragán qui joue principalement sur la matérialité du mur par l'emploi d'un crépi rugueux, nous préférons une surface glabre, comme au toucher d'un ballon de baudruche. Notre carapace serait la plus lisse possible. Et la lumière en éclairant ses courbes produirait un dégradé dont la progressivité évoque naturellement la douceur. Un volume extérieur convexe qui appellerait à la caresse.

En définitive, notre écrin prend en charge sa propre mise en scène et dans le même temps, célèbre son auto-proclamation dans l'école d'architecture de Nantes. Par sa géométrie organique, elle s'émancipe du dogme orthogonal des architectes du bâtiment sans pour autant dénaturer ce lieu. Un peu comme la déclaration plastique d'un enseignement libéré de toute tradition, elle est générateur d'image et se définit par un registre de formes, et ingère, agrège ou encore associe les éléments qui l'entoure.



ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
MIS AU DROIT D'AUTEUR

PLACE
CENTRALE



ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

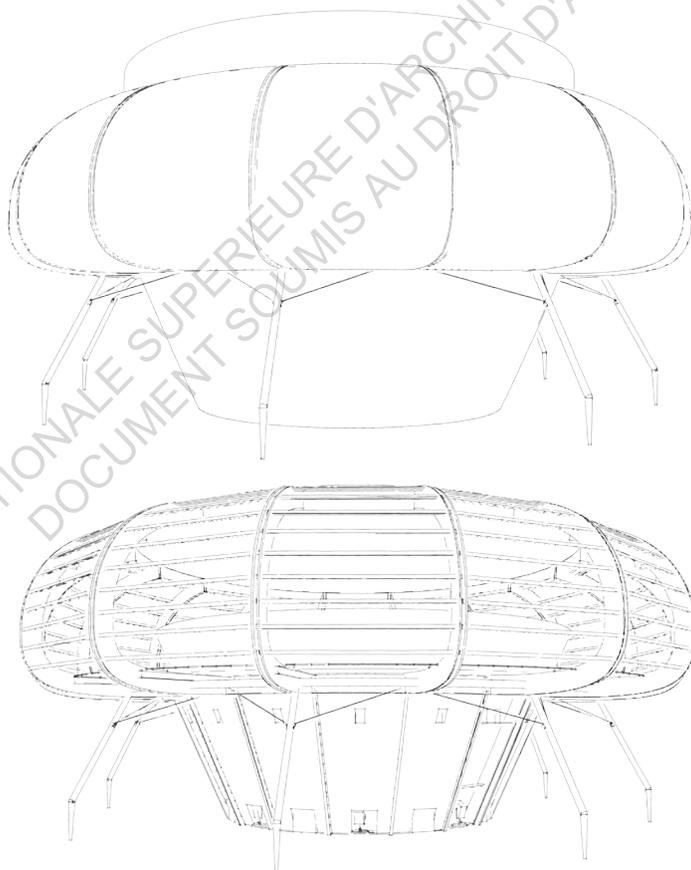


STRUCTURE OSSEUSE

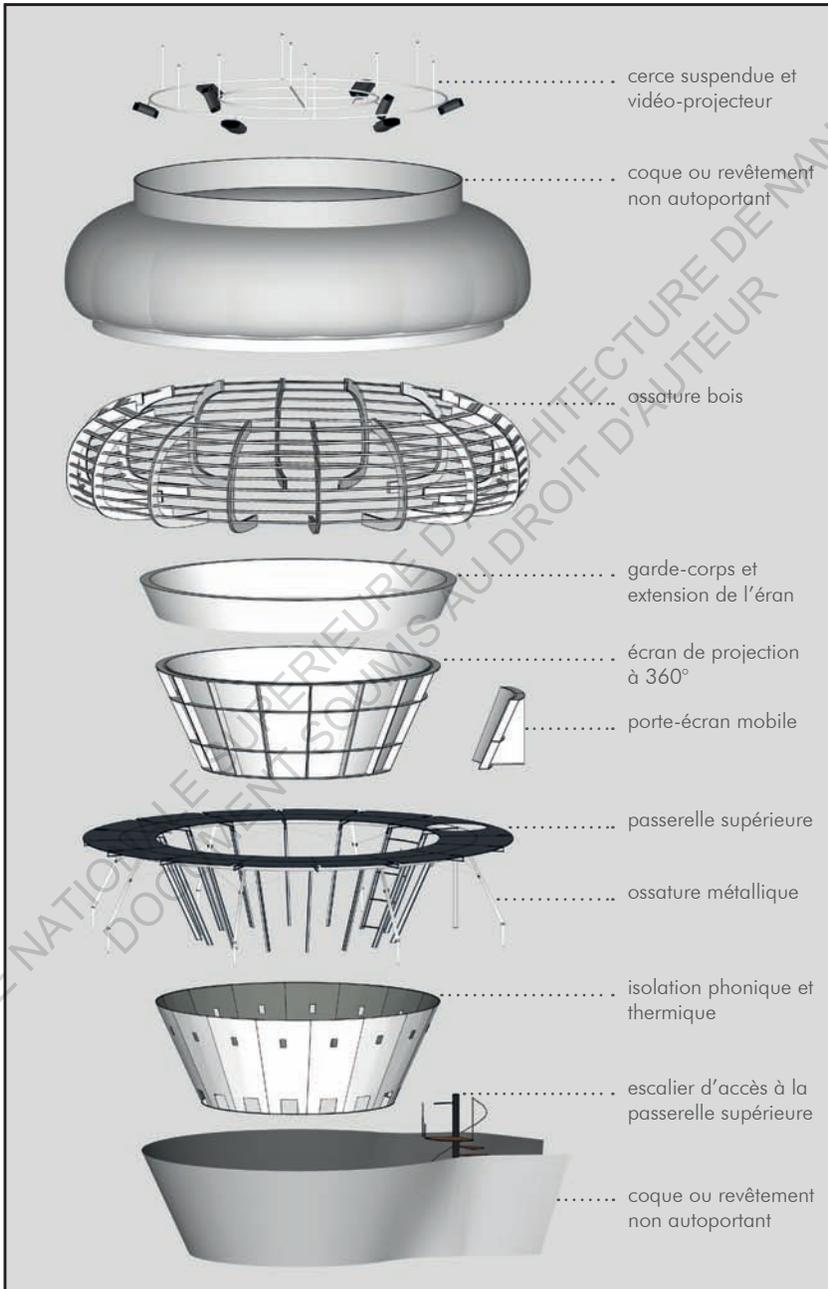
Les formes et les structures naturelles – minérales, végétales, animales – ont contribué à l'évolution de la création technique de l'homme (nid d'abeilles, coquillages, coquilles d'œufs etc.) En construction, on peut alors ramener les différents types de structures connues à trois principes fondamentaux. Trois systèmes anciens qui ont été explorés, expérimentés et étudiés dans toutes leurs possibilités : poutres et poteaux ; arcs et coupôles ; systèmes suspendus. Dans l'idée que nous nous faisons de *Coraulis*, l'écrin s'apparentait à une carapace, comme la coquille du gastéropode, nous ne voulions pas d'une structure porteuse ou un des trois principes fondamentaux constructifs cité précédemment. Nous voulions une coque mince et filiforme. Un voile mince qui viendrait former une surface continue dont l'épaisseur serait réduite au maximum en opposition à ses autres dimensions. Ce voile, serait constitué d'une membrane de matière uniforme et continue dont la surface totale est à simple et à double courbure. Mais comme expliqué dans la partie suivante (cf. «De l'hypoderme à l'épiderme»), nos restrictions budgétaires et les normes sécurité/incendie ne nous permettaient pas la réalisation d'une coque autoportante. Alors mettons de côté la coque en polyester renforcé et dessinons un squelette à notre *Parasite*.

2.1 - Du concours au stage

Dès la première semaine d'intensif du projet court, nous avons émis l'idée d'une structure et de plusieurs techniques de mise en œuvre. Pour le dossier de rendu, nous avons fixé l'hypothèses d'une ossature mixte, métal et bois. L'écrin de *Coraulis* serait constitué d'une ossature métallique en partie basse, pouvant supporter le poids propre de la passerelle, le poids de 19 personnes en mouvement, et le poids d'une seconde structure. Cette seconde structure, en bois autoportante, viendrait se fixer sur l'ossature métallique et servirait au support de la coque formant le tore. Le tout serait stabilisé par des poteaux métalliques en périphérie s'apparentant aux pattes d'une tique.



Esquisse de la forme
et de l'ossature mixte métal-bois
de l'écrin de *Coraulis* - février 2018



Axonométrie
annotée de l'écran de
Coraulis - février 2018

Ossature mixte : métal-bois

Lorsque nous avons commencé à dessiner l'ossature métallique, nous nous sommes grandement inspiré du travail de Jean Prouvé. Chaque mobilier et construction de ce créateur Français à la croisée de l'architecture, de l'artisanat et du design est « plastico-technique ». À travers tout un travail sur les épaisseurs de matériaux, sur le métal et leurs assemblages, sur la mise en œuvre qui aboutit à une beauté, J.Prouvé nous apprend que la forme doit toujours dériver de la technique et des matériaux. Comme l'écrit Le Corbusier : « Prouvé est indissolublement architecte et constructeur car tout ce qu'il touche et conçoit prend immédiatement une élégante forme plastique tout en réalisant, si brillamment, les solutions de résistance et de mise en fabrication ».

Alors, bien sûr, n'ayant pas son savoir et sa technique, nous avons inintelligemment repris différents éléments de ses créations et les avons transposé dans *Coraulis*. La structure de la passerelle prenait racine chez la *Table Aéronautique* et les poteaux étaient un mélange entre les *Portiques de Nancy*, les pieds de la *Table Compas* et les pieds d'une fusée cartoon. De plus, nous avons pris l'habitude de voir le collectif VOUS découper, meuler, poncer et souder du métal -qu'il soit tubulaire carré, rectangulaire ou cylindrique- pour réaliser la structure de la tente *Surperpausée*¹ au sein de la halle de fabrication de l'ensa Nantes. Alors, avec Alexandra, nous nous sommes dit que ce serait docilement réalisable et que cette ossature métallique était ce qu'il y avait de mieux pour l'écrin. Cette structure était alors formée d'IPN, de tubes cylindriques cintrés, de poteaux coniques segmentés, de câbles en tension ; le tout meulé, assemblé et soudé.

Pour la structure bois supérieure, nous imaginions une structure autoportante en contreplaqué, qui viendrait se fixer sur la structure métallique, au niveau des IPN de la passerelle. Comme celle qui avait déjà été réalisée pour le projet *Neaxis*. La structure de ce dispositif avait été construite avec l'appui de l'Ecole Supérieure du Bois. Réalisée en contreplaqué, l'ossature était composée exclusivement de chaînages horizontaux (s'apparentant à des poutres) qui venaient s'emboîter dans des membrures verticales (s'apparentant à des poteaux) et le tout était posé au sol.

¹ - Projet conçu et réalisé dans le cadre de l'option de projet Solid Thinking en 2017; dirigée par Francis Miguet et Miche Bertreux

Photo
de la Table compas de Jean Prouvé
©camard&associés



Début du stage

À la suite du rendu du projet court, nous avons entamé notre première semaine de stage au Crenau avec l'idée qu'une ossature mixte métal-bois serait une possibilité adéquate pour l'écrin de *Coraulis*. Dans la continuité du travail réalisé la semaine passée, nous avons continué de travailler sur l'ossature, en faisant évoluer dans les limites de ce que nous permettait le logiciel Sketchup, le squelette du *Parasite* (tout en continuant de faire des recherches sur une coque autoportante en fibre de verre ; cf. De l'hypoderme à l'épiderme).

Fin de cette semaine de travail, nous voyons nos encadrants pour la première fois depuis le début de stage. De nombreux points ont été soulevés lors de cette réunion, dont le rôle que nous avons à tenir au sein de ce projet, l'importance du détail dans nos fichiers 3D, et la manière dont nous devons maintenant penser la structure et la future réalisation de *Coraulis*.

Il nous ont bien expliqué que pousser l'interprétation des images 3D

dans la réalité constructive est bien plus compliqué qu'il n'y paraît au premier abord. Les professeurs nous ont rapidement fait comprendre qu'il fallait arrêter de modéliser sur Sketchup, qu'il fallait arrêter de se contenter de la beauté apparente d'une simple image 3D pour entrer dans le vif du sujet et exprimer les géométries dessinées auparavant dans une logique constructive et structurelle. Nous devons commencer à utiliser le logiciel Rhinoceros car notre future action durant ce stage se situait sur deux plans : d'une part, faire évoluer la forme et la géométrie de *Coraulis*, et en même temps, développer le tout en vue de sa constructibilité.

Alors, le modèle 3D sur lequel nous travaillerons aura une double définition : il représentera une réalisation architecturale et par la même occasion un modèle d'analyse de structures pour les calculs des ingénieurs et des futurs constructeurs du dispositif. Les fichiers électroniques de base servant alors aux trois démarches, celle de l'architecte, celle de l'ingénieur et celle des artisans. Et pour se faire, en tant que concepteur avec Alexandra, devons aussi se positionner en tant que futurs constructeurs de *Coraulis*. Ce point de vue fait que nous tenions plusieurs rôles au sein de ce projet, comme une double identité : tout d'abord une identité artistique et artisanale, puis une identité interdisciplinaire permettant la coordination des différents intervenants qui entraînent dans le cadre du projet. De plus, dans l'idée d'une possible réalisation du dispositif au sein de l'école, la construction de l'écrin pourrait se faire en interne, alors l'utilisation des machines de découpe à commande numérique présente dans la grande Halle de l'école serait réquisitionnée pour la fabrication de l'ossature.

Ossature simple : contreplaqué

De ce fait, le logiciel Rhinocéros fut installé sur nos ordinateurs du Crenau, Alexandra qui avait déjà des bases dans l'utilisation de cet outil m'a brièvement expliqué et j'ai rapidement pris mes aises sur ce logiciel. Nous avons alors commencé à modéliser de nouveau la forme de l'écrin, cette fois-ci avec des courbes nurbs (B-splines rationnelles non uniformes) et des splines de Bezier, ce qui permet une exactitude de la forme en chaque point, au contraire de Sketchup qui est un modéleur de surface (une surface courbe est formée de milliers de facettes planes mitoyennes). Et de cette première étape, nous sommes venus épouser cette forme de l'intérieur pour y des-

siner une nouvelle ossature, entièrement penser en contreplaqué. Comme le rôle de la structure d'un ballon dirigeable, ce serait l'ossature qui viendrait dessiner la forme exacte de l'objet et servir ainsi de support au revêtement extérieur. Nous prenons en référence *Öarna*, projet d'habitat en forêt réalisé dans le cadre de l'option de projet Solid Thinking en 2008, dont la structure en contreplaqué a été générée via l'outil informatique selon le mode opératoire du waffle et dont toutes les pièces constituant l'ossature ont été découpées à l'aide d'une machine à commande numérique 3 axes.

La technique du waffle s'apparente à concevoir une stéréotomie non standard (ou ce que les gens appellent aussi des « structures en gaufres ») en utilisant l'outil informatique. Ce type particulier de représentation trouve son origine dans le design industriel, il constitue une méthode très utile pour prototyper rapidement des formes ou des surfaces complexes. Cependant, ces derniers temps se sont révélés être également une méthode de fabrication numérique efficace pour représenter des surfaces et des volumes architecturaux à grande échelle. Dans certains cas, le projet architectural lui-même, le plus représentatif d'entre eux est le *Metropol Parasol* de Jurgen Mayer.



Photo
du Metropol Parasol
©Manolo Espaliú

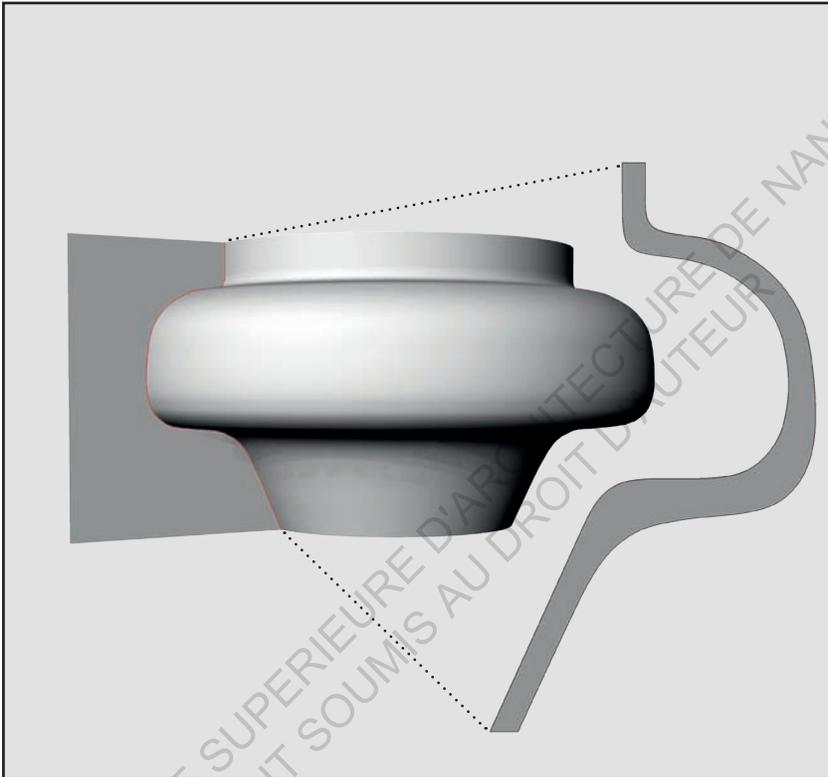
Méthode :

Tout d'abord, nous ne modélisons pas l'espace du sas d'entrée, nous nous concentrons seulement sur la forme concentrique et symétrique de l'écrin de *Coraulis*. Après modélisation de cette forme en fonction des contraintes géométriques et spatiales de l'emplacement sur lequel s'installe le dispositif, nous venons découper cette « coque » avec un plan de section : surface plane ayant pour abscisse le rayon du cercle d'évolution et pour ordonnée l'axe de révolution de notre forme (qui est aussi l'axe de symétrie).

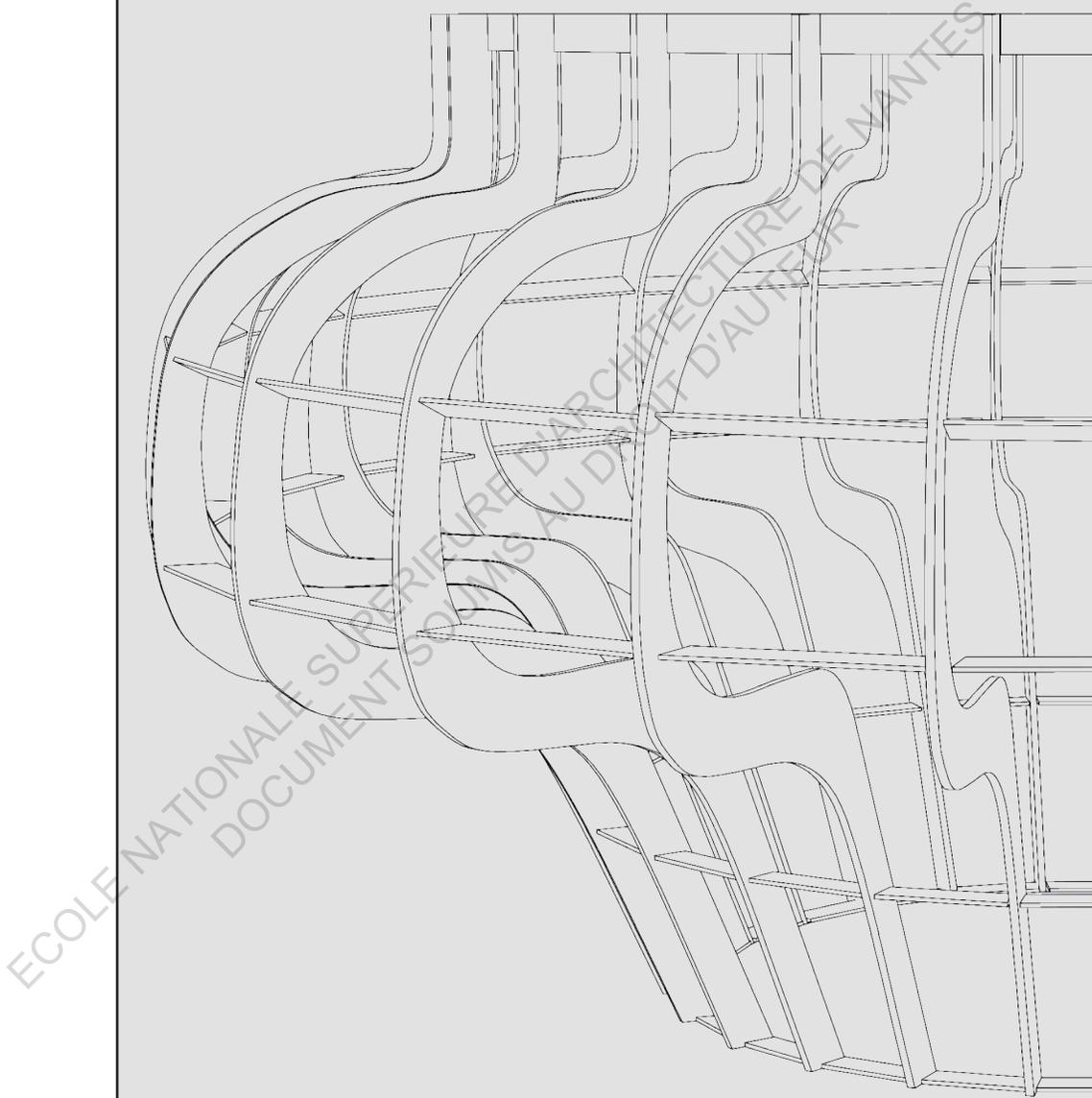
L'intersection formée par ces deux géométries permet d'obtenir le profil de notre forme. De ce profil, nous allons pouvoir dessiner notre membrure, l'élément vertical porteur de notre ossature. Une première surface plane est dessinée, nous lui donnons ensuite une épaisseur -en prenant en référence le dimensionnement des matériaux utilisés pour le projet Öarna- notre membrure verticale est alors en contreplaqué de 24 millimètres d'épaisseur ; pour 6,22 mètre de haut et 20 centimètres de largeur.

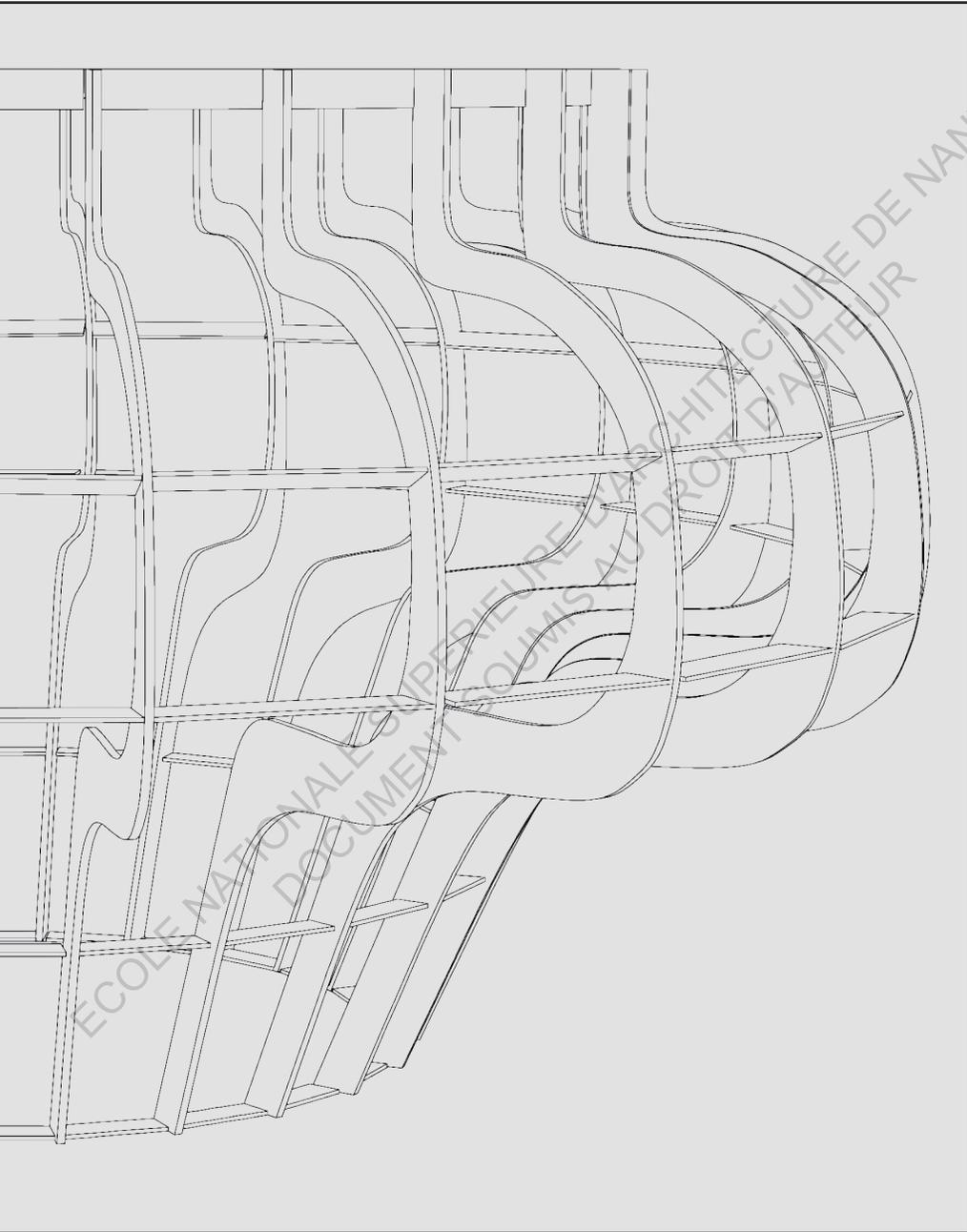
Voulant une ossature autoportante, parfaitement concentrique et symétrique, nous multiplions radialement cette membrure pour en avoir au total 24. Toutes concentriques et identiques. Ensuite pour les rendre solidaires et pour répartir les charges mécaniques entre chacune d'entrées elles, nous dessinons des chaînages horizontaux, sans détailler le système d'assemblage. Ces membrures et ces chaînages qui s'entrecroisent forment alors notre premier « waffle ». Nous sommes le 17 mars 2018.

Image 3D
de l'explication schématique
de la conception de l'écrin sur Rhinoceros



Au fur et à mesure des semaines, notre « waffle » évolue en fonction des nouvelles contraintes à prendre en compte dans *Coraulis*. Ce fut un long processus d'aller-retour entre tous les intervenants du projet, au fur et à mesure que le projet se précise, l'intégration de nouveaux paramètres techniques s'apparentait plus à des contraintes étrangères plutôt qu'à de nouveaux enrichissements. Chaque semaine la structure devait évoluer, parfois en détails, d'autres fois, radicalement. La majeure partie de nos 4 mois de stage fût engloutie dans la modélisation de cette ossature complexe. Dans les deux sous-parties qui vont suivre, je vais tout d'abord présenter les étapes importantes de l'évolution de l'ossature de l'écrin en fonctions des contraintes apportées ; dans une seconde partie, j'expliquerai par quels moyens nous aurions pu automatiser et rendre la conception de la structure plus efficace et performante.





Axonométrie
de l'ossature bois de l'écrin
de Coraulis - mars 2018



2.2 - Évolutions et temporalité

L'ancienne ossature métallique supprimée, la structure de la passerelle devait aussi faire partie de la structure globale de l'écrin. Alors les membrures se sont élargies, en plus de dessiner la forme externe de notre écrin et de servir de support au futur revêtement extérieur, elles viennent aussi dessiner la surface de déambulation de la passerelle, mais aussi l'espace d'assise intégrer et le garde corps qui lui fait face. Comme expliqué dans la partie précédente (morphogénèse de la forme), un des souhaits premiers de l'écrin était que l'écran du dispositif ai une continuité de surface, pour premièrement agrandir la surface de projection, mais aussi pour venir former l'emplacement d'une des trois couronnes d'enceintes, tout en formant le garde corps de la passerelle supérieure. En fonction de toutes les contraintes apportées par la géométrie de l'écran, l'implantation des projecteurs et des enceintes, les normes ERP de garde-corps et d'espace de circulation, l'esthétique de l'espace d'assise, et les contraintes mécaniques, nous avons rapidement et radicalement modifié l'ensemble de notre waffle.

Pour soutenir toutes ces nouvelles charges, nos encadrants ont émis l'idée de doubler le nombre de membrures, mais aussi de les élargir (tout en gardant l'épaisseur du contreplaqué actuel). Mais plutôt que de faire passer le nombre à 48 membrures espacées équitablement de manière radiale au lieu de 24, nous avons préféré les moiser. Le moilage est une technique courante utilisée depuis des décennies, constitué généralement par deux éléments en lamellé collé moisant un élément central- cas courant : poteau moisant la traverse ou l'arbalétrier avec comme organes d'assemblage des boulons travaillant en cisaillement;

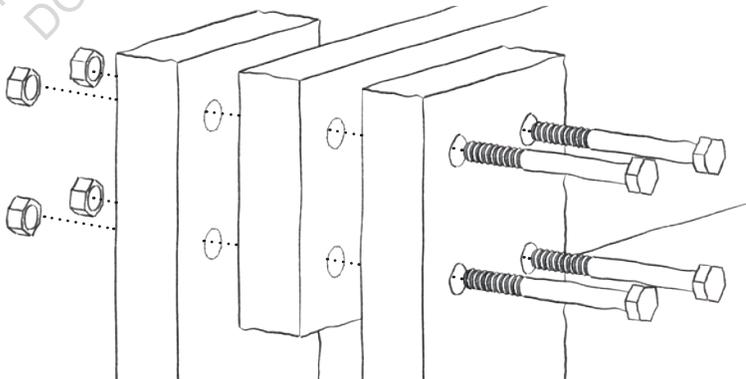
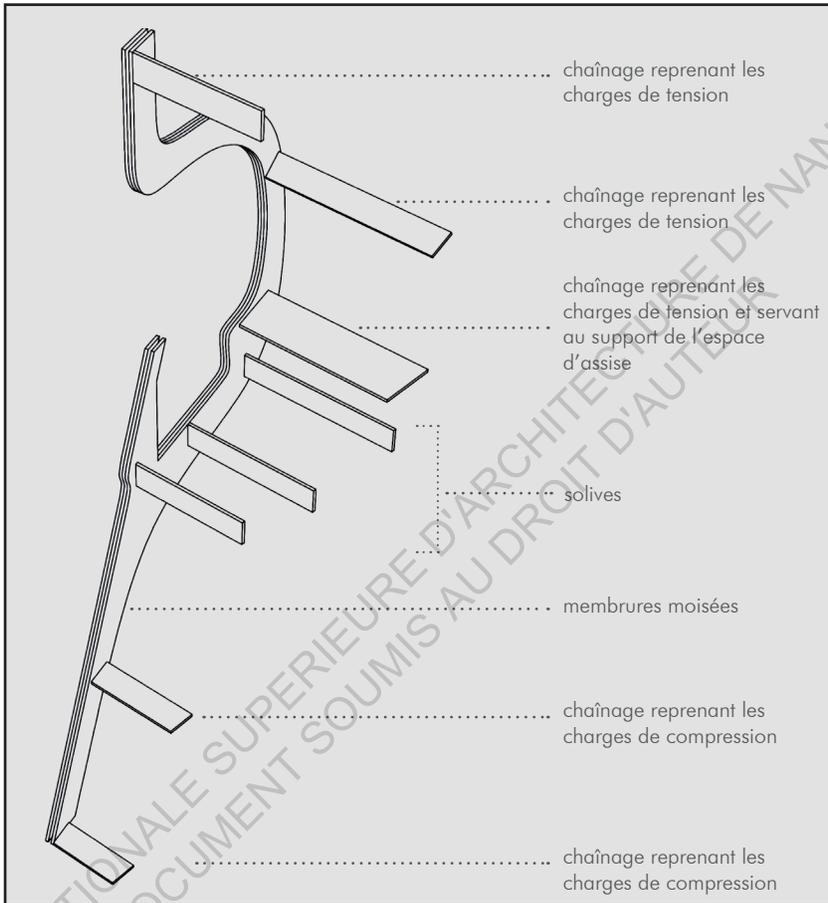


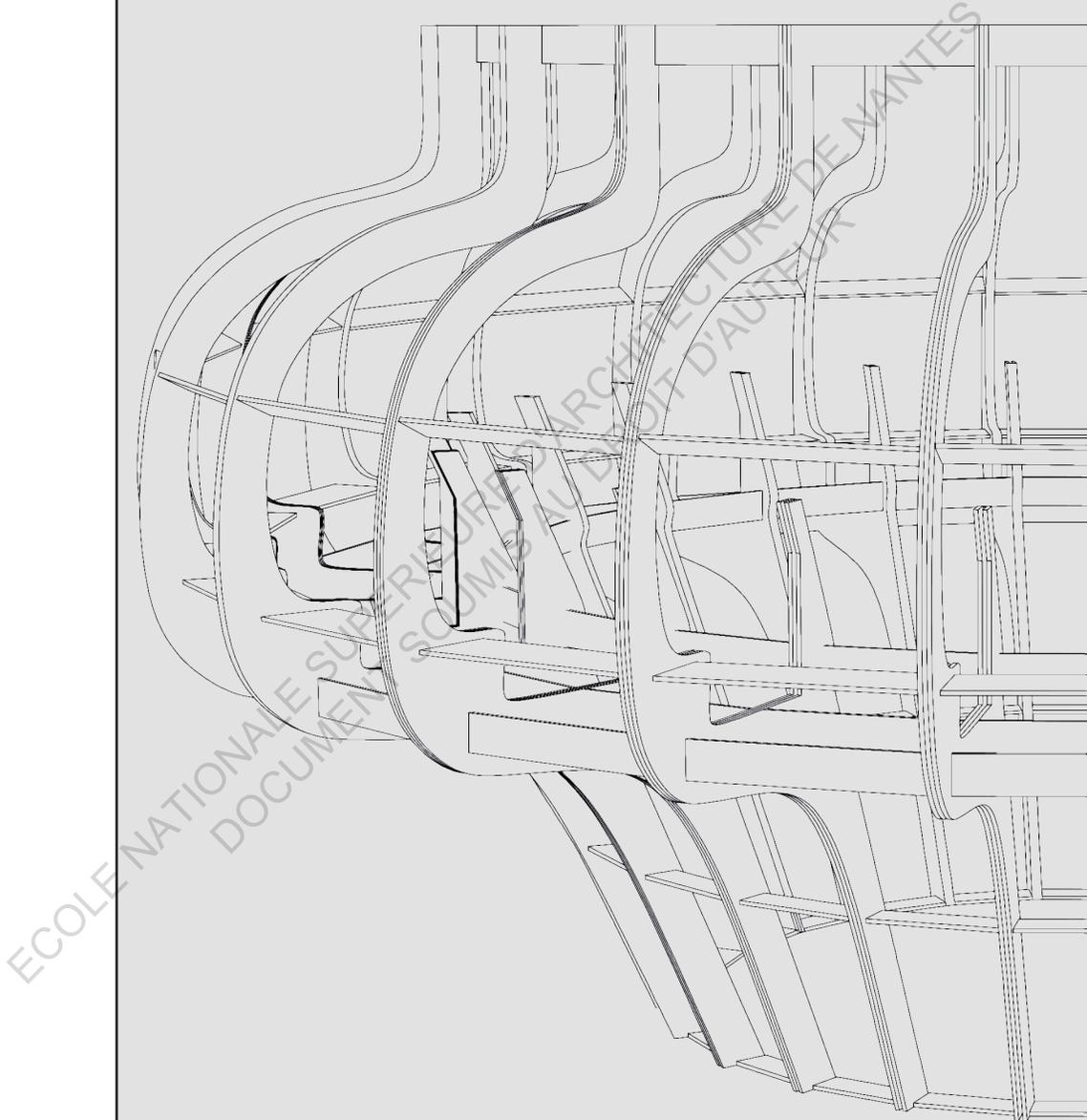
Schéma
de deux poutres moisant
une poutre

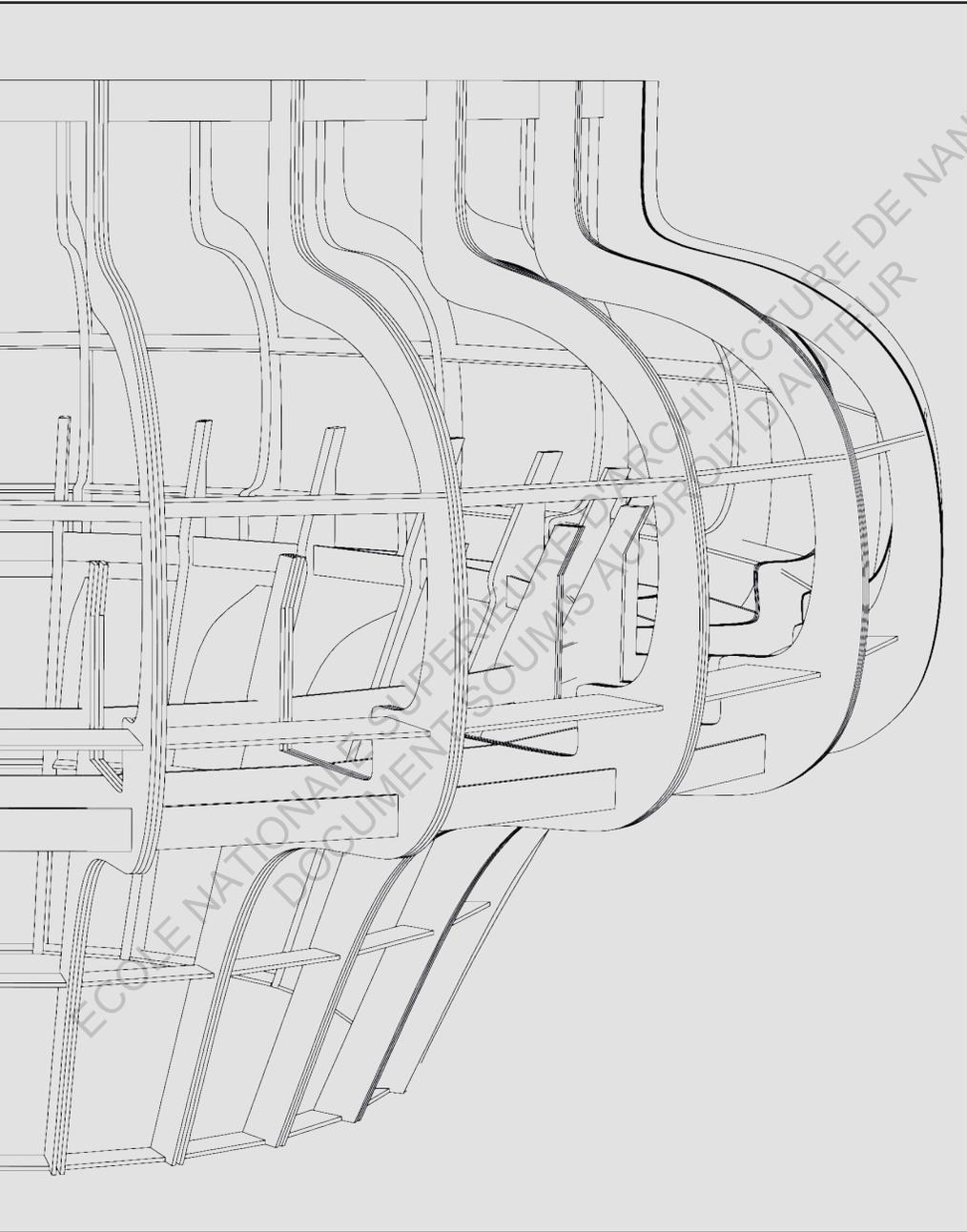
Axonométrie
annotée des éléments de structure
de l'ossature bois de l'écrin - mars 2018



Ossature de l'écrin à la date du 24 mars 2018 :

Ici, nos membrures, qui sont toutes identiques, seront jumelles et assemblées deux à deux avec des boulons servant à solidifier notre ossature. Ensuite, nous avons deux chaînages horizontaux inférieurs reprenant les charges de compressions entre les membrures, trois solives servant de support au sol de la passerelle, puis trois autres chaînages au niveau de la partie supérieure reprenant les charges de tensions entre les membrures, et le premier servant aussi de support à l'espace d'assise.





Axonométrie
de l'ossature bois de l'écran
de Coraulis - mars 2018

Du 24 mars au 18 avril 2018

Quatre semaines très intenses se sont écoulées. Le dispositif de *Coraulis* en lui-même a subi de nombreux changements, tous les détailler serait trop long à présenter, et un mémoire tout entier ne suffirait pas à tout expliquer. Ici nous exposerons brièvement les grands changements qui ont eu des répercussions importantes sur l'ossature.

Premièrement, l'écran de *Coraulis*. Comme expliqué plus tôt, une des nouveautés que permettait notre écrin était l'agrandissement de la surface de projection. Ce nouvel écran, passait à 2,9 mètres de hauteur au lieu de 2,2 mètres de hauteur, ce qui permettait de gagner plusieurs mètres carrés d'espace de projection supplémentaire. De plus, cet écran conique devait être transonore, ce qui signifie que les couronnes d'enceintes étaient placées en périphérie de l'écran au derrière de la toile servant de surface de projection. Cela permettait une spatialisation sonore à très haute définition sans que cela ne trouble le champ visuel du visiteur. Le souci étant que, Immersion, l'entreprise devant réaliser cet écran n'était pas dotée des compétences requises pour le réaliser. L'idée d'un écran transonore est alors tombé à l'eau, il fallait maintenant trouver un moyen pour que les deux couronnes d'enceintes prévue à la base derrière l'écran trouvent une nouvelle place dans le dispositif. Après de nombreux allers-retours, de réunions et de recherches, une solution a été trouvée, celle de placer la couronne inférieure d'enceintes en dessous de l'écran, via un support compris dans l'ossature bois ; et placer la couronne médiane dans des caissons compris dans la partie haute de l'ossature, sous la main courante du garde-corps supérieur. S'en est suivi beaucoup de modifications au niveau du dimensionnement de l'écran, l'écran s'est rétréci, puis élargie, ses points d'altimétries ont été revue de nombreuses fois jusqu'à ce que l'entreprise chargée de la réalisation de l'écran¹ ai validé la surface de projection adéquat au vu des changements. Il a aussi fallu qu'Euphonia, l'entreprise chargée de l'installation et de la programmation du système sonore²s'accorde

1 - *Entreprise Immersion, spécialisée dans les domaines de la 3D, de la réalité virtuelle et réalité augmentée pour le monde industriel et la recherche*

2 - *Entreprise Euphonia, spécialisée dans les hautes technologies dans le domaine de l'acoustique*

avec notre travail et vérifie que ça ne lui posait pas de problème. Durant ces plusieurs semaines, nous nous sommes alors retrouvé à effectuer de nouvelles tâches qui ne nous étaient préalablement pas allouées. Au cours de cette phase de co-conception, tous les acteurs ont été engagé dans le développement conjoint de la solution afin de converger rapidement notre travail vers une solution acceptée par tous.

S'en est alors suivi une importante évolution de l'ossature bois. Il fallait maintenant intégrer toutes ces nouvelles contraintes dans notre dessin structurel. Nous avons aussi dessiné tous les organes d'assemblages, ainsi que le découpage des membrures pour un calepinage efficient. En effet, la CNC –machine de découpe 5 axes à commande numérique de l'école d'architecture de Nantes- peut supporter des plateaux de dimension maximale de 185x300 centimètres. De plus, l'élargissement et le redimensionnement de l'écran ne nous permettaient plus d'avoir un espace d'assise et un espace de déambulation confortable, nous avons alors supprimer l'espace d'assise.



Photo
de la machine à commande, numérique
5 axes (CNC) de l'ensa Nantes

19 avril 2018 - rencontre avec Socotec

Une des étapes importantes du développement structurel a été la première réunion avec le bureau de contrôle Socotec et plus particulièrement avec son représentant, Laurent Lavaud, ingénieur conseil de l'entreprise. Socotec a été engagée dans le cadre de *Coraulis* pour effectuer 4 missions : mission solidité des ouvrages et éléments d'équipements indissociables ; mission courant fort ; mission SSI relative à la sécurité de personnes dans les ERP ; mission accessibilité. Après une présentation détaillée du projet (nous lui présentons aussi les différentes possibilités de réalisation de la coque et plusieurs autres aspects techniques qui seront développés dans la partie suivante), nous décidons d'aborder chaque point technique et structural du projet, Laurent Lavaud apporte ses compétences pour faire progresser le projet, en vue du passage en commission de sécurité.

-Membrures-

Chaque membrure est découpée en quatre. Chacune de ces parties est découpée individuellement à la CNC, puis ensuite assemblées. Les parties de membrures sont enserrées alors « en sandwich » par d'autres éléments de contreplaqué, et elles-mêmes prennent « en sandwich » une autre pièce de contreplaqué. Le tout étant boulonné et collé.

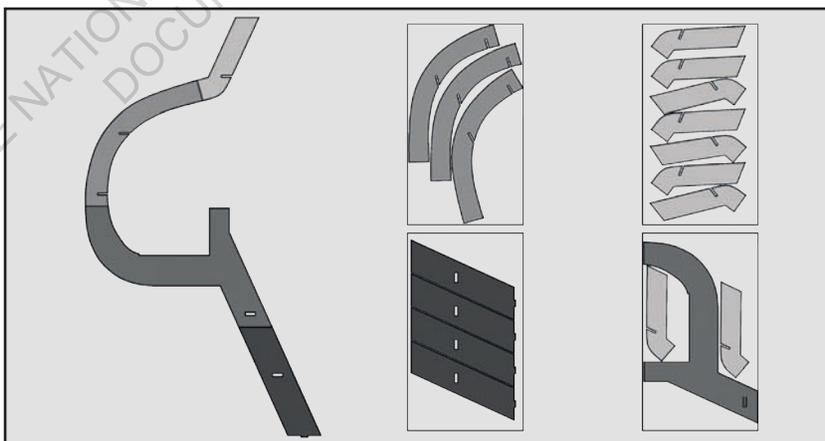
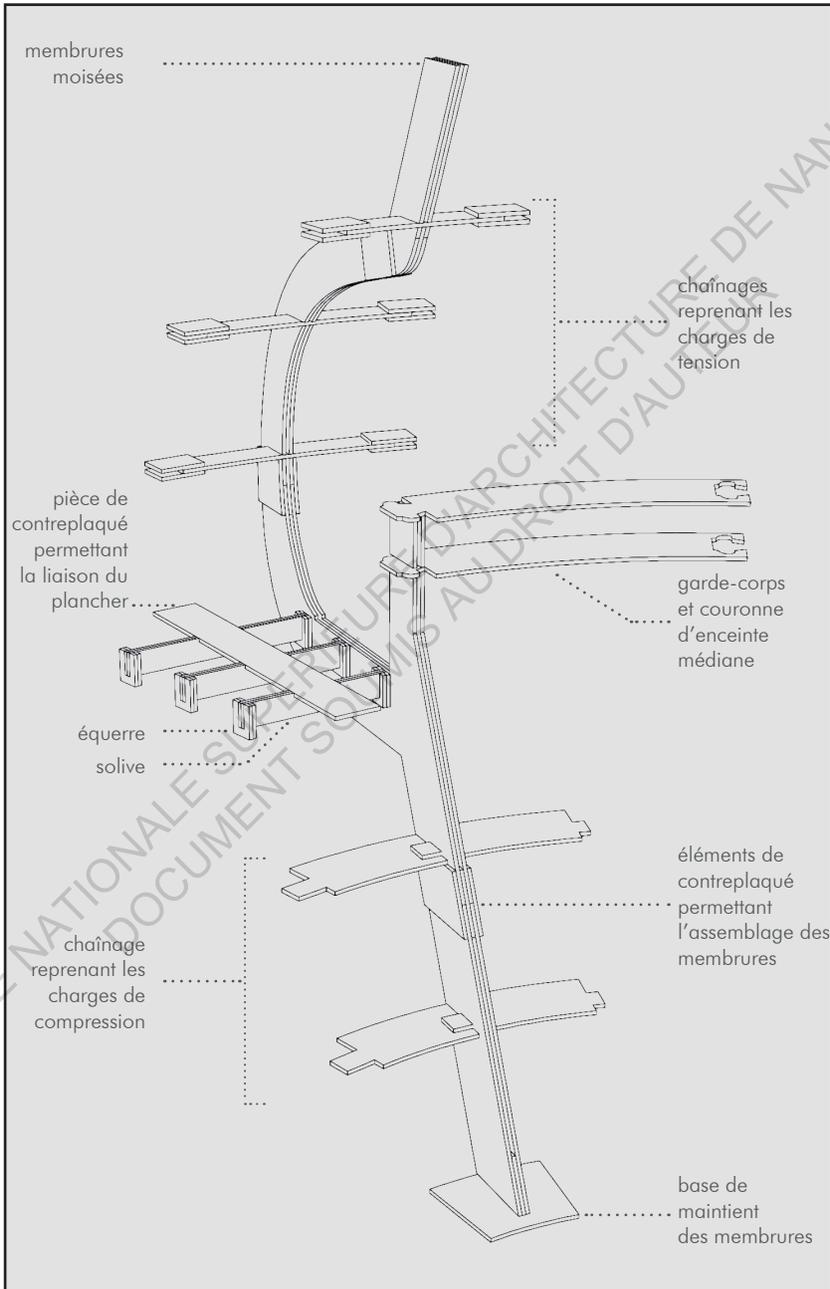


Schéma
d'une membrure et de
son calepinage

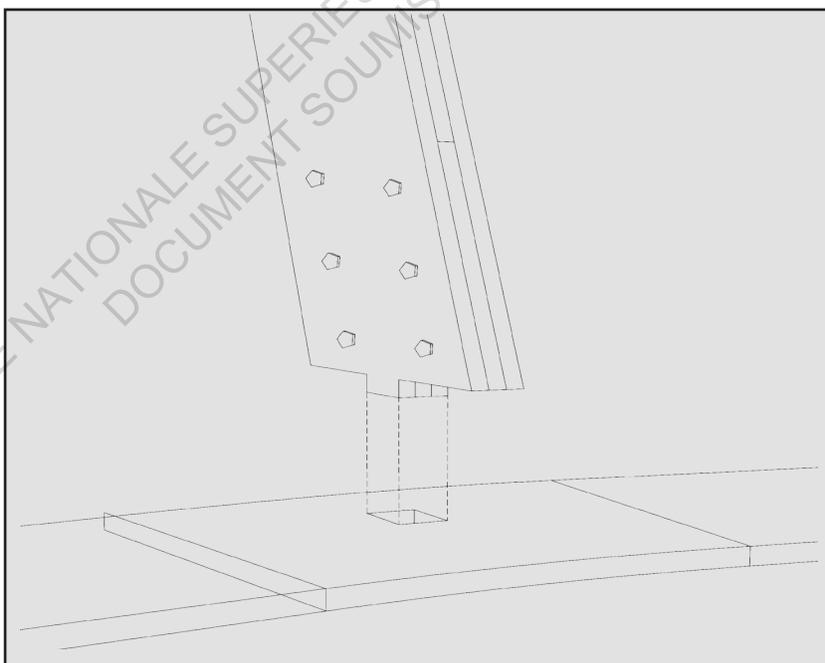


Axonométrie
annotée des éléments de structure
de l'ossature bois de l'écrin - avril 2018

-Maintient et assemblage-

Pour un placement et un maintien des membrures lors du montage de l'ossature, une base en contreplaqué de 24mm d'épaisseur est fixée à la dalle de béton du sol de l'école. Cette base, découpée à la CNC, viendra maintenir chaque membrure par un système de tenon et de mortaise. Une mortaise est un trou souvent rectangulaire aménagé dans une partie d'un assemblage pour recevoir un élément saillant d'une autre pièce de cet assemblage, le tenon. Ici, la base est aménagée de mortaises qui viennent accueillir le tenon de chaque membrure.

La position et le dessin de ces deux formes déterminent la résistance de l'assemblage pour deux pièces données d'une structure d'un certain matériau. L'assemblage à tenon et à mortaise est un des plus courant en menuiserie et dans la charpente traditionnelle et permet de constituer ce qu'on appelle un emboîtement.

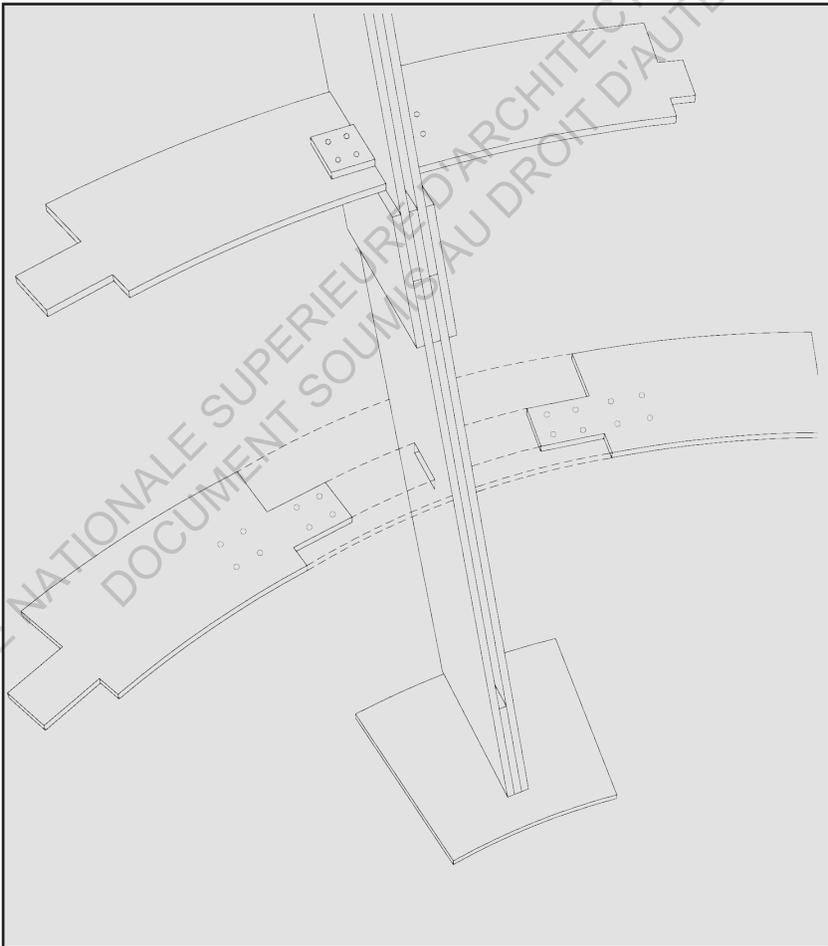


Axonométrie
de l'emboîtement
« membrure-base » par tenon
et mortaise - avril 2018

-Chaînages inférieurs-

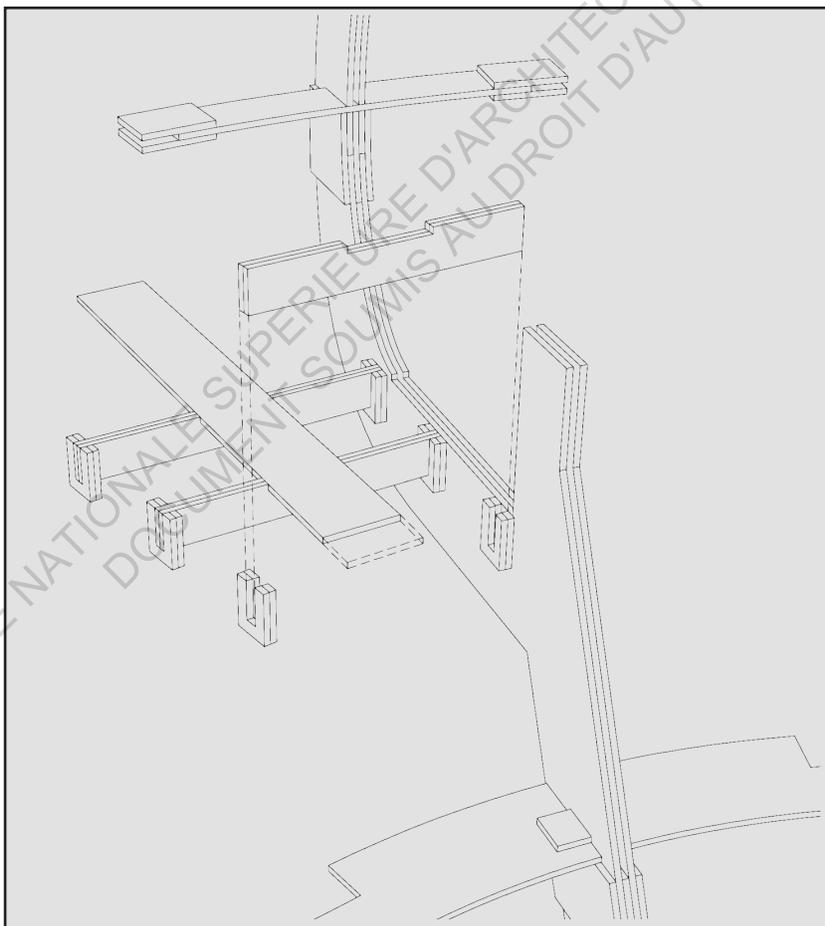
Ensuite, les deux chaînages horizontaux inférieurs reprenant les charges de compression sont assemblés aux membrures eux aussi par un système de tenon et de mortaise. De plus, les mortaises des chaînages dépassent de chaque côté des membrures et se superposent pour un maintien continu entre eux. Ils sont fixés par boulons et colle.

Axonométrie
de l'assemblage
«membre-chaînage inférieur»
par tenon et mortaise - avril 2018



-Solives-

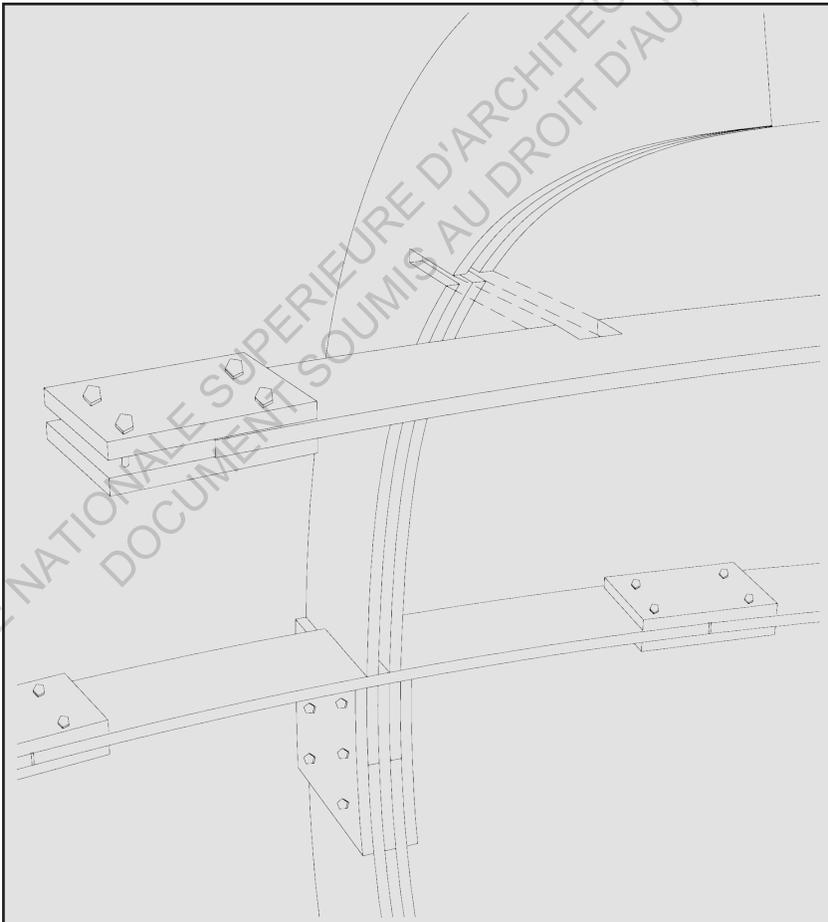
Au niveau de la passerelle, les trois solives permettant de supporter le plancher (chaque solive est doublée pour avoir une épaisseur de 48mm) sont positionnées entre les membrures par un système d'emboîtement en équerre, elles-mêmes découpées en contreplaqué et collées. Des éléments de contreplaqué viennent s'emboîter dedans, permettant la liaison entre chaque plaque de plancher (qui elle-même s'emboîte entre les membrures).



Axonométrie
des éléments de structure
du plancher de la passerelle - avril 2018

-Chaînages supérieurs-

Les trois autres chaînages au niveau de la partie supérieure reprenant les charges de tension sont assemblés aux membrures par mi-bois. Le mi-bois est un assemblage de charpente entre deux pièces de bois qui se chevauchent. La section de chaque pièce est réduite de moitié au droit de l'intersection pour laisser passer l'autre, ce qui permet de conserver la continuité des deux pièces. Ensuite tous les chaînages sont enserrés alors «en sandwich» par d'autres éléments de contreplaqué à leurs extrémités. Le tout est boulonné et collé.



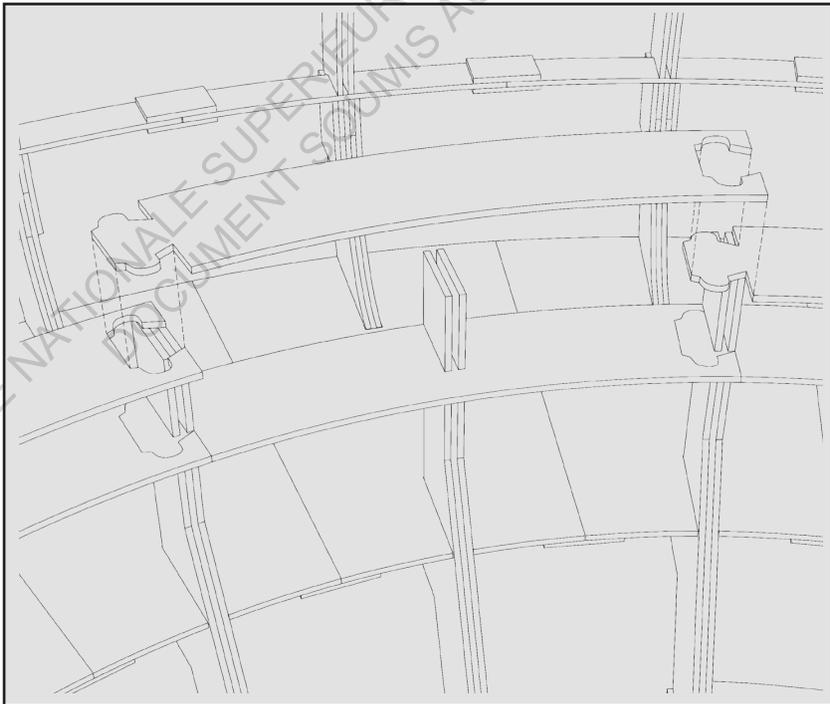
Axonométrie
de l'assemblage
«membrure-chaînage supérieur»
par mi-bois - avril 2018

-Garde-corps de la passerelle-

L'élément servant au placement de la couronne médiane d'enceintes dans l'ossature, constitue aussi la partie haute du garde-corps et la main courante de celui-ci.

Cet élément de contreplaqué est constitué de deux plateaux concentriques, séparés entre eux par des renforts verticaux. L'espacement entre ces 2 plateaux permet le placement des enceintes disposées radialement par rapport à l'axe central.

Les 2 plateaux sont identiques, 12 pièces de contreplaqué viennent s'emboîter entre elles par un système de queue-d'aronde et se fixent sur les membrures et sur les renforts verticaux par vis. Une queue-d'aronde est un type de liaison mécanique entre deux pièces. Elle se compose d'un tenon en forme de trapèze ou d'une autre forme géométrique, ici c'est la forme de *Coraulis* dans l'une des pièces et d'une rainure de même forme dans la seconde pièce.



Axonométrie
des éléments de structure
du garde-corps la passerelle - avril 2018

Voici un extrait du compte rendu de la réunion :

« Les montants verticaux de l'ossature bois en Contre-Plaqué de 24mm sont moisés pour atteindre une épaisseur totale de 72mm. Selon les normes de sécurité incendie, sur les 24 montants verticaux, que nous appelons membrure, certaines d'entre elles devraient être réalisées en bois massif d'une épaisseur minimum de 50mm. Après discussion avec Mr Lavaud, nous pouvons peut-être atteindre les résistances mécaniques et incendie souhaitées en utilisant une colle spécifique à la réalisation de structure en lamellé-collé et un boulonnage adéquat, solution moins coûteuse.

La passerelle supérieure, accessible au public, devra résister à une charge d'exploitation de 250kg/m², l'ossature bois devra être dimensionnée dans ce sens. »

Ainsi, toutes nos hypothèses pour la réalisation de l'ossature bois tiennent la route. Nous devons attendre l'étude technique d'un bureau structure pour nous avancer, mais pour l'instant, le travail effectué est viable et en partie conforme.

Du 19 avril au 9 mai 2018

Durant cette période, nous avons beaucoup fait évoluer la forme de la coque. Jusqu'à maintenant nous ne prenions jamais vraiment en compte l'espace du sas d'entrée et l'emplacement de la nodal-régie. Cet espace consistait toujours en une « boîte » que nous venions positionner entre *Coraulis* et le mur mitoyen aux salles de classe. Nous avons alors modélisé cet espace en continuité du dispositif existant, et sa forme est une prolongation organique de l'écrin actuel.

Nous avons aussi modélisé et pris en compte par la suite dans le dessin de l'ossature le passage des gaines de raccordement électronique, le positionnement et les gaines de ventilation mécanique, le positionnement de la porte acoustique d'entrée dans le dispositif, l'ouverture de la porte-écran sur rail et l'escalier accédant à la passerelle supérieure.

Ainsi, le travail réalisé portait surtout sur des éléments techniques indépendants mais faisant partie du dispositif et dont les contraintes spatiales et techniques doivent être intégrées à la conception de l'ossature.

En ce cas, l'ossature principale n'a pas beaucoup évolué, seulement quelques modifications lui ont été apportées, sans modifier son aspect et son système constructif global. Nous sommes venus par la suite raccorder une nouvelle ossature englobant le sas d'entrée et permettant un support continu de la coque extérieure à l'écrin. Cette structure dessinée sous la forme d'un waffle, vient se raccorder à la structure existante sans perturber son équilibre mécanique. Les nouvelles membrures viennent de la même manière s'insérer dans une base au sol et des nouveaux chaînages horizontaux permettent le raccord entre les deux ossatures.

10 mai 2018 - rencontre avec LeichtFrance

Première rencontre avec Lutz Shoene, directeur générale de l'entreprise LeichtFrance spécialisé dans l'ingénierie structure et les expertises spécialisées. Il est aussi enseignant en cours de structure à l'école d'architecture de Nantes.

LeichtFrance a été engagé dans le cadre de *Coraulis* pour effectuer l'étude de structure et une note de calcul de dimensionnement. Après une présentation détaillée du projet, nous décidons d'aborder chaque point technique et structurel du projet (en laissant de côté la partie du sas d'entrée qui n'est toujours pas terminée), Lutz Shoene apporte ses compétences pour faire progresser le projet, en vue d'assurer la stabilité de l'ossature bois. Ce spécialiste en matériaux (charpentes métalliques, bois, verre, etc.) participe à l'avant-projet de la construction. À partir de nos plans et modélisations, avant le chiffrage du chantier, il prend en compte tous les facteurs (qualité du sol, dimensions, performances techniques des matériaux, risques de séisme ou conditions climatiques...) pour définir et vérifier la taille des différents éléments de la structure de *Coraulis* et la quantité de matériaux à utiliser. Ce jour-là, nous émettrons de nombreuses hypothèses de réalisations pour l'ossature, nous avons remis en cause de nombreux assemblages sur lesquels l'ingénieur avait des doutes, il a aussi pointé des manques de renforts structurels. Par exemple les mi-bois et les tenons et mortaises qu'il estime fragilisant pour les membrures, le manque de contreventements et de système de tensions comme des câbles ou tirants en dessous de la passerelle ou encore l'épaisseur de certaines sections de contreplaqué qu'il pense mal dimensionnées.

Après cette première rencontre, nous décidons d'une prochaine réunion pour faire un état des lieux de notre ossature après l'envoi de ses calculs préliminaires. Durant cette période, lui et son équipe, réalisent sur ordinateur des simulations de résistance, de déformation et d'élasticité pour tester ses hypothèses et ses choix.

De LeichtFrance à la fin du stage

Nous retrouvons Lutz Schone **le 14 juin**, à cette date, notre ossature a très peu évolué, nous attendons un retour concret et cohérent de l'ingénieur pour continuer la modélisation. Pendant ce temps nous finissons de modéliser la structure du sas d'entrée et concentrons notre temps sur la réalisation de la coque extérieure (cf. partie 3). Ce jour-là, L.Shoene nous présente ses calculs et solutions de réalisation de l'ossature. Le changement est radical dans la technique structurale mais la méthode de réalisation et la forme restent les mêmes. Ainsi l'ossature est constituée de membrures verticales réalisées en contre-plaqué abouté de 21mm d'épaisseur rigidement assemblées avec des chaînages horizontaux réalisés en contreplaqué collé de 24 mm et de 44mm d'épaisseur et des chaînages horizontaux en tirants d'acier filetés aux extrémités. Les essences de contreplaqué et les assemblages entre les membrures et les chaînages à utiliser restent encore à définir selon les futures caractéristiques techniques de résistance mécanique préconisées par les calculs du bureau structure LeichtFrance.

-Les membrures selon LeichtFrance-

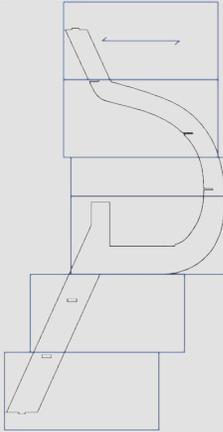
Au lieu d'être moisées, les membrures verticales en contre-plaqué abouté (plywood F 20/10 E 40/20) sont chacune d'entre-elle constituées de 6 éléments découpés (toujours à l'aide de la CNC) dans le sens parallèle de la fibre du contreplaqué pour former l'âme de la membrure, cette âme est ensuite prise en sandwich par 10 éléments découpés dans le sens perpendiculaire de la fibre du contreplaqué, puis 2 autres éléments découpés dans le sens parallèle de la fibre du contreplaqué viennent solidifier la partie porteuse de la passerelle supérieure. Tous ces éléments de contre-plaqué de 21mm d'épaisseur sont collés et vissés pour former les éléments structurels porteurs, d'une épaisseur totale de 63mm (3 épaisseurs) sur toute sa hauteur et de 105mm (5 épaisseurs) au niveau de la passerelle supérieure. Ces membrures, une fois réalisées, sont emboîtées dans une base réalisée en contre-plaqué de 24mm d'épaisseur fixée au sol du niveau 1A, puis maintenue à la dalle précontrainte du plafond du 1A par fixation métallique pour empêcher tous déplacements horizontaux.

Constructive design of main girder | schematic sketch

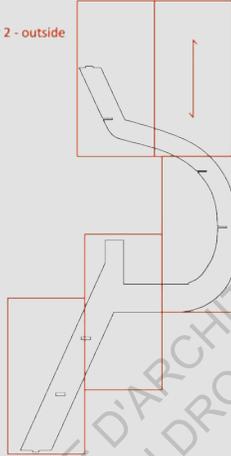
sans échelle

Composition of the plywood layers for the main girder
Standard panel size of 2500 x 1250 mm

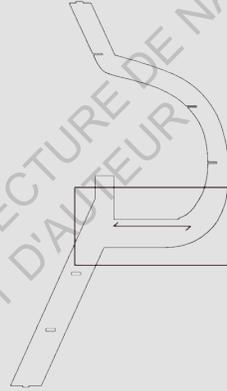
layer 1 - middle



layer 2 - outside



layer 3 - additional



Main girder | section

M 1:5

M1 - main girder
thickness 63 mm
3x21 mm plywood



Main girder | section

M 1:5

M1 - main girder
thickness 105 mm
5x21 mm plywood



Plan
côté du dessin constructif
des membrures - sans échelle - juin 2018
©LeichtFrance

-Les chaînages et solives selon LeichtFrance-

Les chaînages horizontaux eux aussi sont modifiés, ils sont toujours en contre-plaqué (plywood F 20/10 E 40/20). Les 5 chaînages travaillant en compression et en tension qui sont assemblés aux membrures en partie inférieure et supérieure de la passerelle sont réalisés en 1 couche de contre-plaqué de 24mm d'épaisseur. Le chaînage horizontal principal, assemblé aux membrures au niveau de la passerelle, est réalisé en 1 couche de contreplaqué de 44 mm d'épaisseur.

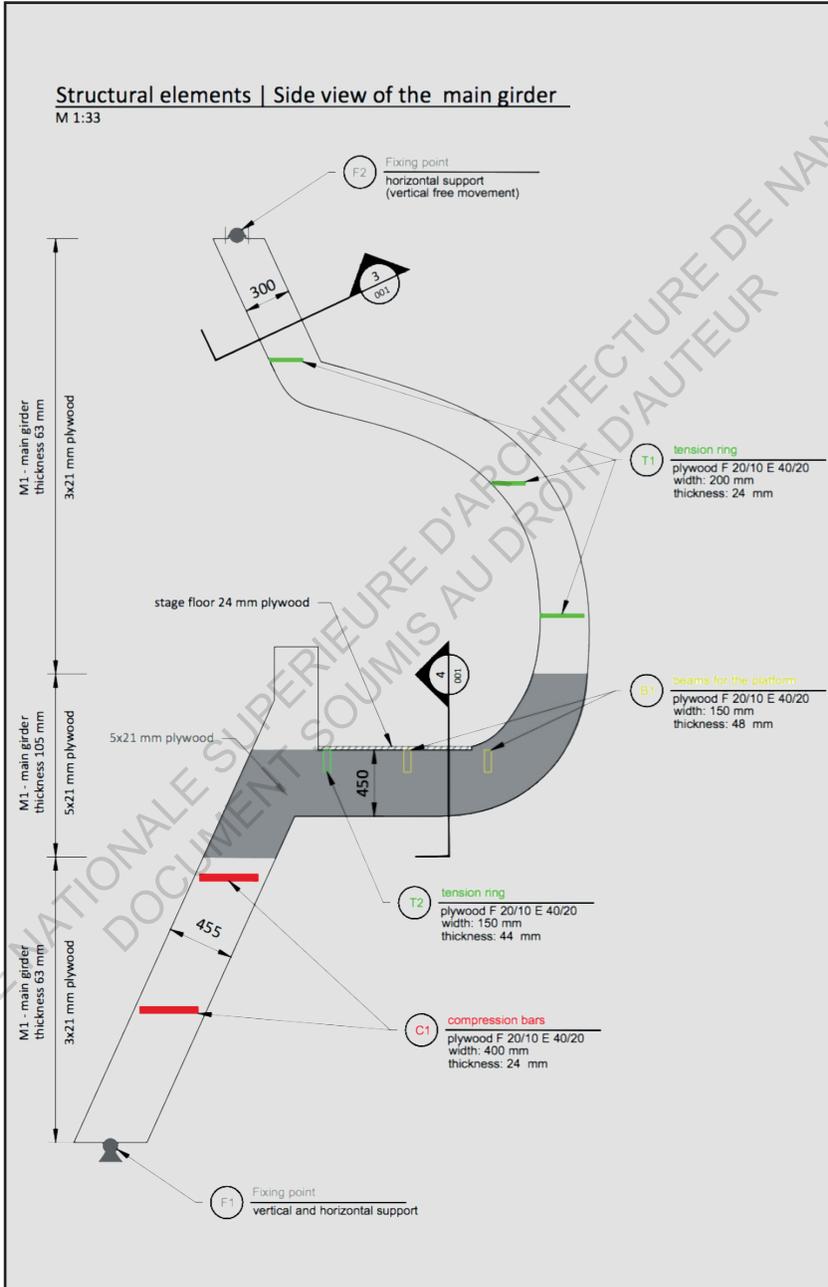
Les solives supportant le plancher de la passerelle (plywood F 20/10 E 40/20) sont réalisées en 2 couches de contre-plaqué collées de 24mm d'épaisseur, pour obtenir une épaisseur totale de 48 mm d'épaisseur.

-Les nouveaux chaînages et contreventements selon Leicht-France-

Les nouveaux chaînages horizontaux métallique sont réalisés en tirant d'acier fileté aux extrémités et assemblés par boulonnage à chaque membrure verticale. Ces tirants sont positionnés au dessus et en dessous de chaque chaînage horizontal travaillant en tension en contre-plaqué. Les contreventements, eux, se positionnent en diagonal entre les tirants d'acier, leurs emplacements ne sont pas encore définitifs.

Les dimensionnements des tirants d'acier, des assemblages métalliques et les contreventements seront à définir selon les futures caractéristiques techniques de résistance mécanique préconisé par les calculs du bureau structure LeichtFrance.

Plan
 côté et annoté des éléments de structure
 de l'ossature bois de l'écrin, sans échelle - juin 2018
 ©LeichtFrance

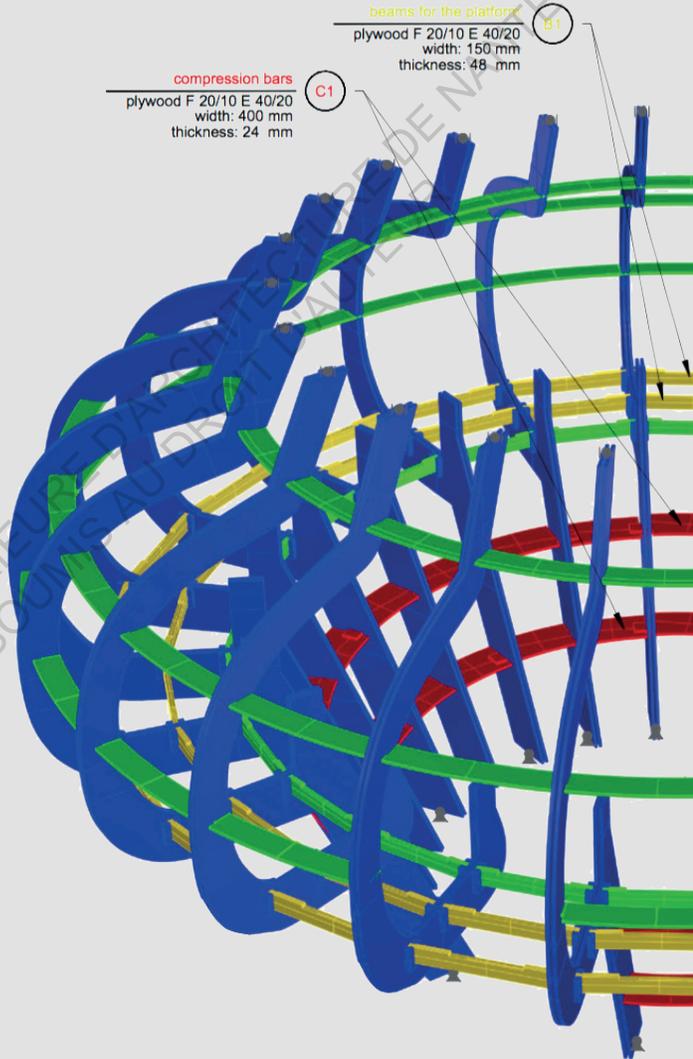


Structural elements | schematic sketch

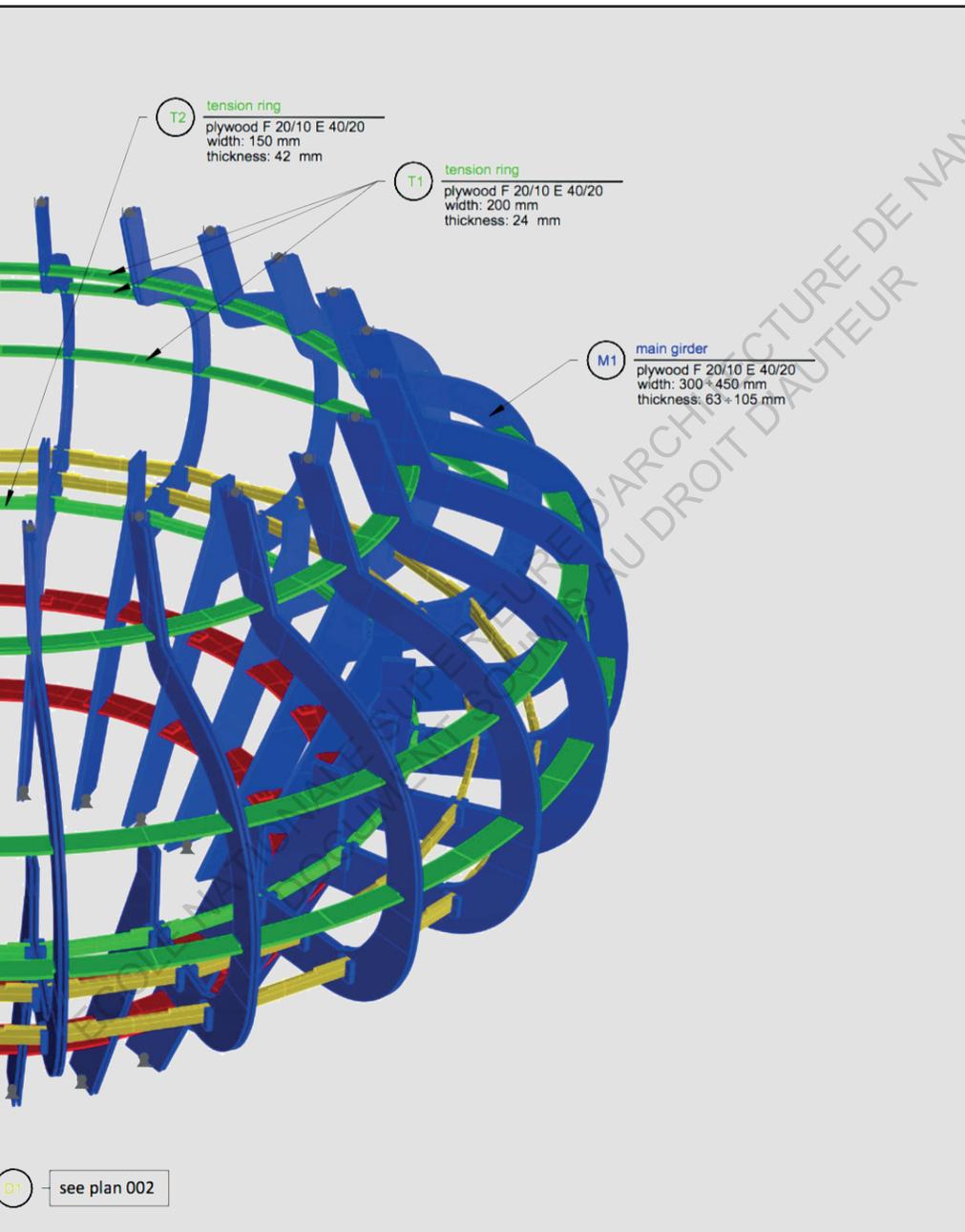
sans échelle

beams for the platform
plywood F 20/10 E 40/20
width: 150 mm
thickness: 48 mm

compression bars
plywood F 20/10 E 40/20
width: 400 mm
thickness: 24 mm



diagonales
Bois de peuplier et résineux C24
width: 60 mm
thickness: 60 mm



Axonométrie
annotée de l'ossature bois de l'écran
de Coraulis - juin 2018
©LeichtFrance

À la fin de cette réunion, nous soulevons de nombreux problèmes qui ne sont pas en adéquation avec les différents éléments techniques du dispositif. En effet, Lutz Schoene, dans ses calculs de structure, n'avait pas pris en compte que les deux membrures au niveau de la porte-écran du dispositif ont leurs « pieds » (ou partie basse) qui sont différents de toutes les autres membrures. Normalement les pieds de ces membrures sont droits et reculés, à l'inverse des autres membrures, qui eux sont penchés vers l'avant (pour suivre la courbe conique de l'écran). Ainsi, sur les calculs de LeichtFrance, les deux pieds des membrures se retrouvent en plein milieu de la surface d'ouverture de la porte-écran et du chemin d'accès minimum de la nacelle d'entretien.

De plus, l'accès à la passerelle se retrouve impossible à cause des nouveaux chaînages en partie haute (en jaune). En effet, la modification des chaînages et l'ajout d'un nouveau chaînage fait que l'accès à la passerelle se retrouve bloqué dès la sortie d'escalier (en vert) par l'ossature.

Il reste aussi à définir le dimensionnement et les calculs de l'ossature du sas qui est maintenant modélisée et complète.

Le 22 juin, sans nouvelles de LeichtFrance, nous leur envoyons un fichier Rhino 3D. Sur ce fichier est représenté sous la forme d'un solide rouge le volume de la nacelle d'entretien qui sera utilisée pour la maintenance de *Coraulis*.

Nous avons placé plusieurs solides rouge afin de représenter l'espace minimum requis pour que la nacelle soit manœuvrée afin de traverser le sas et entrer dans le cœur du dispositif. Ceci met en valeur le fait que les deux poteaux inclinés (en bleu) au niveau de la porte-écran bloque ce cheminement. Nous leur rappelons qu'une solution doit être trouvée au plus vite pour lancer un appel d'offre. De plus, nous leur envoyons la déclaration de performance du contreplaqué d'okoumé¹ vendu par l'entreprise Panofrance² et Garnica³.

1 - arbre de la famille des Burseraceae, originaire d'Afrique de l'Ouest

2 - enseigne française spécialiste dans la vente de bois et de matériaux de construction

3 - entreprise espagnole, spécialiste européenne du contreplaqué en peuplier

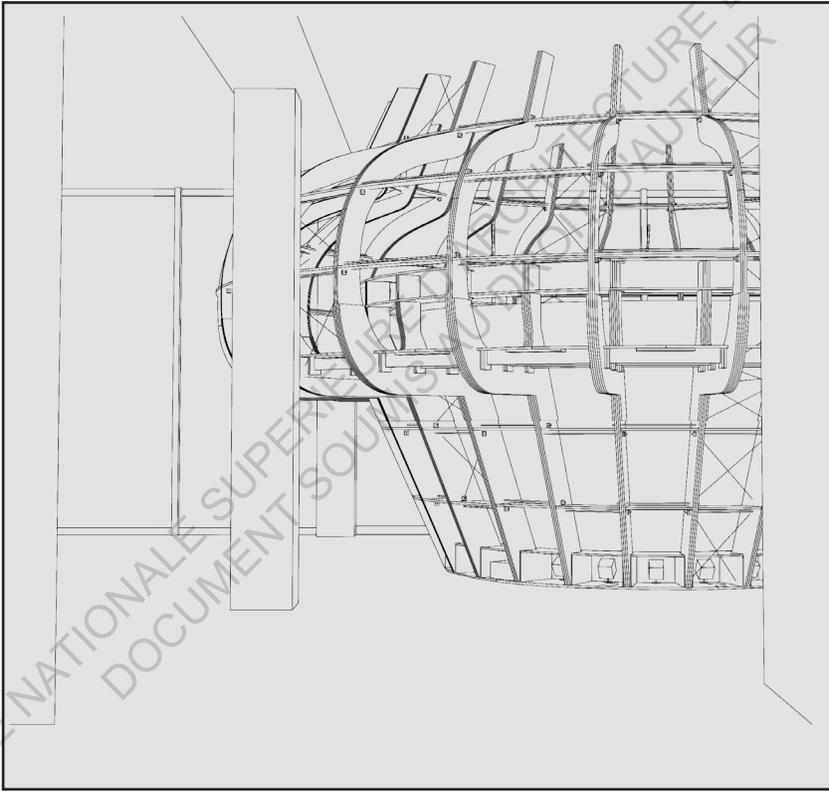
Axonométries
de l'ossature bois de Coraquis avec colorisation
des problèmes soulevés lors de la réunion
avec LeichtFrance - juin 2018

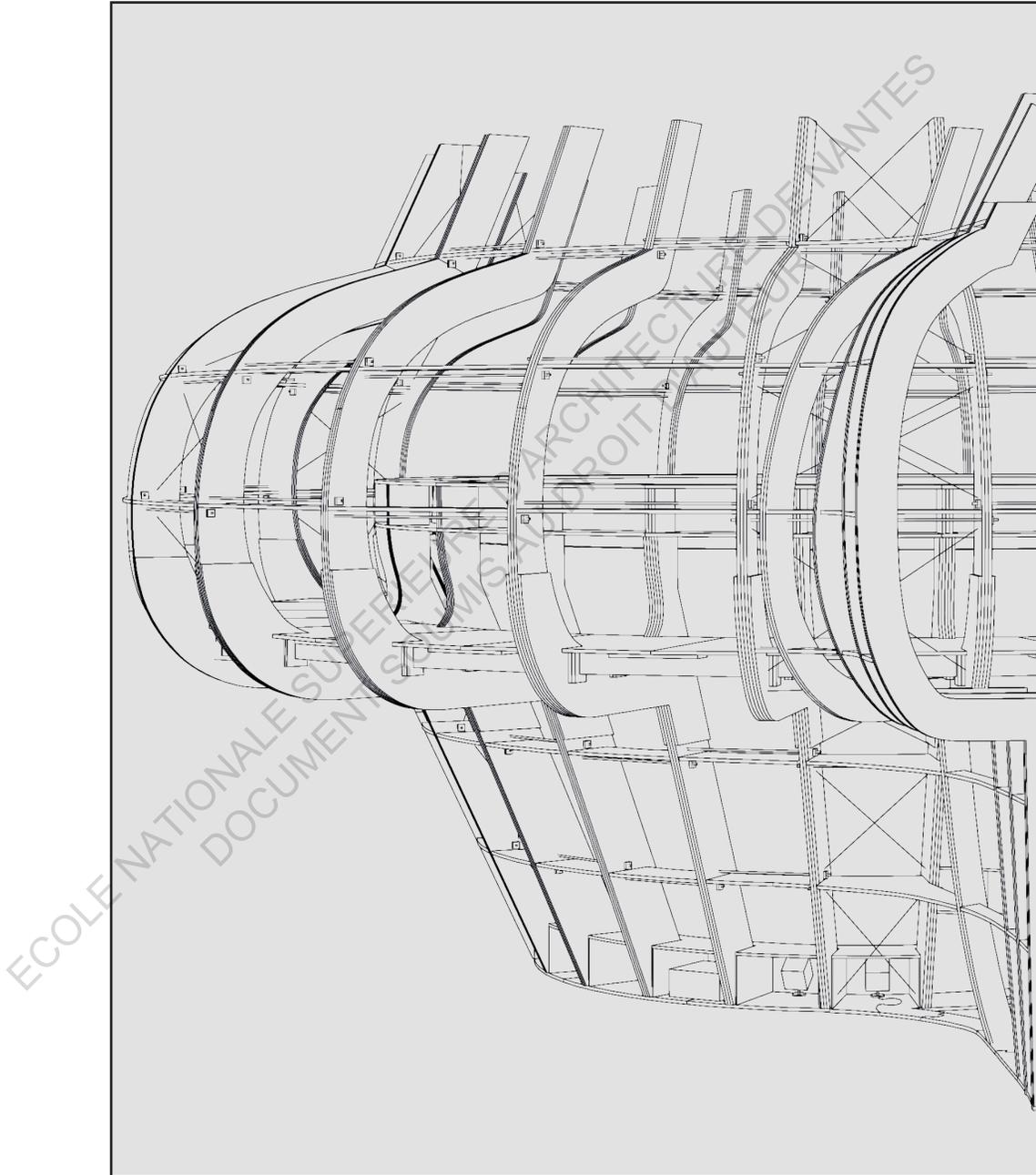


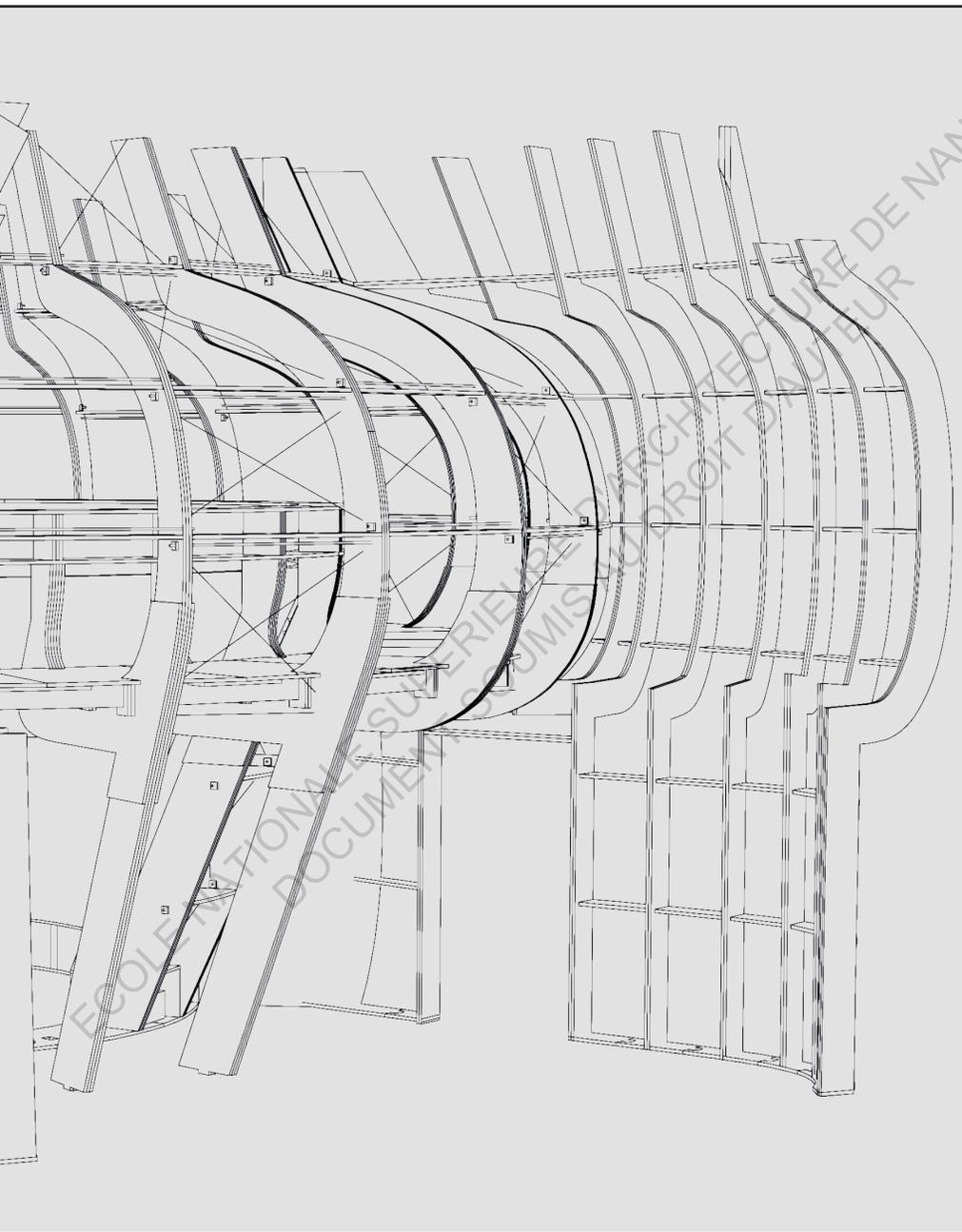
Le 28 juin, Lutz Shoene nous répond. Pour le contreplaqué, celui de PanoFrance a les performances requises (cf. annexes, page 166-167) pour la construction de l'ossature. Quant aux poteaux au niveau de la porte-écran, aucune solution n'a encore été trouvée ; il nous rappelle que pour soutenir la performance de la structure avec un « effet de coque », il est nécessaire d'incliner les poteaux. Pour les chaînages au niveau de la passerelle, il estime que si nous solidifions les chaînages qui sont au dessus et au dessous, cela pourrait être possible.

Ainsi, **le 29 juin**, nous terminons le stage. Nous lui envoyons un dernier mail avec une nouvelle modélisation complète de l'ossature de l'écrin qui prend en compte toutes les données de calculs et de dimensionnement de LeichtFrance, ainsi qu'une solution envisagée pour les poteaux et les chaînages qui posent problèmes. **Le 12 octobre**, Lutz Schoene envoie la note de calcul complète de l'ossature de *Coraulis*, aucune solution n'a encore été trouvée pour rendre l'ossature finale viable (celle datant du 29 juin 2018), nous attendons donc la reprise du projet au premier semestre 2019 pour terminer la conception, et je l'espère, entamer la construction de cette ossature.

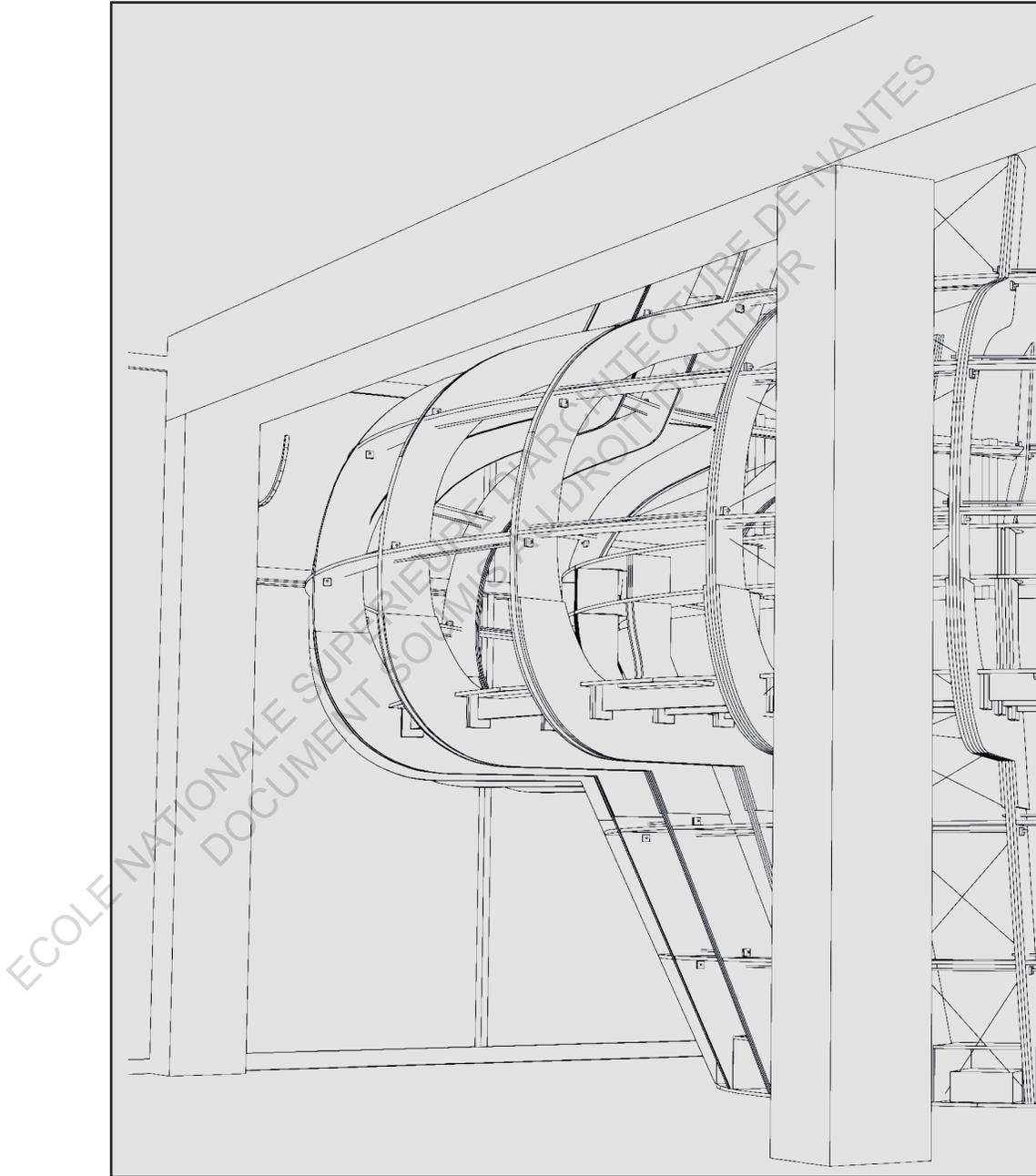
Axonométrie
de l'ossature bois de l'écrin
de Coraulis sur le plateau 1A
vue ouest - juin 2018

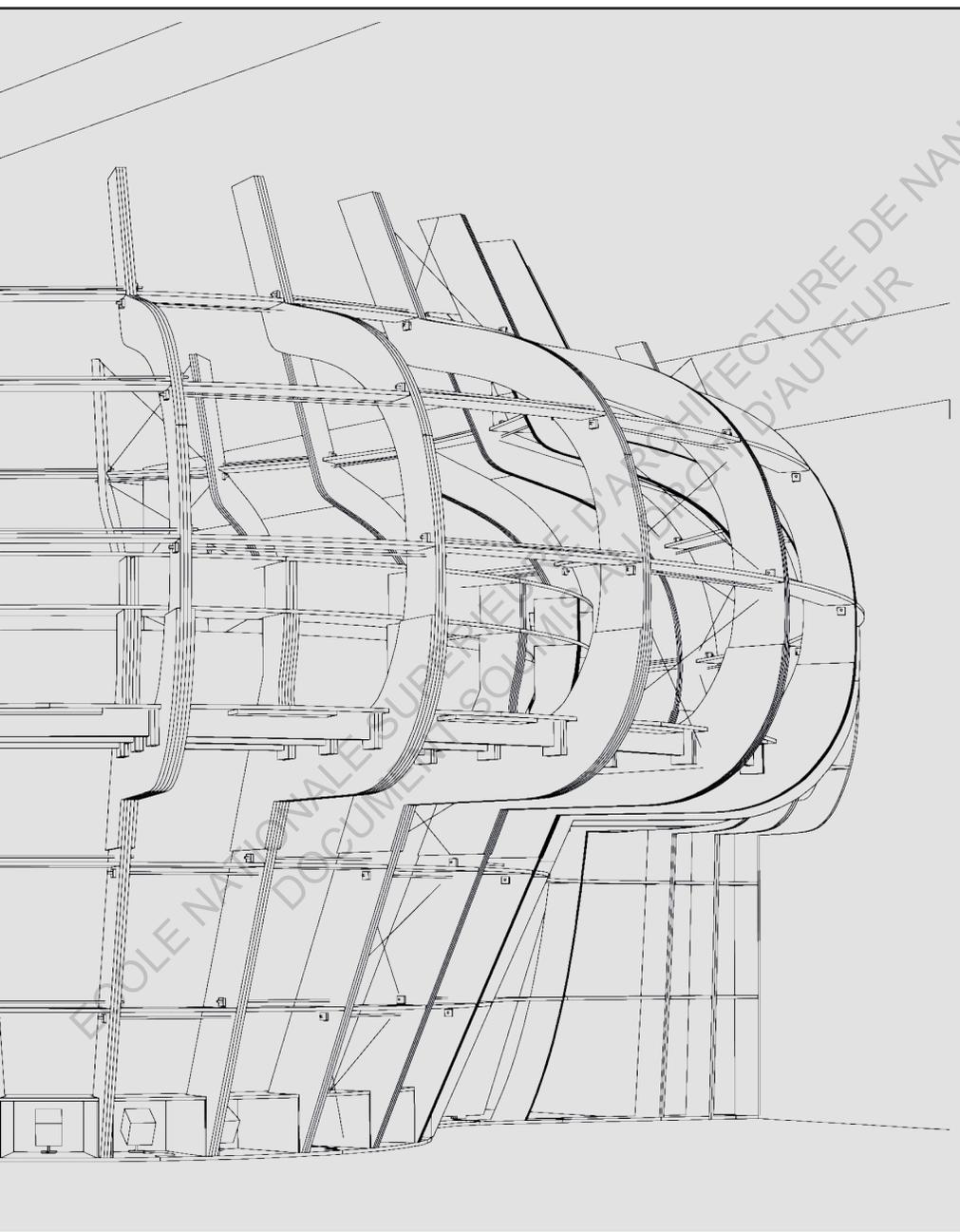






Axonométrie
de l'ossature bois de l'écrin
de Coraulis sur le plateau 1A
vue sud-ouest - juin 2018





Axonométrie
de l'ossature bois de l'écrin
de Coraulis sur le plateau 1A
vue nord-ouest - juin 2018



2.3 - Optimisation - le paramétrique

Très rapidement après le début du projet, nos encadrants nous avaient sollicité pour débuter la modélisation paramétrique. Nous devons nous former à Grasshopper, qui est un plugin de Rhinoceros, logiciel que nous utilisons depuis le début du stage. Ce plugin est un programme complétant les fonctionnalités du logiciel, il permet de créer des modèles paramétriques sur Rhinoceros grâce à de la programmation visuelle. Un modèle paramétrique définit une géométrie dynamique où la modification de valeurs de paramètres se répercute sur l'ensemble de celle-ci, pour résumer, si on apprend à bien l'utiliser, on peut gagner énormément de temps. En effet, Grasshopper se constitue d'algorithme nodal et tend à se rapprocher un peu plus d'un fonctionnement cognitif naturel.

Serpentine gallery

De nombreux projets d'architecture ont vu le jour grâce à cet outil informatique. Un des exemples les plus connus, dont la structure, le système constructif et la technique de mise en œuvre se rapproche le plus des nôtres, est le projet conçu par les architectes Portugais Álvaro Siza et Eduardo Souto De Moura, en collaboration avec l'ingénieur en structure Cecil Balmond, pour la Serpentine Gallery de Londres en 2005.



Ce pavillon temporaire installé dans les jardins de la principale Galerie à été imaginé, conçu et construit en seulement six mois. Le pavillon construit a émergé de l'articulation réussie entre deux approches différentes de la conception architecturale. En effet, le design et la forme ont été développés à travers le dessin et sans aucune influence numérique, a aboutit à l'imagination d'une solution architecturale comportant une forme et une structure complexes. Puis, pour rendre cette construction possible, l'utilisation de l'outil informatique était alors essentielle afin de faire évoluer cette intention morphique vers une solution constructive en bois. Enfin, la fabrication numérique était la seule solution capable de résoudre à temps et avec précision, la matérialisation de cette ossature complexe.

Les architectes, conscients de leur manque de capacités en conception informatique et des limites engendrées par le dessin en deux dimensions, sont partis à la rencontre d'une société de visualisation 3D basée à Porto, afin d'étudier et de faire évoluer la forme générale du pavillon. La première maquette numérique du pavillon a été réalisée avec Rhinocéros, mais étant donné que ce n'était pas une représentation paramétrique, chaque modification mineure apportée à la conception impliquait la re-modélisation de chaque pièce.

Les architectes ont alors défini une liste de contraintes et de paramètres à suivre. Cela leur a permis d'avoir un certain degré de contrôle à travers la phase de modélisation, même s'ils n'y ont pas participé.

Les concepteurs ont alors utilisé Grasshopper, ils ont suivi les contraintes données par les architectes, telles que les hauteurs maximales et minimales, les longueurs et l'inclinaison naturelle de chaque pièce pour modéliser les 427 pièces à mortaise et à tenon composants l'ossature. Par la suite, ces pièces ont été découpées en utilisant un bras robotique à commande numérique KUKA à 5 axes. Le flux de travail était totalement numérique et requis une collaboration directe entre les ingénieurs et les fabricants, en évitant la production de dessins imprimés. Le tout processus numérique a permis d'obtenir toutes les pièces effectuées dans un laps de temps très court et avec une grande précision. Toutes les pièces structurelles ont ensuite été transportées et assemblées sur le site du projet. En raison de la nature irrégulière de la structure, le bâtiment devait être assemblé dans un ordre strict pour éviter un effondrement au cours de ce processus.

À l'inverse d'Álvaro Siza et Eduardo Souto de Moura, nous n'avons pas les moyens d'aller engager une société à Porto pour réaliser cette tâche. Alexandra a alors commencé à se former sur ce plugin, personnellement, j'étais trop frileux à apprendre Grasshopper alors que je venais tout juste de commencer Rhinocéros. Alexandra, aidée par un de nos encadrants, a produit un premier fichier, celui-ci permettait de faire modifier les points d'altimétrie et les décalages des membrures en fonction de l'évolution de l'écran du dispositif. Ce fichier était une bonne base, mais nous n'avons pas donné suite. Avec Alexandra, nous préférons travailler sur Rhinoceros, cela prenait du temps de comprendre en détail les différents algorithmes nodaux et fonctions de paramétrages, ainsi que les liaisons à faire entre chaque. Alors nous avons rapidement stoppé l'évolution de ce fichier, et nous l'avons plus tard regretté.

Comme présenté dans le projet de la Serpentine Gallery, le paramétrique aurait permis qu'à chaque modification mineure apportée à la conception, la re-modélisation de chaque pièce concernée ne soit pas obligatoire.

Déroulement

En définitive, les seuls éléments préalables que nous aurions dû dessiner manuellement dans Rhinocéros était les courbes génératrices qui nous permettaient par la suite de générer la volumétrie de base de l'écrin, et d'extraire petit à petit les données nécessaires à son développement.

Une fois les formes générales de la coque extérieure de l'écrin définies, et quoique tout à fait modifiables si l'on se décidait à bouger les courbes génératrices, il était possible de commencer à décomposer cette forme progressivement.

L'étape la plus importante pour la suite du développement aurait été de générer des plans de section correspondant au plan des membrures structurelles. Une étape décisive car nous aurions pu exploiter jusqu'à la toute fin ces plans de section pour générer les éléments de détail comme par exemple l'emplacement des tenons et mortaises.

Le fait d'avoir généré et classé tous ces plans aurait permis de travailler de façon systématisée dans chacun d'entre eux, et de se prémunir contre certaines tâches extrêmement rébarbatives. Une des

grandes forces de Grasshopper est de permettre au concepteur du script d'organiser des listes de données et de les traiter de façon systématique en les mettant en relation avec d'autres listes de données.

Toujours est-il qu'une fois les premiers plans de section créés, nous aurions pu avancer dans la décomposition du volume de l'écrin. Notamment, il aurait été possible de matérialiser l'intersection entre ces plans et nos génératrices initiales, afin de relier ces points d'intersection et ainsi commencer à entrevoir les membrures structurelles. Restait à leur donner une épaisseur et une largeur, mais encore une fois ce type de tâche peut être effectuée de façon systématisée et ne prend guère plus de quelques secondes à mettre en forme si nous connaissons les bonnes commandes.

Une fois certaines géométries essentielles générées, tel que les membrures structurelles, il était possible de répartir la géométrie de chacune d'elles afin de traiter la modélisation de façon locale. Les chaînages horizontaux, les solives de maintien, les tirants d'acier par la suite et les contreventements. Pas un seul de ces objets n'aurait été dessiné manuellement, ils auraient tous été déduits de la position et de la géométrie propre de chaque membrure.

Ensuite, la dernière étape aurait été la capacité à isoler et à contrôler des paramètres ordonnés. Une des compétences cruciales à acquérir dans l'usage des outils paramétriques, est celle de pouvoir disposer des paramètres précis en amont du programme, dont chaque élément conçu par la suite soit dépendant. Nous avons la certitude que nous voulions construire des membrures en bois, mais nous ne savions pas avec quel type de bois. Par conséquent, l'épaisseur et la largeur des membrures restaient à déterminer conjointement avec l'ingénieur structure. Par exemple, quand Lutz Shoene nous a demandé de passer d'une structure avec des membrures de 63mm d'épaisseur au lieu de 72mm, alors que chaînages et contreventements auraient déjà tous été dessinés. Trois secondes, c'est à peu près le temps qu'il aurait fallu pour rectifier l'ensemble du modèle numérique le jour où Lutz est passé, alors que nous, nous y avons passé plusieurs heures.¹

1 - Sous partie «Déroutement» inspirée de La Maison branchée [PFE] : le numérique à l'épreuve du réel, écrit par Hugo Lebrunet ; 2018, 88p.

DE L'HYPODERME
À L'ÉPIDERME

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

« Pousser l'interprétation des images jusque dans la réalité physique et constructive est un enjeu plus fondamental qu'il n'y paraît au premier abord »

Yves Weinand

Cette troisième partie porte sur l'étude de conception de la coque de l'écrin, de sa membrane/carapace. Cette coque ayant évolué en concordance, et parfois indépendamment de l'ossature présentée dans la partie précédente, ce chapitre retrace les différentes étapes d'évolution, depuis la semaine du projet court jusqu'à la fin du stage.

ECOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOURCE À DROIT D'AUTEUR

3.1 - Inspirations

Au cours de la semaine d'intensif du projet court, nous savions que notre projet serait peut-être amené à être réalisé. Nous réfléchissions déjà à plusieurs techniques de mise en œuvre, sans trop de prétention, nous nous disions qu'avec un peu de recherche et de test, ce pourrait être facilement réalisable. Comme expliqué dans la partie précédente, à la fin de la semaine d'intensif du projet court, nous avons fixé deux hypothèses de réalisation. La première était de réaliser une ossature métallique en partie basse, qui viendrait accueillir par dessus, pour former la partie du tore, une coque autoportante composée d'un système isolant pris en sandwich entre deux revêtements composite. L'écrin serait alors formé de plusieurs quartiers de coques venants s'assembler pour former la structure et le revêtement voulu. La seconde hypothèse était de remplacer cette coque autoportante composite en une ossature bois comprenant un système isolant, sur laquelle viendrait se fixer un revêtement extérieur et intérieur répondant à nos envies esthétiques. Outre le côté structurel, l'aspect esthétique était très important, l'envie était d'avoir un revêtement extérieur homogène et coloré. Comme la chaise *Cantilever* de Verner Panton, nous voulions cet écrin d'un orange ou rouge vif, dans une matière « plastique » tellement lisse et brillante qu'on pourrait y voir le reflet déformé de l'école à l'intérieur.



Photo
de la Chaise Cantilever de Verner Panton
©Schmakenburg & Brahl

Mouvement pop

Nous avons alors commencé nos recherches dans l'architecture des années 60, celle de Grande Bretagne. À l'époque de la pop et d'Archigram, l'époque où les artistes et architectes voulaient échapper à la « tyrannie » du blanc, couleur emblème du Mouvement Moderne. Le plastique apparaissait dans de nombreux projets de microarchitecture. Véritable adéquation entre un matériau nouveau pour l'époque, vierge de tradition, et des aspirations formelles qui cherchent à s'émanciper de la poésie de l'angle droit. Le plastique, idéal pour générer des formes courbes, est à la fois structure et enveloppe. L'Angleterre était alors à la pointe des recherches sur la maison plastique, avec les projets de la *Plastic House* de Peter et Alison Smithson, L'abris plastique pour British Railways d'Arthur Quarmby (1961), la maison de Stanley Smith pour Bakelite Ltd (1963), la maison en plastique sur un mât d'Arthur Quarmby (1964), ou encore, les capsules plastiques de Warren Chalk, membre fondateur d'Archigram. Mais d'un point de vue tant technique que formel, c'est la Maison Futuro de Matti Suuronen qu'on trouva la plus proche de nos idées. Sans avoir jamais vu cette œuvre auparavant, notre proposition d'écrin s'en rapprochait énormément, comme en atteste cette photo de la maison Futuro, nous pouvons voir la connotation spatiale commune. Le prototype de la Futuro se présentait sous une forme elliptique, mesurait 8 mètres de diamètre, pesait 400 kilos et reposait sur des pieds en métal. Elle était construite en polyester renforcé de fibres de verre, un matériau isolant dérivé du pétrole.

Photo
de la Futuro House de Matti Suuronen
©Central Saint Martins

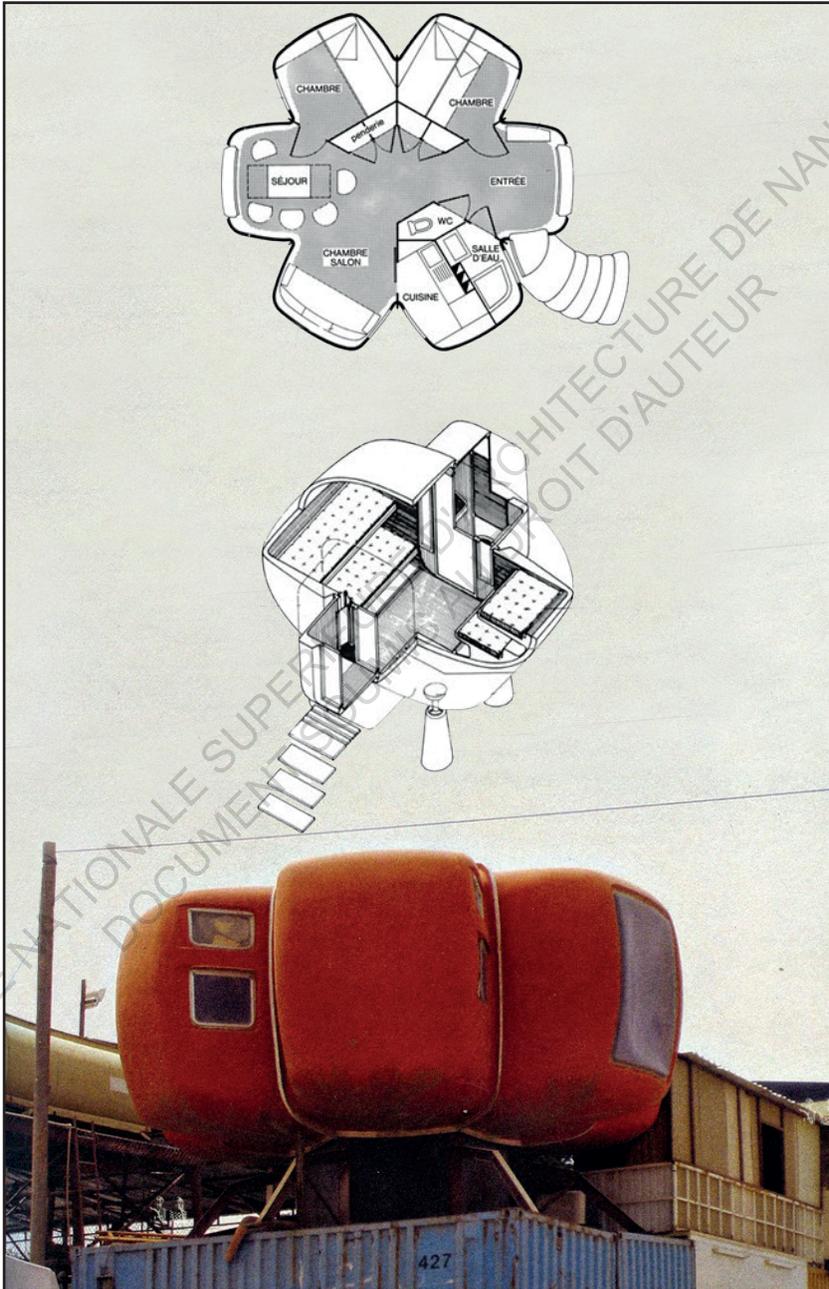


Bulle six coques

Cependant, peu de documents techniques étaient disponibles sur cette réalisation, alors nous nous sommes intéressés cette fois-ci au travail d'un français, Jean-Benjamin Maneval. À la fin de l'année 63, J. Maneval s'oriente vers des formes courbes, en bulles, en coques, qui lui semblent adaptées à l'expression de la matière plastique en architecture. Il s'agissait d'exploiter au mieux les qualités du matériau novateur, riche de possibilités formelles et structurelles. Il conçoit alors une maison Bulle préfabriquée. Celle-ci, industrialisée à partir de 1968, est entièrement conçue en matériaux de synthèse. La solution formelle en bulbe, assortie de la solution technique d'un découpage en quartiers, pour définir des coques à assembler, est présente depuis les premières esquisses connues jusqu'au projet final.

La mise au point des détails d'assemblage et du socle fait l'objet de nombreux croquis et des plus longues études de détails. Un des aspects novateurs dans sa démarche, hormis la recherche purement architecturale qui caractérise la maison Bulle, est l'attention portée très tôt dans les études au contrôle de l'ensemble du processus de fabrication, ce que nous devons aussi faire pour mener à bien la conception et la réalisation de l'écrin de *Coraulis*. Le parti se précise très vite et reste étonnamment stable jusqu'à la réalisation finale de la Bulle.

La *Bulle six coques* a une surface habitable de 36 mètres carrés pour un poids total de 1,5 tonnes. Le poids d'une coque est de 210 Kilos. La fabrication des coques se fait en usine à partir d'un seul type de moule, suivant la même que celle des coques de bateaux (stratification sous vide, voir sous-partie 3.3). Les coques sont réalisées en polyester, qui forme la peau extérieure et intérieure des éléments, et prennent en sandwich un isolant en mousse polyuréthane de 10cm et une structure métallique tubulaire. Ce complexe isolant permettait d'obtenir un coefficient « K » d'isolation thermique de 0,63 ; très performant en ces temps d'avant la crise pétrolière de 1973. Le montage sur site est alors simplement constitué d'un assemblage boulonné de pièces préfabriquées sans recours à des liants humides, ce qui rend le chantier rapide, propre et sec ; les joints à bords relevés, eux, permettent une dilatation libre des coques entre elles.



Photo, plan annoté & axonométrie de la Bulle six coque de J-B. Maneval

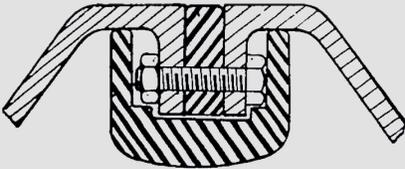
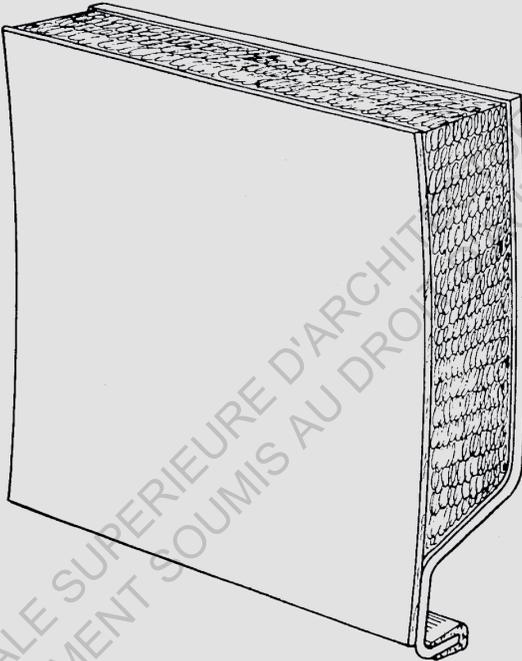
Pour l'époque, la *Bulle six coques* est une véritable révolution dans le domaine de l'habitat préfabriqué et de l'architecture sans fondations. La maison est transportable, montable et démontable rapidement grâce à un assemblage facile qui nécessite peu de main d'œuvre. Cette réalisation a beaucoup inspiré la construction industrielle, à l'image des grandes *Piscines Tournesol* de Bernard Schoeller, construites au début des années 1970, dans les agglomérations férues de modernité. Les coupoles, portées par des arches métalliques mobiles et équipées de hublots, avaient-elles aussi des allures de soucoupe volante.

Après une longue recherche sur la *Bulle six coques*, nous arrivons à nous procurer le brevet du *Procédé de montage des cellules d'habitation en matériau de synthèse*. La présente invention concerne le dispositif d'assemblage des coques, il est constitué essentiellement par la mise bord à bord des coques ayant des éléments recourbés pris dans la masse desdites coques puis le tout est simplement boulonné, cela permet alors d'assurer l'étanchéité et le raidissement de l'assemblage. Vu comme ça, cela semble complexe dans la méthode de réalisation, mais après prototypage et assimilation de la technicité, ce pourrait être pratique et « simple » du fait de la répétition de la mise en œuvre.

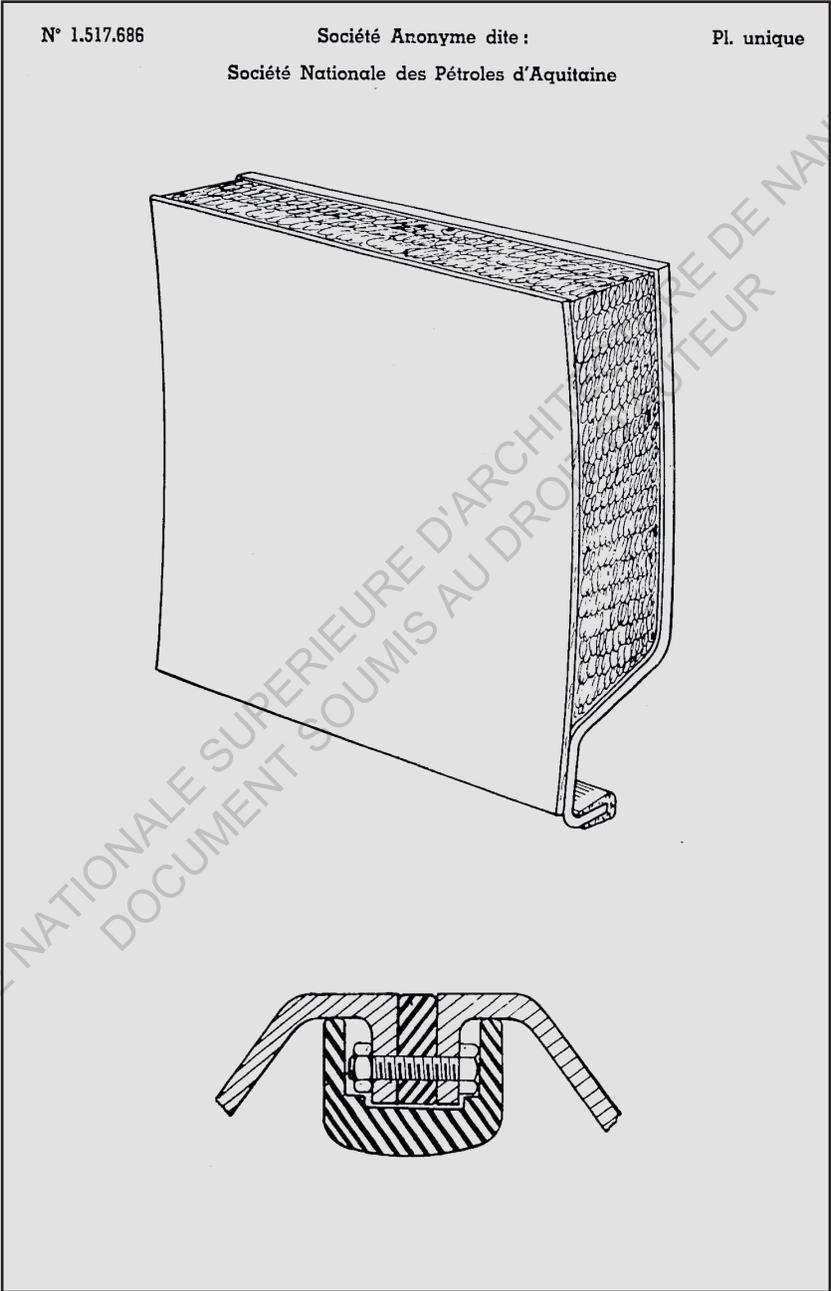
N° 1.517.686

Société Anonyme dite :
Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine

Pl. unique



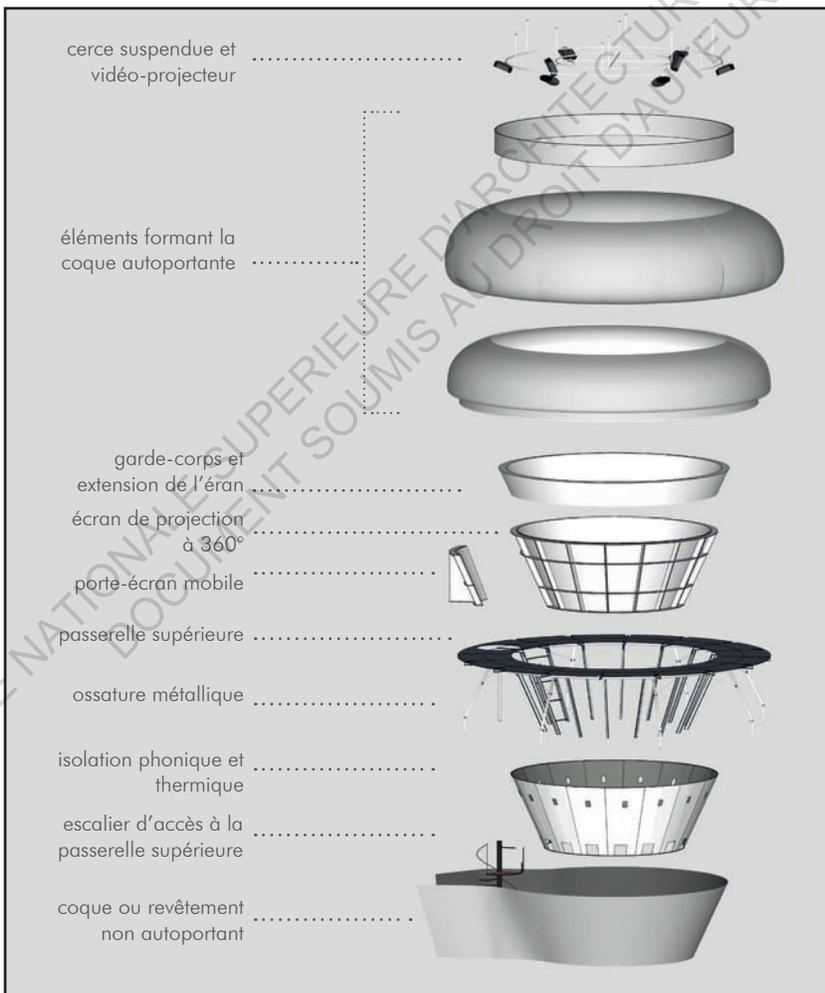
Dessins
 tirés du brevet du «Procédé de montage des cellules d'habitation
 en matériau de synthèse», de la Bulle six coque ; 1965
 ©Société nationale des pétroles d'Aquitaine



3.2 - Ossature métal et coque autoportante

Comme expliqué dans la partie précédente. Au tout début, l'écrin de *Coraulis* est constitué d'une ossature métallique (recouverte de coques) supportant la coursive supérieure et des poteaux métalliques viennent stabiliser celle-ci, rappelant la forme des pattes d'une tique. Au dessus de cette structure viendrait se poser une coque autoportante de la forme d'un tore.

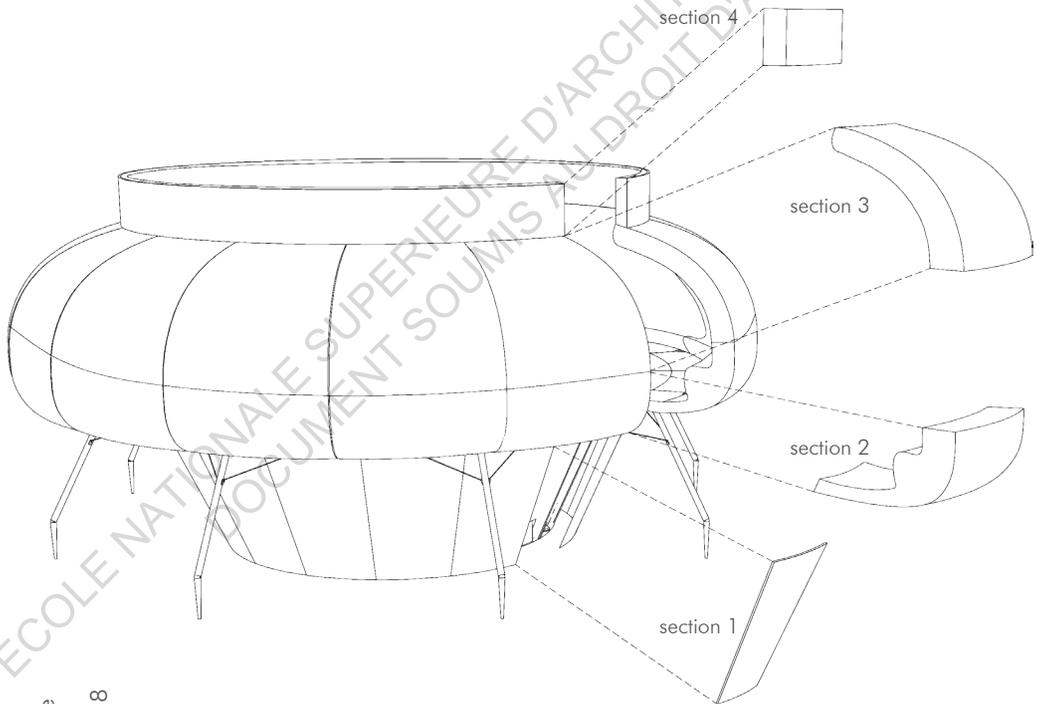
L'association de ces deux structures constituerait la coque formant l'écrin de *Coraulis*.



Axonométrie
annotée de l'écrin de
Coraulis - février 2018

Séquençage

Cette carapace serait alors divisée en 4 parties distinctes (découpage par tranche horizontale). Pour commencer nous mettons de côté la partie du sas d'entrée, qui n'est pas encore bien défini, pour nous concentrer seulement sur la carapace principale qui est tramée et parfaitement symétrique. Chacune de ces 4 sections serait divisées en quartiers, comme un assemblage d'écailles préfabriquées, l'ensemble des pièces seraient fixées entres-elles et jointées pour former un tout homogène et lisse.



-Section 1-

La première section est le cône inversé tronqué, cette partie de la coque vient « chemiser » l'écran de *Coraulis*. Cette section ne nous inquiète pas vraiment, elle ne supporte rien, mis à part son propre poids. Ce cône inversé est ancré au sol et séparé du béton par un joint souple permettant une dilatation libre et une meilleure isolation phonique de l'ensemble. Cette partie serait alors divisée en 16 coques identiques de forme trapézoïdale et de simple courbure qui viendraient se fixer sur l'ossature métallique (système isolant compris dans la structure). Comme on peut le visualiser sur l'image de rendu photoréaliste (cf. page 40-41), la partie basse de notre écran est poli-miroir. Ce revêtement pourrait être réalisé de trois manières différentes : soit en tôle d'innox poli de 0,5mm courbé et riveté sur place contre l'ossature métallique ; soit en Alucobond® de 2mm d'épaisseur cintré et vissé, qui est vendu sous la forme d'un panneau sandwich composite constitué de deux tôles d'aluminium et d'un noyau en polyéthylène ; soit dans un matériau qui serait moulé ou thermoformé, avec un traitement de surface poli-miroir.

-Section 2-

La deuxième section de la coque est la plus critique. Cette section de coque est censée se fixer au dessous de la passerelle pour ensuite remonter et dessiner le bas du tore. De ce fait, en plus d'avoir une double courbure très importante, elle est censée constituer et former l'espace d'assise de la passerelle. Alors, en plus de supporter son propre poids, cette section doit pouvoir supporter le poids de plusieurs personnes assises au sein de *Coraulis*. Cette partie serait divisée en 16 coques autoportantes identiques de forme trapézoïdale.

-Section 3-

La troisième partie est la section haute de la carapace, elle vient former l'autre partie du tore et le toit au dessus de la passerelle. Cette coque ne porte que son poids propre et permet de venir cloisonner l'espace de déambulation de la passerelle. Cette partie serait aussi divisée en 16 coques autoportantes identiques, elle serait assez complexe à réaliser du fait de sa grande surface et de sa double courbure.

-Section 4-

La quatrième partie vient se raccorder à la partie haute du tore et former le cylindre qui viendra se fixer à la dalle béton. Elle vient refermer l'ensemble de la carapace, et rejoint le plafond par un joint souple permettant une dilatation libre et une meilleure isolation phonique de l'ensemble. Cette coque ne porte que son poids propre et permet une étanchéité complète du dispositif d'observation *Coraulis*. Cette partie serait aussi divisée en 16 coques autoportante identiques en simple courbure.

Mise en oeuvre et composition

Nous commençons alors à nous renseigner sur une possible mise en œuvre avec des procédés de fabrication actuels, cela suppose le passage par l'industrialisation, mais pour réduire au maximum le coût des travaux, nous aimerions, si possible, réaliser tout ça au sein même de l'école avec les moyens mis à disposition. Depuis la Bulle six coques, l'usage de nouveaux matériaux s'est lentement développé. Les composites – ciment verre ou résine verre, carbone, kevlar... - ont, par exemple, des propriétés très remarquées et très intéressantes à travailler dans le cadre de *Coraulis*. Comme spécifié plus haut, ces matériaux composites associés à une mousse d'isolation thermique constituent des sandwichs très performants et adéquates pour notre utilisation. Parmi les matériaux récents, certains sont déjà très appréciés dans de nombreux secteurs industriels comme l'automobile, l'aéronautique, la construction navale et nombreux biens de consommation.

Nous prenons alors brièvement contact avec plusieurs entreprises spécialisées dans le composite. Une entreprise réputée pour la fabrication de cabine de douche et une entreprise de la région spécialisée dans la fabrication de coque de bateau. La première ne donne suite, ni à nos appels, ni à nos mails ; la seconde nous répond gentiment que pour obtenir une qualité de finition, il faut fabriquer ces coques en usine avec des moules, et que compte tenu des investissements nécessaires à la fabrication (nous leur avons transmis nos fichiers par mail), seulement la production en série permettra d'abaisser le coût de fabrication. De plus, pour un projet comme le nôtre, cela coûterait plus d'une centaine de milliers d'euros à fabriquer.

Peine perdu, nous chercherons alors à les réaliser nous-même, notre carapace (SECTION 2, 3 et 4) serait alors constituée de deux coques superposées et assemblées ensemble et feront l'objet de moulages séparés. Cette paroi devra être particulièrement performante au point de vue étanchéité, isolation thermique et phonique pour répondre aux critères exigés de *Coraulis*.

La coque extérieure serait en polyester (la colle polyester est un matériau synthétique bicomposant thermodurcissable) armé de fibres de verre. Elle assurera la rigidité et l'étanchéité de l'écrin. Chaque partie est constituée de plusieurs éléments pour un maniement aisé sur le chantier. La caractéristique autoportante des coques évite tout renfort ou charpente. La face extérieure visible est recouverte d'un gel coat auto-lavant qui donne sa couleur à *Coraulis*. La coque intérieure, elle, serait en résine armée, comme celle de l'extérieur. Elle supporterait une isolation thermique en mousse de polyuréthane (qui intègre si possible les gaines techniques). La peau intérieure posséderait une finition de surface dès sa sortie du moule qui pourra être teintée par exemple en noir mat pour limiter tout reflet de lumière à l'intérieur du dispositif immersif. La fixation entre les éléments des coques s'effectuerait sur les nervures par un système équivalent à la Bulle six coques (si nous y arrivons), et serait alors aisément démontable.

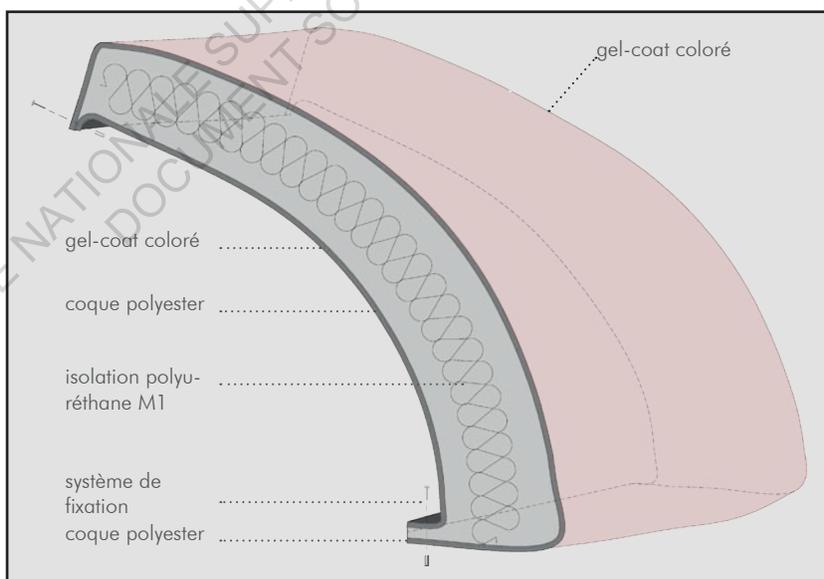


Schéma de la composition d'une coque autoportante - mars 2018

Ce type de construction a une faible inertie thermique et un coefficient d'isolation élevé. Ce type de réalisation pourrait bénéficier des garanties en vigueur dans le bâtiment : parfait achèvement, bon fonctionnement, pour une durée décennale. Les matières plastiques employées depuis plus de 55 ans dans l'automobile, la navigation de plaisance et l'aéronautique assurent la résistance à l'usure et au vieillissement.

Une coque autoportante bien réalisée, pourrait supporter une charge de 100 tonnes de neige pour une épaisseur de coque extérieure de 5mm. La résistance peut être adaptée en modifiant l'épaisseur. Les matériaux composites ont des avantages incontestables : rapport poids/résistance exceptionnel, longévité, variété des formes possibles, industrialisation.¹

Mais l'idée des coques autoportantes est rapidement laissée tomber à cause des coûts de production, la difficulté de mise en œuvre au sein de l'école et l'impossibilité de la coque à supporter les espaces d'assises sans renfort métallique.

Dès le départ, nous avons des doutes sur la coque autoportante, malgré notre espoir de voir se réaliser cette carapace, nous avons émis la probabilité de la concevoir autrement.

¹ - *L'arrivée des composites. Revue, Habitat n°18, décembre 1996 ; 25p.*

3.3 - Ossature métal-bois et coque non autoportante

Séquençage

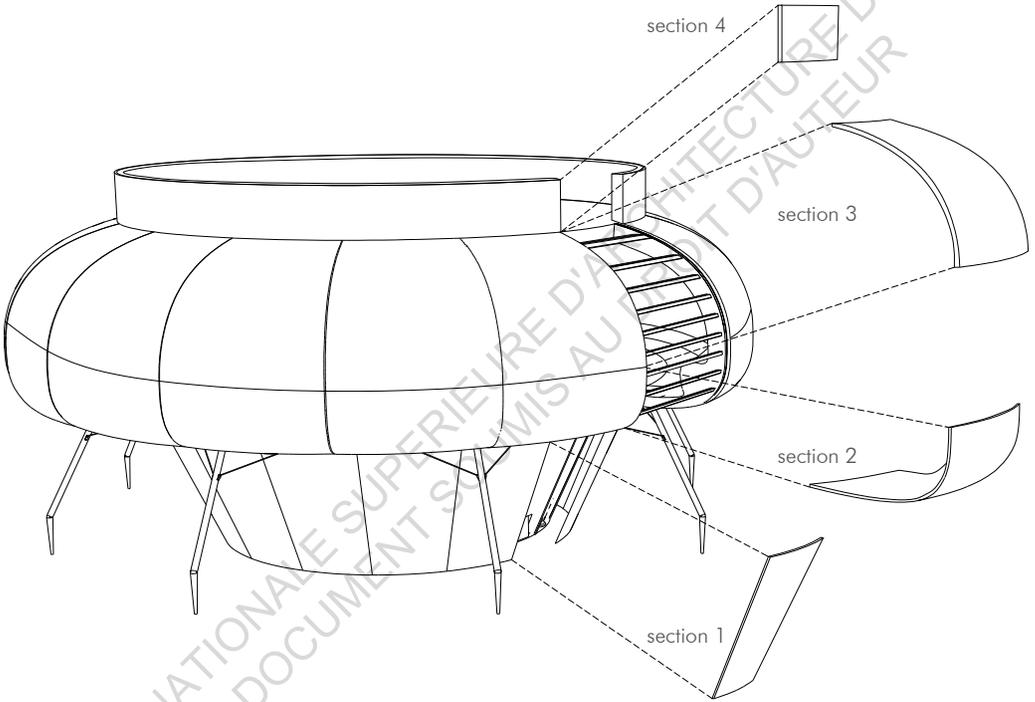
Pour le dossier de rendu du projet court, nous avons fixé l'hypothèse d'une ossature mixte, métal et bois. L'écrin de *Coraulis* serait constitué d'une ossature métallique en partie basse, et une seconde structure en partie haute. Cette seconde structure en bois autoportante, viendrait se fixer sur l'ossature métallique et servirait au support de la coque formant le tore (cf. image page 54-55). Ainsi, les sections de coques seraient réalisées en une seule couche de polyester armé de fibres de verre, non autoportante, et viendraient se fixer sur l'ossature pour ensuite être jointées par un liant silicone. L'isolant en mousse polyuréthane serait remplacé par un isolant minéral, type laine de roche, compris directement dans la structure métal-bois.

-Section 1-

La première section reste inchangée, la partie basse de notre écrin est toujours poli-miroir et sera réalisé de la même manière qu'expliqué précédemment.

-Section 2, 3 & 4-

La construction d'une ossature bois (détaillée dans la partie précédente) permettrait le support des coques, depuis le dessous de la passerelle du dispositif, jusqu'au plafond en béton de l'espace du 1A. Au dessus de cette structure viendraient se fixer 66 coques composées d'une couche de polyester armé de fibres de verre. Par stratification sous vide, ces coques seront fabriquées à partir de 3 moules convexes (en relief ou moule mâle), et chaque moule servira à produire 16 fois et de façon strictement identique les mêmes coques.



Axonomie
du séquençage de
la coque de
l'écrin - mars 2018

Mise en oeuvre et composition

La stratification sous vide, par dépression ou « au sac » est un procédé de mise en forme par moulage de pièces en matériaux composites. Elle consiste à imprégner de résine, au pinceau ou à la raclette, les tissus qui constituent les « peaux » (ou stratifiés) sur un moule. Après mise sous vide de l'ensemble et polymérisation, on obtient un complexe dit « composite » alliant les qualités mécaniques des fibres mises en œuvres, et celle du type de la résine utilisée.

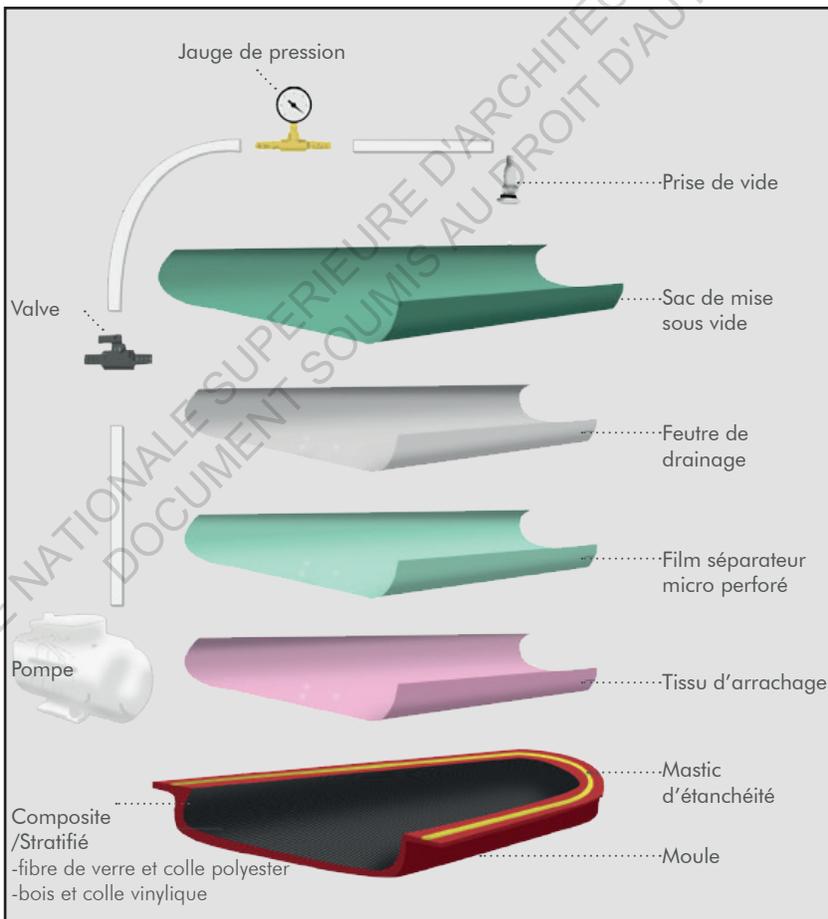


Schéma du processus de stratification sous vide

Le mode opératoire de la stratification sous vide est le même que le moulage au contact (pose des tissus et de la résine sur le moule sans compactage) sauf qu'il s'opère à l'aide de consommables drainants, d'une bâche étanche, de joints, de tuyaux et d'une pompe à vide pour atteindre une dépression moyenne d'environ $-0,2$ bars. Cette technique de mise en œuvre permet un excellent compactage des stratifiés, une meilleure cohésion du stratifié et une absence totale de bulles d'air. Ainsi, on obtient des éléments de coque de meilleure qualité qu'avec le moulage au contact et le taux de fibre est supérieur car l'excès de résine est aspiré par la dépression créée lors de la mise sous vide.

Depuis notre modélisation, nous sculptons et usinons à la CNC les formes de nos 3 moules, soit dans du Styrodur® (panneau de polystyrène extrudé insensible à l'eau utilisé principalement comme isolant thermique), soit dans du MDF (panneau de fibres de bois à densité moyenne). Par la suite nous venons y poser notre « peau », ici constituée de tissus de fibres de verre, puis une résine, ici composée d'une colle polyester (matériau synthétique bicomposant thermodurcissable) et nous réitérons l'opération plusieurs fois jusqu'à obtenir l'épaisseur de coque voulue.

Après plusieurs heures (à déterminer en fonction de l'épaisseur des coques) de mise sous vide dans des sacs en polyéthylène, nous démoulons nos éléments de coque pour ensuite usiner un détourage net et précis à l'aide de la CNC. Après ponçage de l'ensemble, un gel-coat coloré est appliqué sur les coques. Le gel-coat permet de fournir une haute finition et protection de la surface visible ; une surface brillante, coloré et lisse. Le gel-coat est aussi utilisé pour protéger durablement le matériau : résistance aux rayures, bonne tenue aux UV ainsi qu'à la reprise d'humidité.

Après mise en œuvre de nos 48 coques, elles devront être fixées, parfaitement juxtaposées et jointées sur les membrures et les chaînes afin de constituer la carapace finale de *Coraulis*.

3.4 - Ossature bois et polystyrène

« Nous sommes venus épouser cette forme de l'intérieur pour y dessiner une nouvelle ossature, entièrement pensée en contreplaqué », comme expliqué précédemment (Cf. Structure Osseuse), au fur et à mesure des semaines nous avons laissé tomber l'ossature mixte métal-bois, pour préféré une structure en contreplaqué. Généré via l'outil informatique selon le mode opératoire du waffle et dont toutes les pièces constituant l'ossature seraient usinées et découpées à l'aide d'une machine à commande numérique 5 axes (CNC).

Ce changement n'engendre aucune modification de la carapace de l'écrin, les 4 sections de coques seraient toujours réalisées en une seule couche de polyester armé de fibres de verre, non autoportante, et viendraient se fixer de la même manière que sur l'ancienne ossature pour ensuite être jointées par un liant silicone.

Cependant, de nouvelles possibilités de mise en œuvre commencent à voir le jour. Premièrement, nous pensons à de la toile tendue, notre nouvelle ossature bois s'apparentant à la structure d'un ballon dirigeable, l'ossature viendrait dessiner la forme exacte de l'objet et servir ainsi de support au revêtement extérieur. Mais l'idée d'utiliser de la toile en revêtement est rapidement abandonnée, la toile n'étant pas rigide, elle viendrait marquer chaque arrête saillante des membrures et chaînages de l'ossature.

L'igloo

À côté de ça, nous entamons des recherches sur un autre type de mise en œuvre. Pour réaliser des économies de matière, nous pensons à une ossature mixte contreplaqué/polystyrène.

La partie supérieure de notre ossature en contreplaqué, celle qui vient dessiner le tore, depuis le dessus de l'espace d'assise jusqu'au plafond de l'espace du 1A, ne porte que son poids propre. Cette partie qui représente une majeure partie de notre carapace pourrait être indépendante et autoportante ; réalisée en polystyrène, elle ne nécessiterait aucune structure complexe supplémentaire pour tenir. En effet, cette partie de la coque fonctionnerait comme un dôme structurellement, ou plutôt comme un igloo, un igloo où la glace serait remplacée par des blocs de polystyrène sculptés à la CNC. Ainsi, 66 blocs de polystyrène seraient usinés à la CNC de l'école, puis positionnés in situ au dessus de l'ossature bois et collés à l'aide d'une colle contact « spéciale polystyrène ». Ces blocs de polystyrènes (en

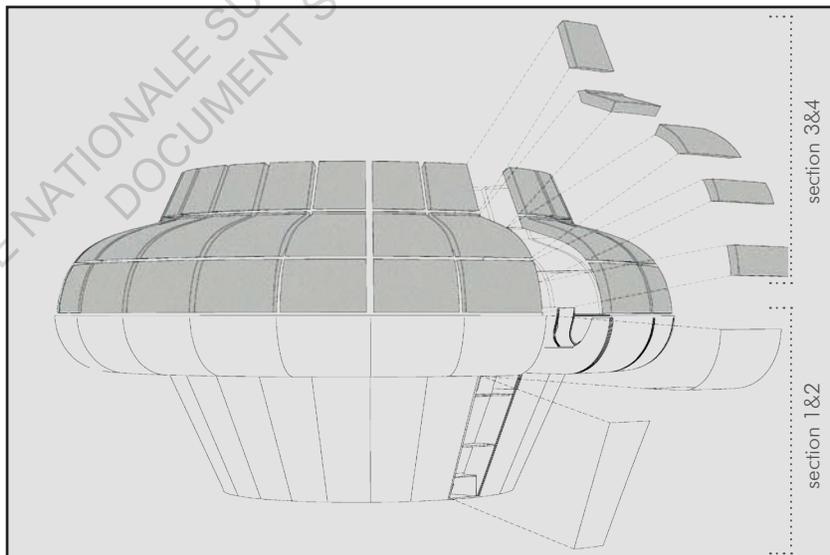
plus de servir d'isolant) dessineraient alors la forme exacte de notre tore, ils serviraient de support à un revêtement souple qui viendrait s'apposer, se coller ou se fixer dessus. L'écrin de *Coraulis* serait divisé en 3 parties distinctes dans leurs méthodes de réalisation.

-Section 1 & 2-

Les deux premières sections restent inchangées. La partie basse de notre écrin est toujours poli-miroir et sera réalisée de la même manière qu'expliqué précédemment. La deuxième section se compose toujours de coques en polyester renforcé, fixées sur une ossature de contreplaqué.

-Section 3 & 4-

La troisième et la quatrième section deviendraient notre igloo. Le polystyrène sculpté nous offrirait une surface continue et homogène pour la pose d'un revêtement répondant à nos désirs esthétiques.



Le «total covering»

Pour le revêtement, nous pensons à la pose d'un film adhésif thermoformable par dessus notre igloo. Cette technique se nomme « le total covering » ou « stickage », c'est une spécialité de préparation automobile visant à appliquer un film de décoration ou de protection sur l'ensemble du véhicule, notamment sur l'ensemble de la carrosserie et des vitrages. Cette technique est aussi utilisée dans le monde de la course nautique, mais aussi dans le monde professionnel lors de campagnes marketing événementielles ou lors de communication permanente afin de diffuser une publicité ou un message (bus et tramway, camion, moto etc.).

Le gros avantage de cette technique est que la personnalisation est sans limite, que ce soit reprendre seulement la couleur d'origine d'une carrosserie de voiture ou au contraire personnaliser un bateau par une ou plusieurs couleurs ou inscriptions. Le rendu est parfait et masque toutes les rayures accumulées au fil du temps. Il en existe de toutes les couleurs, effet brillant, mat, nacré, pailleté ; mais aussi des effets argent, poli-miroir, carbone, or et des centaines d'autres.



Photo de «total covering» - pose d'un film thermoformable sur une coque de bateau

Nous prenons alors contact avec l'entreprise Atelier sur mer, entreprise bretonne spécialisée dans le « stickage » nautique et automobile.

Nous allons à leur rencontre à Carnac pour leur présenter en détail le projet. Le premier point soulevé est l'état de surface du polystyrène. L'adhésif thermoformable ne peut être posé seulement sur une surface lisse et non grasse, hors le polystyrène est poreux. Comme pour le « total covering » d'un bateau, l'entreprise nous conseille de faire appel à un atelier spécialisé dans la rénovation de coque de bateau. En effet, ces artisans viendraient faire une préparation de la surface pour un « stickage » à l'aide de la pose d'un gel-coat translucide. Une tâche qui pourrait finalement être réalisée en interne à l'école. En dehors de cet état de surface à préparer, ce travail est tout à fait réalisable par leur entreprise ; il consisterait en la pose d'un stickage de 206 mètres carrés par bande horizontale de 15 mètres par 1 mètre, travail nécessitant 2 personnes, 8 heures par jour, pendant 5 jours (devis en annexe, page 168).

Socotec - réglementation incendie

Nous validons alors cette idée, et la présentons à Laurent Lavaud, ingénieur conseil de l'entreprise Socotec, lors de la première réunion du 19 avril. Nous lui présentons aussi toutes les autres solutions de mise en oeuvre envisagées.

Voici un extrait du compte rendu de la réunion :

« L'école d'architecture étant un établissement ERP de seconde catégorie (de 700 à 1500 personnes), *Coraulis* prend place à l'intérieur du bâtiment en tant que mobilier habité.

Sa stabilité au feu doit être de 30min.

Le complexe comprenant l'isolation doit être classé M0. Sur la paroi intérieure de *Coraulis*, si l'isolant est classé M0, il ne doit pas être obligatoirement recouvert de placo-plâtre ou d'un autre revêtement résistant au feu. Au niveau de la passerelle supérieure, l'isolant pourrait ainsi être recouvert d'un tissu acoustique noir classé M3 et de liteau de bois d'une épaisseur minimum de 18mm.

Interrogatif de la façade extérieure de l'Absence, nous échangeons au sujet de sa composition, il nous est rappelé qu'une distance minimum de 8 mètre sépare l'Absence de l'école et que les fumées

toxiques de chlore et d'azote peuvent ainsi se dissiper dans l'air. Dans notre cas, *Coraulis* est en intérieur (sur le plateau 1A), sa façade (coque orange et poli-miroir) doit être aussi résistante au feu et surtout ne dégagée aucune fumée ou vapeur toxique, le désenfumage depuis les façades de polycarbonate ne suffit pas à dégager toutes les émanations. Nous ne pouvons donc pas utiliser le type de revêtement utilisé pour l'Absence (coque de polyester armé de fibre de verre).

De plus, utilisant peut-être une mousse (type polystyrène), non classé M0, usinée à la CNC pour donner cette forme si particulière à l'écrin, nous devons la recouvrir d'une protection classé M0 (plâtre, aluminium etc.). Par la suite, l'aspect esthétique souhaitée peut être un matériau classé M3 (*Coraulis* étant considéré comme un gros mobilier au sein de l'Ensa) pour lui donner l'aspect esthétique souhaité tel que du stickage ou de la peinture. »

	Combustibilité	Inflammabilité	Exemples
M0	Incombustible	Ininflammable	Pierre, Plâtre, Béton
M1	Combustible	Ininflammable	Matériaux composites, PVC
M2	Combustible	Difficilement inflammable	Moquette murale
M3	Combustible	Moyennement inflammable	Bois
M4	Combustible	Facilement inflammable	Papier

Tableau
du classement de réaction et
de résistance au feu français

Ainsi, toutes nos hypothèses pour la réalisation de la coque ne conviennent pas. La carapace réalisée par stratification sous vide en polyester armé de fibres de verre est impossible, les émanations de gaz en cas d'incendie sont beaucoup trop toxiques ; l'igloo en polystyrène aussi. De plus, en cas d'incendie, le polystyrène fond et serait vraiment dangereux pour les utilisateurs à l'intérieur du dispositif. Par ailleurs, l'utilisation du stickage est toujours possible, étant classé M3, s'il est apposé sur une surface classé M0, nous avons alors le droit.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR



3.5 - Départ à zéro

Après abandon des anciennes hypothèses de mise en œuvre, nous repartons de zéro. L'ossature complète en contreplaqué est bien sûr toujours d'actualité. Alors nous réfléchissons à une méthode de réalisation peut être plus artisanale.

Artisan Staffeur

Laurent Lavaud nous parlait beaucoup de l'utilisation du plâtre qui est classé MO et conviendrait parfaitement à notre cas pratique, alors nous pensons au travail d'un artisan staffeur. Le terme staffeur regroupe plusieurs métiers distincts, mais ayant tous en commun le fait d'employer le plâtre et la filasse (liant végétal). Le plus répandu est celui qui consiste à créer des objets de décoration d'intérieur ou d'extérieur comme les rosaces, les coupoles (Val d'Europe), les plafonds à caissons (Musée d'Orsay¹) etc.

Un staffeur peut aussi reproduire des objets comme des statues, réaliser des prototypes (il y a un atelier de staff au style Peugeot Vélizy), fabriquer des décors pour les animations télévisuelles. Pour le cinéma, les techniques et procédés du staff ont dû évoluer avec la venue de nouveaux matériaux tels que les résines et les silicones, mais les moulages et sculptures en plâtre sont toujours les plus utilisés pour la réalisation de décor. Nous imaginons alors travailler avec un ou plusieurs staffeurs.

-Section 1-

La première section reste inchangée, la partie basse de notre écrin est toujours poli-miroir et sera réalisé de la même manière qu'expliqué précédemment.

-Section 2, 3 & 4-

La construction de l'ossature en contreplaqué permettrait la pose d'un lattis de bois, depuis le dessous de la passerelle du dispositif, jusqu'au plafond en béton de l'espace du 1A. Ce fin lattis de bois serait clouté sur les arrêtes des membrures et chaînages de l'ossature, en étant assez dense, il servirait de support aux staffeurs pour la dépose et le maintien de leur plâtre et filasse. Ils viendraient sculpter notre écrin à l'aide de guides, de profils (qui seraient découpés à la CNC), pour dessiner la forme exacte de notre carapace.

Après ponçage et affinage, nous nous retrouverions avec une seule et même coque continue, homogène, lisse et classée M0. Cette carapace serait ensuite laquée pour obtenir un effet brillant optimal, et ce travail réalisé par des professionnels sera indispensable pour procéder avec minutie et réussir à ne refléter aucun défaut, ni trace de rouleau, ni poussière. Plus qu'une autre peinture (acrylique ou glycéro en finition mate ou satinée), la laque demande beaucoup de précision du fait de ses propriétés miroir.

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Thermoformage de polymères

Après plusieurs semaines de recherche, nous décidons de laisser de côté l'idée de réaliser la coque par des staffeurs et des peintres. Étant un projet que nous voudrions, si possible, mener en interne à l'école d'architecture, nous aimerions que chaque tâche engagée dans la construction de cet écrin puisse être réalisée par des étudiants. De plus, engager une main d'œuvre experte coûterait beaucoup trop cher, et le budget alloué pour ce projet ne nous le permettrait pas. Alors, nous revenons à l'idée de concevoir des sections de coques de la forme de notre écrin, avec l'aspect extérieur voulu sans avoir besoin de réaliser un trop gros travail de finition. Nous pensons alors réutiliser le système de moule, mais avec une technique de mise en œuvre et un matériau différent qui serait adéquate esthétiquement et bien sûr au minimum classé M3.

Lors de nos recherches au sujet de la *Bulle six coques* de Jean Benjamin Manéval, un article que nous avons lu parlait de la fabrication de nouvelles baies pour les propriétaires désirant les changer :

« L'Association Piacé-le-Radieux, Bézard-Le Corbusier met en production la réalisation de baies neuves pour nos Bulles six coques. Celles-ci sont réalisées à l'exact des baies modèles sauf une largeur un peu excédentaire du rebord pour permettre un meilleur ajustement et une recoupe possible. Le matériau de la baie sera du PMMA coulé Altuglas ShieldUp incolore 6 mm, ce qui est un excellent matériau en terme de transparence et de solidité.

Ces baies se posent ensuite sur la coque avec le fameux joint en caoutchouc à clé double gorge. Nous pourrions également bientôt vous fournir ce joint en caoutchouc ainsi que le joint en T de liaison des coques. Attention ! Nous ne lancerons la nouvelle production de ces baies que pour un minimum de 8 baies. Il faut donc réunir une commande globale de ce nombre et collectiviser au maximum les commandes. Il est donc nécessaire que chacune des personnes intéressées puisse aussi jouer le rôle d'agent de liaison et mutualiser le plus possible cette bonne nouvelle ! »¹

1 - Chantier bulle six coques - fabrication de baies et commandes, Piacé le Radieux ; Non daté

Photo
du thermoformage de baies
pour la Bulle Six Coques
©Pracé le Radfeux



Ces baies neuves sont alors fabriquées en PMMA coulé incolore, ces plaques planes de 6mm d'épaisseur sont thermoformées entre deux moules (un mâle et un femelle). Alors pourquoi ne pas faire la même chose pour l'écrin, mais au lieu de prendre du PMMA translucide, on en prendrait du coloré ?

Nous commençons alors à nous renseigner sur le thermoformage. Le thermoformage est un procédé de fabrication largement utilisé dans la mise en œuvre des thermoplastiques pour réaliser des pièces identiques en grande quantité. On fabrique ainsi de nombreux emballages alimentaires ou des intérieurs de réfrigérateurs par exemple. Les dimensions des pièces thermoformées peuvent donc varier de quelques centimètres à plus d'un mètre. Cette technique qui paraît assez simple, consiste à transformer une plaque de matière par déformation sur une forme et une contre-forme par élévation de température, ou par déformation sur une contre-forme par élévation de température et mise sous vide.

L'intérêt du procédé réside dans la possibilité d'usiner et de sculpter des moules en MDF à l'aide de la CNC de l'école, et surtout que le thermoformage ne nécessite aucune manipulation de matériaux liquides et toxiques, comme pour les coques en polyester. Le chantier serait propre et sec. Notre souci principal est la taille de nos coques à thermoformer, environ 1x1,5 mètre, et par conséquent le coût élevé d'une machine permettant ce procédé de réalisation pour de

grandes dimensions. En effet, l'atelier de l'école possède une machine de ce type, mais pour des plaques de 30x40 centimètres maximum, et cette thermoformeuse avait déjà coûté très cher. Accompagnés de nos encadrants, nous essayons de trouver une solution alternative à l'achat d'une nouvelle machine pour la réalisation de l'écrin, nous pensons à faire chauffer nos plaques de PMMA dans les fours du restaurant universitaire, puis d'utiliser le système d'aspiration de la CNC pour la mise sous vide. Nous cherchons ensuite à acheter un four de boulanger, afin d'essayer de construire une machine nous-même en détournant le système d'aspiration de l'atelier. Bref, plusieurs solutions déconstruite et peu efficiente. Un jeudi après-midi, nous discutons de notre souci de machine à Freddy Bernard, designer et fondateur de l'entreprise Métalobil ; il nous annonce qu'il possède une thermoformeuse industrielle dans son atelier et que nous pouvons y thermoformer des plastiques allant jusqu'à 2x3mètre. À la suite de cette discussion, nous apprenons aussi que le PMMA coulé est classé M4 et non M3 et qu'il faudrait utiliser un autre matériaux thermoformable. Il nous propose alors d'utiliser du Polycarbonate translucide, et de le peindre sur sa face interne pour obtenir l'aspect esthétique voulu (le polycarbonate non alvéolaire coloré étant très cher).

Nous nous lançons alors dans la mise en œuvre d'un prototype pour tester notre idée et commandons alors deux plaques de MDF de 3660x1850x35 millimètre pour réaliser le moule à la CNC et une plaque de polycarbonate translucide de 2050x1250x3 millimètre pour réaliser une des 72 coques.

Stratification sous vide de bois

À côté de ça, nous continuons de chercher d'autres alternatives au polycarbonate, son prix étant lui-même élevé, nous ne savons pas si le budget alloué à l'écrin nous le permettrait.

Alors nous pensons à la stratification sous vide de placage de bois (cf. page 114). Cela se fait très bien pour la réalisation de planche de skateboard et de longboard (7 à 9 plis de placage de bois d'un millimètre d'épaisseur, contrecollé et compressé sous vide sur un moule). Le souci est que le prix du mètre carré de placage de bois est supérieur à celui du polycarbonate translucide. Alors, nous avons l'idée de trouver du déroulé de bois (moins bonne qualité que du placage), matière brute servant à fabriquer les cagettes ou le contreplaqué. Nous essayons de prendre contact avec toutes les scieries de la région, les entreprises de contreplaqué, les grossistes, les fabricants de cagettes françaises, l'école du bois, Atlanbois etc.

Finalement, c'est une entreprise familiale du Mans : Droin, spécialisée dans la fabrication de contreplaqué de peuplier qui répond positivement à notre requête. Il nous propose de se retrouver au « Carrefour International du Bois » qui se déroule à Nantes le 1^{er} juin (une semaine après notre appel). Nous en profitons alors pour imprimer des dossiers et plaquettes de présentation de *Coraulis* pour trouver de futurs partenaires.

Lors de cette journée, nous récupérons gratuitement de la part de l'entreprise familiale : deux tronc d'arbre de fromager déroulés, un humide et un sec ; largement assez pour faire un prototype convenable de notre coque.

Photo
du déroulage de tronc de fromager
©Droin



Ce jour-là nous rencontrons aussi plusieurs revendeurs et fabricants de contreplaqué avec qui nous faisons des devis (cf. en annexe). Une société spécialisée dans le contreplaqué moulé nous propose même de venir visiter leur usine à côté de Bordeaux pour discuter d'une collaboration possible avec eux. Cette entreprise propose de nombreux standards – demi cylindres, quart de rond, assises de chaises, etc. – à redécouper selon ses besoins. Leur moulage n'est jamais réalisé à partir de contreplaqué standard à plat mais simultanément au collage des plis de placage, avec un moule (comme pour les planches de longboard). Cette entreprise Bordelaise, du nom de Lécuille, réalise aussi des objets uniques, en fonction de leurs clients (architecte et designer). En effet, le contreplaqué moulé ouvre à la création d'une multitude de possibilités de formes en deux dimensions, entre autres dans le mobilier. Les feuilles de placage sont « lacérées » dans le sens du fil, encollées sur un support toilé avant d'être assemblées et moulées. Ainsi fragmentées, elles s'avèrent bien plus déformables, par exemple pour faire de la double courbure. Mais finalement, par faute de temps et d'un moyen de transport, nous ne donnons pas suite à leur proposition.

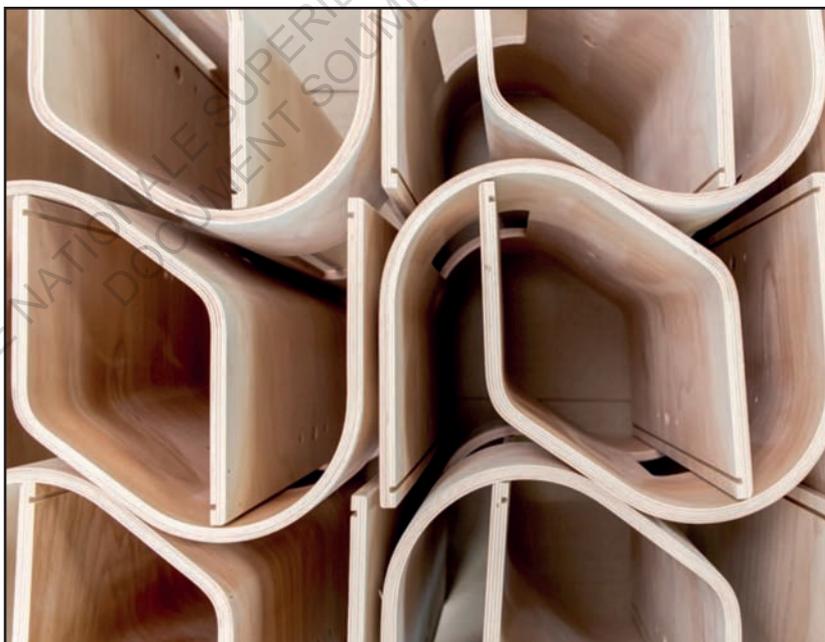
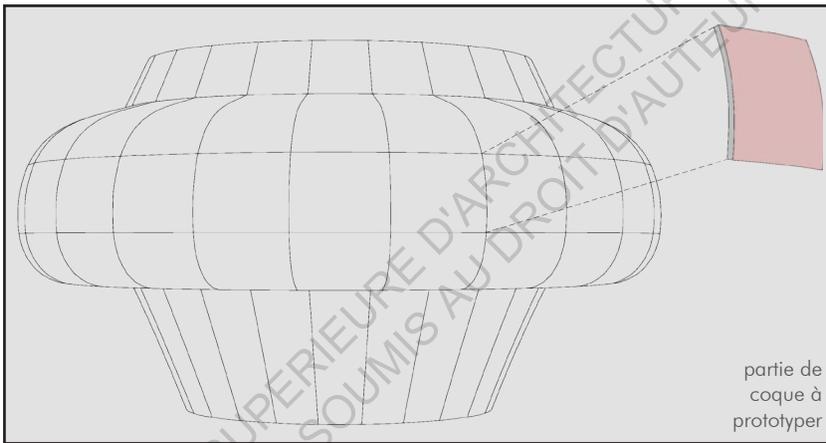


Photo
de bois moulé après finition
©Lécuille

Prototypage

-Fabrication du moule-

Le moule que nous souhaitons réaliser est en double courbure, nous décidons de tester en prototypage une partie de notre coque qui a une flèche maximale de 19 centimètres (ci-dessous en rouge). Brieux Cappelaere, étudiant en master2 à l'école d'architecture nous aide à la réalisation.



De grandes dimensions, 115x150x22cm, l'usinage de ce moule nécessite beaucoup de matière et de temps, or, lors de l'utilisation de la CNC de l'école, chaque économie est importante, que ce soit pour les matériaux, que pour le temps d'utilisation de la machine. Nous modélisons alors le « brut » de notre moule, afin de minimiser la quantité de matière utilisée et le temps d'usinage. Ce « brut » est fabriqué à la main à partir de planches de MDF de 40 millimètres d'épaisseur et sa forme, en escalier, est la plus proche de notre modèle final.

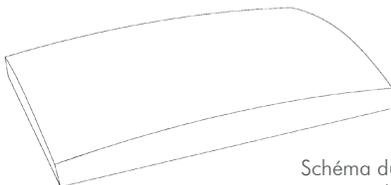


Schéma du moule

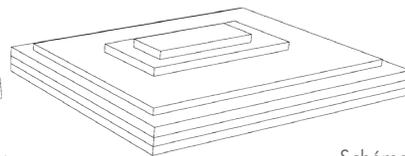


Schéma du brut

L'usinage se déroule en 3 étapes, tout d'abord le « brut » est positionné dans la machine, puis percé. Les perçages servent à indiquer l'emplacement dans lesquels les vis viennent fixer notre « brut » au socle de la CNC pour que celui-ci ne bouge pas pendant l'usinage. La seconde étape (photo ci-dessous à gauche) est le fraisage, à l'aide d'un foret de 18 millimètres, la machine vient dégrossir au maximum notre forme. Commence ensuite la phase de finition (ci-dessous à droite), cette troisième étape consiste à sculpter notre support en bois jusqu'à atteindre la forme exacte du modèle numérique de notre moule, à l'aide d'un foret hémisphérique de 8 millimètres, la machine gratte de la matière de long en large pour affiner les courbes et lisser le moule.

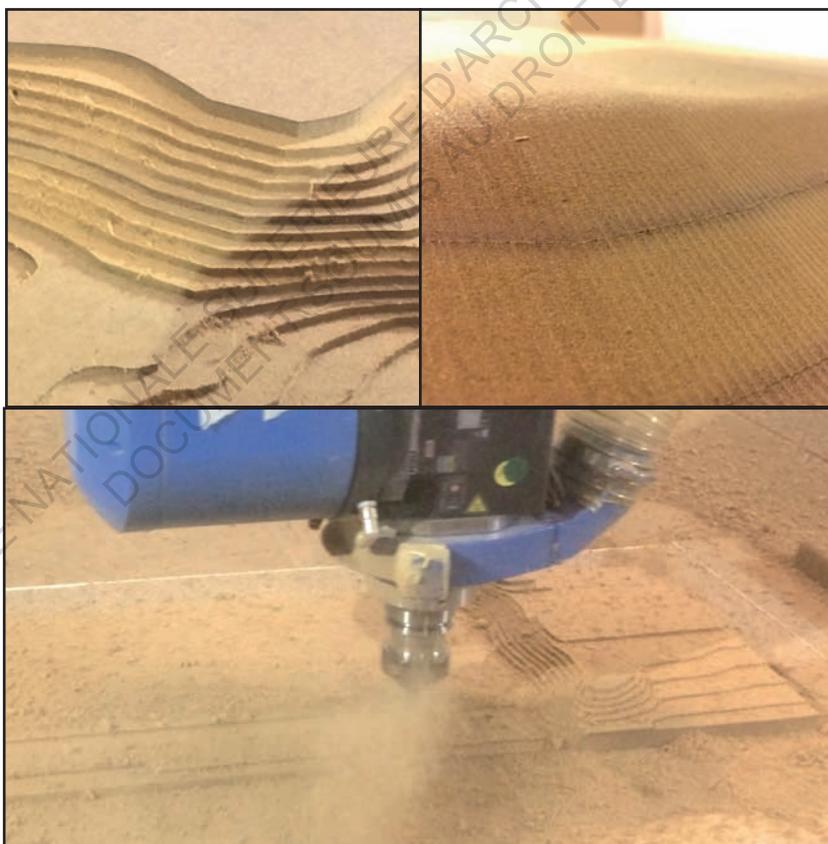


Photo
des différentes étapes
d'usinage à la CNC

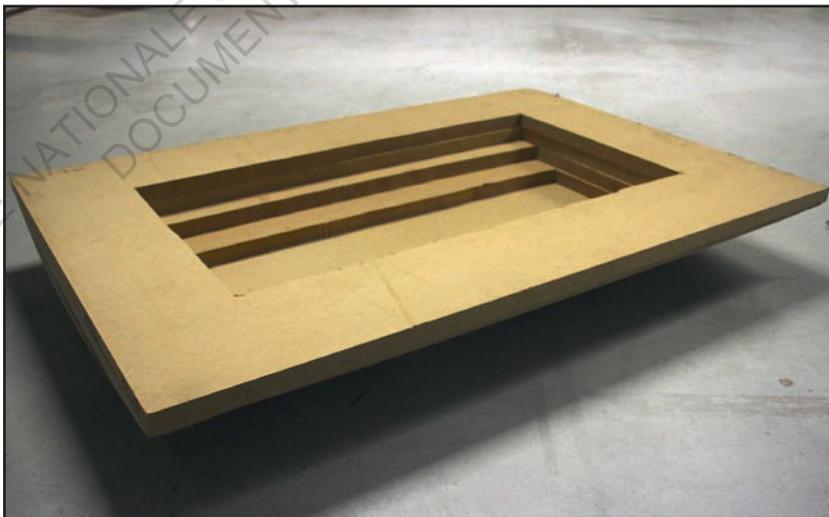


Photo
du moule après ponçage de
l'ensemble au gran fin - juin 2018

-Thermoformage du polycarbonate et contreplaqué moulé-

Par manque de temps, nous n'avons pas pu donner suite à la mise en œuvre du prototype, après usinage du moule, il nous restait seulement une semaine avant la fin du stage et encore beaucoup de tâches à effectuer avant le 28 juin (modélisation complète de la nouvelle ossature, écriture du CCTP (Cahier des Clauses Techniques Particulières), géométraux et pièces graphiques (plans, coupes, élévations), dossier de mise à jour pour les entreprises participants au projet, etc.).

Malgré le fait de ne pas avoir pu le tester en vrai, voici le déroulé des différents processus de mise en œuvre.

Polycarbonate :

Après installation de notre moule dans la thermoformeuse, la plaque de polycarbonate est pincée dans un cadre (serre flan) puis chauffée à 130°C jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment molle. Elle est ensuite plaquée puis déformée sur notre moule par aspiration et ensuite refroidie pendant plusieurs heures. Après retrait de la pièce, une opération de détourage à la CNC est nécessaire afin d'éliminer les zones de fixation et le surplus de matière aux extrémités. Par la suite, nous pouvons peindre la plaque de polycarbonate sur sa face intérieure, afin de protéger la peinture des agressions extérieures et de garder un aspect brillant et lisse sur la face tactile de l'écrin.

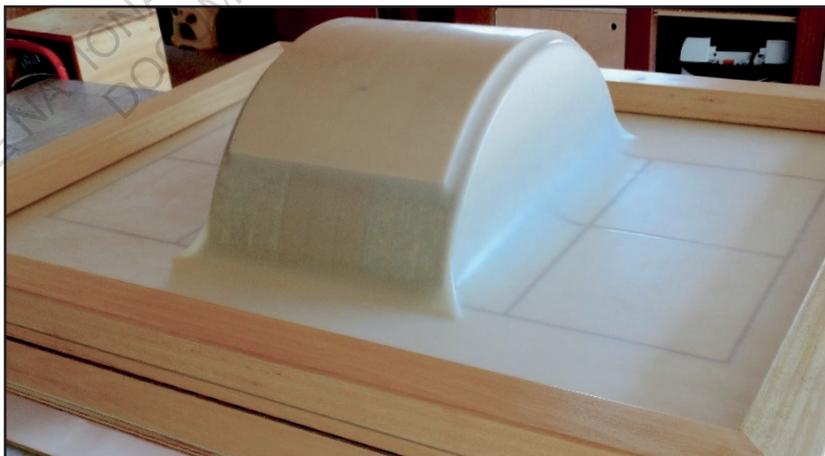


Photo
du thermoformage
d'un demi cylindre

Contreplaqué :

Il existe deux méthodes différentes de moulage : à l'aide d'un moule et d'un contre moule (dans l'entreprise Bordelaise, les moules sont métalliques et chauffants ; artisanalement, les moules peuvent être en bois) ou « à la poche », comme ce que nous voulons faire à l'école, où les placages de bois sont pressés sous vide contre le moule à l'intérieur d'une poche plastique thermosoudée.

Pour commencer, nous découpons des pièces de placage dans le déroulé de fromager offert par l'entreprise du Mans. D'une dimension de 1100x1600x1,3 millimètres, et au nombre de trois, ces plaques de bois vont être enduites de colle vinylique standard (colle à bois blanche) et empilées les unes sur les autres. Elles seront ensuite placées sur le moule au sein de la thermoformeuse. Le support supérieur de la machine (bâche de propylène extensible pincé dans un cadre métallique) sera ensuite plaqué et aspiré contre notre contreplaqué « maison » et notre moule, permettant ainsi le compactage de l'ensemble. Après plusieurs heures de séchage et retrait de la pièce, une opération de détourage à la CNC est nécessaire afin d'éliminer le surplus de matière aux extrémités.

Par la suite, nous pouvons soit : enduire notre coque de bois d'un vernis protecteur pour offrir une surface lisse et homogène pour du stickage ; soit nous pouvons les faire laquer de la couleur souhaitée par des peintres professionnelles.



Photo de stratification sous vide manuelle d'une longboard en placage d'érable

Retour sur expérience

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

En débridant notre audace tout au long des études, nous nous sommes ouverts à de multitudes pensées, majoritairement créatives. Pendant 5 ans, nous nous ouvrons à l'expérimentation, à de nouvelles formes d'expression auxquelles nous ne sommes pas habitués, et rien n'est inaccessible. Un enseignement où l'envie d'exprimer sa sensibilité prime. Le cursus de l'école d'architecture de Nantes nous invite continuellement à essayer, tester, comprendre, esquisser, vérifier, expliquer et expérimenter. En première année de licence, nous travaillons majoritairement à la main, afin de prouver la validité du croquis, l'importance du dessin et de la conception digitale. Puis, au fur et à mesure des semestres de projet, le processus de conception traditionnel tend à se numériser. L'outil informatique nous invite à générer des formes jusqu'alors inaccessibles, la capacité de modélisation d'un nombre presque infini de possibilités virtuelles nous offre un potentiel intéressant de suggestions, d'imagination et de solutions spatiales et constructives.

Cependant, à la fin de nos études, la question de la forme architecturale, résultat d'un processus de conception dont il faut assurer la réalisation, se pose de façon pressante. Une approche de la question morphologique cohérente avec les comportements mécaniques et les moyens techniques de construction semble souvent délaissée dans le contexte du studio de projet. Il semble alors s'introduire un décalage important entre ce qui est virtuellement possible et ce qui est réalisable.

Le pas important de la démarche pédagogique de cette aventure « un écran pour *Coraulis* », était l'exigence d'élaborer une pensée structurale, développée jusque dans les aspects du calcul et du dimensionnement des éléments et éliminer les derniers résidus d'abstraction formaliste. Tout en rendant possible l'émergence de ce futur dispositif conforme à des performances au vu du programme technique (exigences acoustiques, isolation, éclairage et règles de sécurité d'un établissement recevant du public) et par l'étude de plusieurs fonctionnalités importantes (accès au dispositif –pompiers, public, PMR-, entretien, maintenance). Tout ceci dans un cadre très spécial et inhabituel que celui de stagiaire dans un laboratoire de recherche.

Cadre du stage

En effet, initialement, le laboratoire du Crenau propose des stages aux étudiants voulant compléter leur cursus au travers d'un travail de recherche. Dans notre cas, il s'apparentait bien plus à un stage en agence.

Un stage en agence bien particulier. Ici, les professeurs prenaient le rôle d'encadrants, l'école d'architecture de Nantes celui de la maîtrise d'ouvrage, Alexandra et moi-même représentions une partie de la maîtrise d'œuvre. Une expérience unique qui nous a permis d'en apprendre énormément tout au long de ces 4 mois, de nous aider à se projeter professionnellement et de se former à une pratique de l'architecture associée à la recherche, la morphogénèse et au processus de conception et de réalisation.

À travers cette expérience, nous avons pu mettre à l'épreuve ce que nous avons initié lors de l'intensif du projet court et expérimenter, ouvrir davantage de réflexion sur le rapport entre recherche et conception. Notre rôle, en tant que concepteur, nous a permis d'interroger et de bousculer le programme défini à l'aide de multiples interactions, mais aussi d'entreprendre les choses avec initiative, d'avoir un réel avis et un pouvoir décisionnel ; ce qui nous était jusqu'alors inconnu dans le cadre d'une expérience étudiante dans le monde professionnel.

Communication et apprentissage

Durant toute cette phase de conception, la maîtrise de la communication avec les intervenants et encadrants était essentielle. Que cela soit en terme de plannings prévisionnels, de réunions ou de documents fournis, la qualité de ce dialogue est révélatrice d'une compréhension d'un projet et d'une réponse construite.

Par ailleurs, ce qui se lit transversalement à travers ce mémoire, c'est aussi l'apprentissage et l'expérimentation, aux côtés de Francis Miguët, Michel Bertreux, Bruno Suner, Laurent Lescop, Laurent Lavaud, Lutz Schone, Isabelle Bettschart et d'autres. Nous offrant une expérience en collaboration avec des enseignants chercheurs, des enseignants issus du monde professionnel et des professionnels. C'est au cours de ce stage que j'ai pu remarquer tous les liens entre les différents acteurs d'un projet et que j'ai été agréablement surpris par la relation constante que peut avoir les concepteurs d'un projet avec le monde extérieur. En effet, le projet n'est pas le fruit seul

de la pensée d'un concepteur ou architecte, mais le résultat d'une collaboration entre de multiples acteurs. Il était aussi très intéressant d'interroger la place du projet sur un site comme celui de l'ensa Nantes en fonction de la réglementation en vigueur et du respect des normes relatives à la sécurité des personnes dans les ERP. Ainsi, bureau de contrôle, bureau d'ingénierie structure, service des pompiers de la ville de Nantes, responsable immobilier et technique de l'école, direction du Crenau et de l'ensa Nantes, sont mis à contribution. Et les relations au sein de cette équipe ont été fondamentales. Avant même la période de réalisation, ce fil qu'est la communication avec les intervenants et entreprises est déterminant dans le futur construit du projet. Lors de la phase de conception, le lien avec ces personnes extérieures marque là, la première approche de mise en réalité de celui-ci.

Cependant, face à un cadre opérationnel peu habitué à ce type de démarche, cette collaboration fut parfois délicate. J'ai donc pu entrevoir les rouages d'une coopération entre le monde de la recherche et le monde opérationnel, une expérience notamment intellectuellement stimulante et parfois inconfortable. Inconfortable, dans le sens de moments d'incompréhension et de communication difficiles, amenant à des biais subjectifs, qui parfois, ont rendu difficile la conception et l'émergence de compromis idéals.

Ainsi, les différentes expériences liées au projet *Coraulis*, la prise de responsabilités et d'autonomie ont marqué pour moi le début d'un apprentissage et de compréhension dans la gestion d'un projet et dans sa mise en pratique. Aujourd'hui, je suis plus à l'aise avec les mots employés, l'aspect budgétaire d'un projet, l'appréhension et le respect des normes en vigueur, le dialogue avec l'ensemble de l'équipe de maîtrise d'œuvre, l'organisation en interne au cours de la phase de conception et la production de documents techniques (comptes-rendus, dossiers de présentation, pièces graphiques détaillées, CCTP¹ etc.);

Je ne maîtrise pas tout et ce ne sera certainement jamais le cas, mais toute la dimension qui entoure le processus de création d'un projet ne m'effraie plus. Les comprendre me semble essentiel pour les appréhender dans l'essence du projet et ne pas être un frein à celui-ci.

1 - Le cahier des clauses techniques particulières (CCTP) est un document contractuel qui rassemble les clauses techniques d'un marché public

Conclusion

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Nous avons vu dans le déroulement de ce mémoire, la façon dont nous avons abordé cette expérience de la recherche-action au travers d'une vision objective et explicative.

Il y eu une réelle transmission franche d'un savoir d'humain à humains, d'échange entre disciplines, de mise en situation d'inventivité, de tâches spéciales mises en lumière (modélisation, développement structurel concret, choix de matériaux), et d'exploitation ingénieuse des ressources d'un lieu tout au long de ce stage. Le site, le contexte, l'échelle du projet, le programme, les attentes, le type de marché, la maîtrise d'ouvrage, l'équipe de maîtrise d'œuvre, l'enveloppe prévisionnelle, les entreprises et tant d'autres, sont autant d'éléments marqueurs d'une unicité de projet et d'une singularité de la démarche.

Le but de ce travail de conception étant que la fluidité et la transparence véhiculées par les images numériques ne soient pas contredites une fois l'objet réalisé. Cette aventure m'a enseigné que la forme architecturale est nécessairement une forme constructive et cohérente. Dans ce sens, la rencontre d'intervenants extérieurs associée au suivi de nos professeurs encadrants, a permis de construire un pont entre deux mondes qui ont trop souvent tendance à s'ignorer dans les milieux académiques, alors que dans les pratiques de projet les plus avancées, ils sont déjà habitués à dialoguer.

Ainsi, le projet « un écrin pour *Coraulis* » rassemble beaucoup d'ingrédients, qui mis bout à bout, sont signes de progrès. Et j'espère que le travail réalisé tout au long de cette expérience donnera sens, et aura toute son importance lors de la construction future de ce dispositif au cours de l'année 2019 dans le cadre de l'option Solid Thinking.

Bibliographie

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Antidesign : petite histoire de la capsule d'habitation en image / Alexandra Midal- Paris : Epithème, 2003.- [36] p.

Barragán et la couleur / Justine Delhommeau ; Christian Marenne, directeur d'études ; Pascal Joanne, directeur d'études- Nantes : Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, 2007.- 82 p.

Digital fabrications : architectural and materials techniques / Lisa Iwamoto- New-York : Princeton architectural press, 2009.- 144 p.

From control to design : parametric / algorithmic architecture / edited by Tomoko Sakamoto, Albert Ferré- Barcelone : Actar, 2009.- 239 p.

Jean Benjamin Maneval, la bulle six coques / Philippe Bancilhon- Paris : J.-M. Place, 2004.- 56 p.

Jean Prouvé, la poétique de l'objet technique : [exposition, Weil-am-Rhein, Vitra design museum, 22/09/2006-03/2007] : Exposition, 2006, Weil-am-Rhein, Vitra design museum - Weil-am-Rhein : Vitra design museum, 2006.- 384 p.

La maison branchée [PFE] : le numérique à l'épreuve du réel / Hugo Lebrunet ; Michel Bertreux, directeur d'études ; Francis Miguet, directeur d'études- Nantes : Ecole nationale supérieure d'architecture de Nantes, 2018.- 88 p.

L'Arrivée des composites. Revue : Habitat, N° 18, décembre 1996 // in : Habitat - Fontaines-sur-Saône : Homme et habitat, 1996.- 25 p.

Les courbes du temps : Oscar Niemeyer, mémoires / Oscar Niemeyer ; Henri Raillard- Paris : Gallimard, 1999.- 215 p.

L'intelligence de la couleur / Elisabeth Brémond- Paris : Albin Michel, 2002.- 255 p.

Materials for Architectural Design : 2 - Londres : Laurence King editions, 2014.- 272 p.

Materiology : matériaux et technologies : l'essentiel à l'usage des créateurs / Matério, Daniel Kula, Elodie Ternaux ; Quentin Hirsinger- Basel : Birkhäuser, 2009.- 342 p.

Materiology / MaterIO (Mention d'édition : 3ème édition augmentée)- Bâle : Birkhäuser, 2013- 378 p.

Matières plastiques : plastics / Amc, Le Moniteur Architecture- Paris : Le Moniteur, 2010.- 128 p.

Morphologie et conception / Chiara Silvestri, François Fleury et Marine Bagnéris- Montpellier : Editions de l'Espérou, 2010.- 98 p.

New_modeling : projeter ensemble / Yves Weinand - Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2004.- 190 p.

New prefab / Sergi Costa Duran- Barcelone : Loft Publications, 2008.- 191 p.

Niemeyer par lui-même : l'architecte de Brasilia parle à Edouard Bailby- Paris : Balland, 1993.- 224 p.

Oscar Niemeyer : une esthétique de la fluidité. / LUIGI, Gilbert- Marseille : Parenthèses, 1987.- 158 p.

Pour la création d'un organisme de recherche : prototypage, béton fibré, internet / Homme et Habitat. Revue : Habitat, N° 21, 2001 // in : Habitat- Fontaines-sur-Saône : Homme et habitat, 2001.- 26 p

Prefab houses / Arnt Cobbers, Oliver Jahn- Cologne : Taschen, 2010.- 387 p.

Structures architecturales [TPFE] / Wilfrid-Martin Bitariho ; Michel Dudon, directeur d'études- Nantes : Ecole d'architecture de Nantes, 1975.- 88 p.

Médiagraphie

Le monde selon Anish Kapoor / Heinz Peter Schwerfel - Paris : Arte, 2011.- 1 h 12 mn ; DVD

Chantier bulle six coques • fabrication de baies et commandes [en ligne], Piacé le Radieux. Non daté. Disponible sur : <https://www.piaceleradieux.com/page-daccueil/chantier-bulle-six-coques/>

Grasshopper et la programmation sur Rhinoceros 4: une introduction [en ligne], DNArchi. Février 2012. Disponible sur : <http://dnarchi.fr/pedagogies/grasshopper-et-la-programmation-sur-rhinoceros-4-une-introduction/>

Waffle Structures with Grasshopper and Rhinoscript [en ligne], Design Playgrounds. Non daté. Disponible sur : <http://designplaygrounds.com/projects/waffle-structures-rhinoscript/>

Vaisseau spatial [en ligne], Wikipédia. Décembre 2018. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Vaisseau_spatial

Corcuff Marie-Pascale. Penser l'espace et les formes. Thèse. Géographie. Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Bretagne, 2007, 381 p. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/204573/filename/theseCorcuff.pdf>

Almeida Daniel, Sousa José Pedro. Tradition and Innovation in Digital Architecture. Rapport. Architecture. Faculty of architecture of Porto, Non daté. 267-276 p. Disponible sur : http://papers.cumincad.org/data/works/att/ecaade2017_184.pdf

Vial-Kayser Christine. Anish Kapoor vu par Homi Bhabha : une herméneutique « subalterne » [En ligne], 2013, mis en ligne le 15 mars 2014. 23-43 p. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/marges/257>

Robischon Christian. « Architecture : les composites, ces oubliés du bâtiment ». LeMoniteur [en ligne], Design Playgrounds. Mis à jour : 27/11/2017. Disponible sur : <https://www.lemoniteur.fr/article/architecture-les-composites-ces-oublies-du-batiment.1022369>

Morton Ella ; Traduit par Cassely Jean-Laurent. « La maison Futuro, tentative loupée d'habitat extra-terrestre », Slate. Mis à jour le 29 décembre 2014. Disponible sur : <http://www.slate.fr/story/96251/maison-futuro-extraterrestre>

Société nationale des pétroles d'Aquitaine. « Procédé de montage des cellules d'habitation en matériau de synthèse ». Brevet d'invention, 1965, 3 p. Disponible sur : <https://bases-brevets.inpi.fr/fr/document/FR1517686/publications.html?p=5&s=1505818042184&cHash=8665c26bcd8e773b46d47bfd98d1fae>

Maneval Virginie. « Chantiers Dubigeon (Nantes) Prototypes, Brevet – La Bulle Six Coques de Jean Benjamin Maneval ». Bubblemania [en ligne], publié le 19 septembre 2017. Disponible sur : <http://bubblemania.fr/dubigeon-industrialisation-prototypes-coques/>

Pliessnig Matthias. Site de son atelier. Disponible sur : <http://www.matthias-studio.com/48ti0d8ii7jpftakephnerqj9t29ej>

Archimède. « Comment était la vie avant Autocad ? Brève histoire du DAO ». Archigrind [en ligne]. Mis à jour le 8 novembre 2018. Disponible sur : <https://archigrind.fr/la-vie-avant-autocad-histoire-dao-cao/>

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Annexes

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE D'ARCHITECTURE DE NANTES
DOCUMENT SOUMIS AU DROIT D'AUTEUR

Schéma annoté
de l'état d'avancement et des problématiques de Coraulis
à la date du 28 mars 2018 - sans échelle

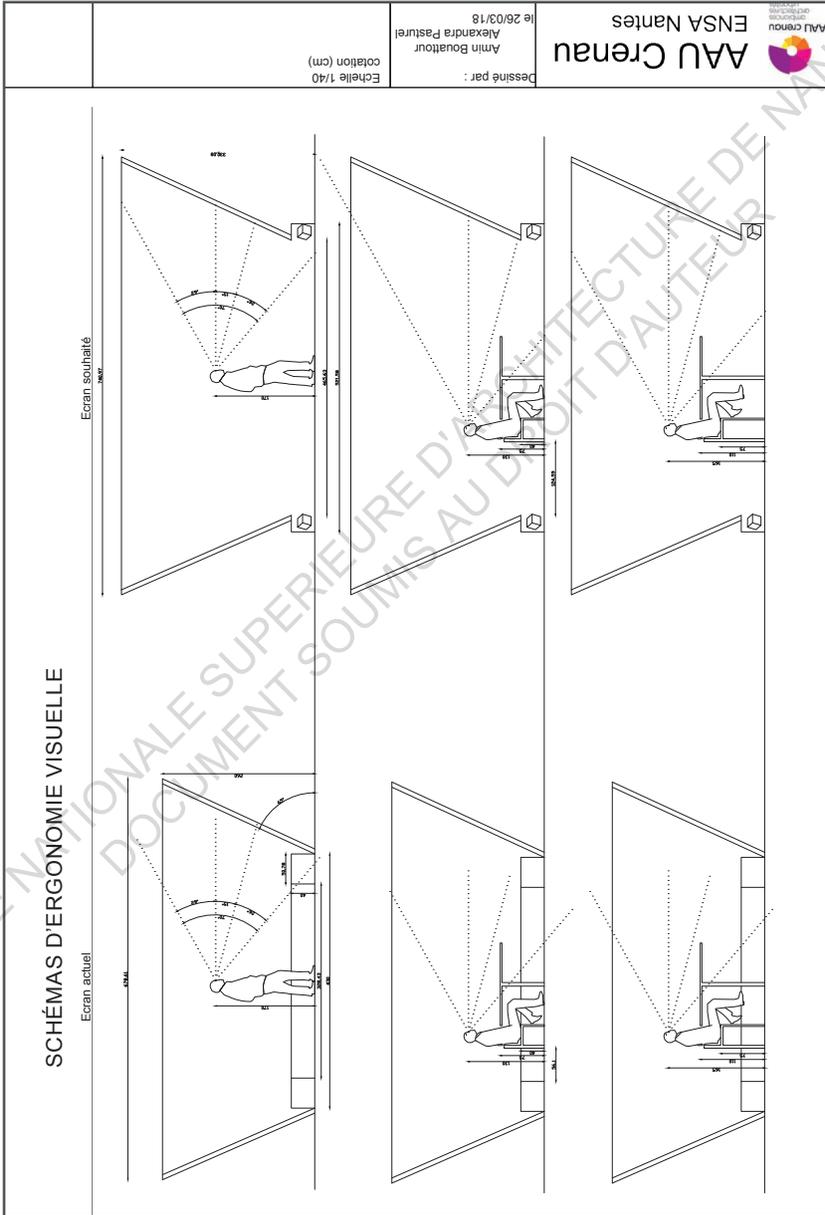
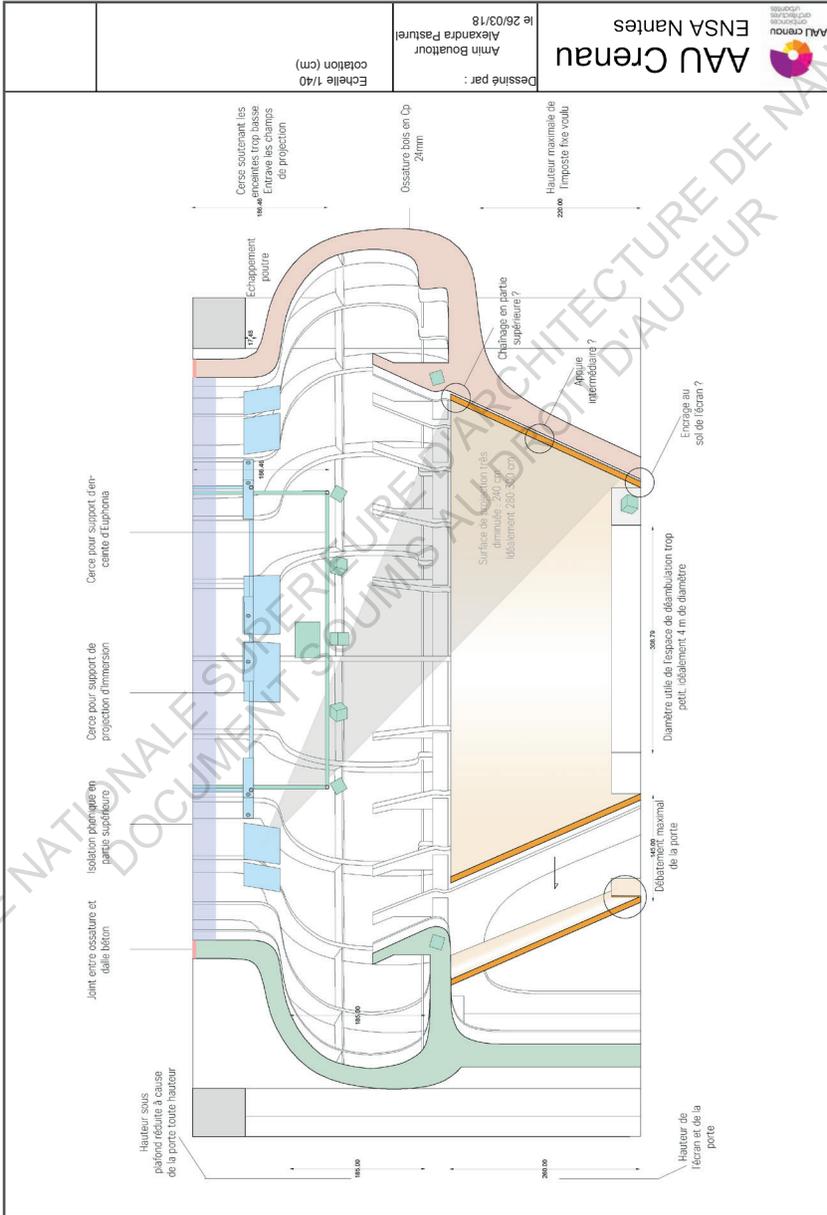


Schéma annoté de l'état d'avancement et des problématiques de Coraulis à la date du 28 mars 2018 - sans échelle



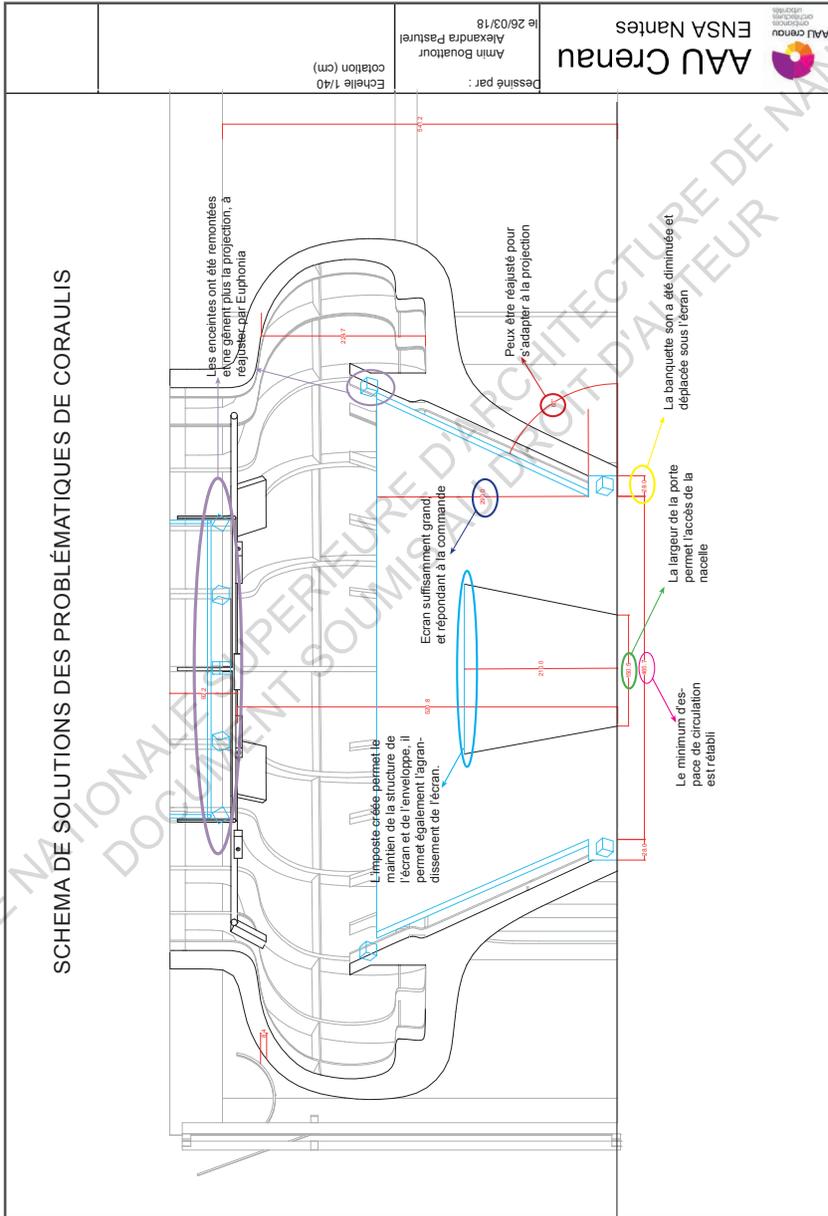
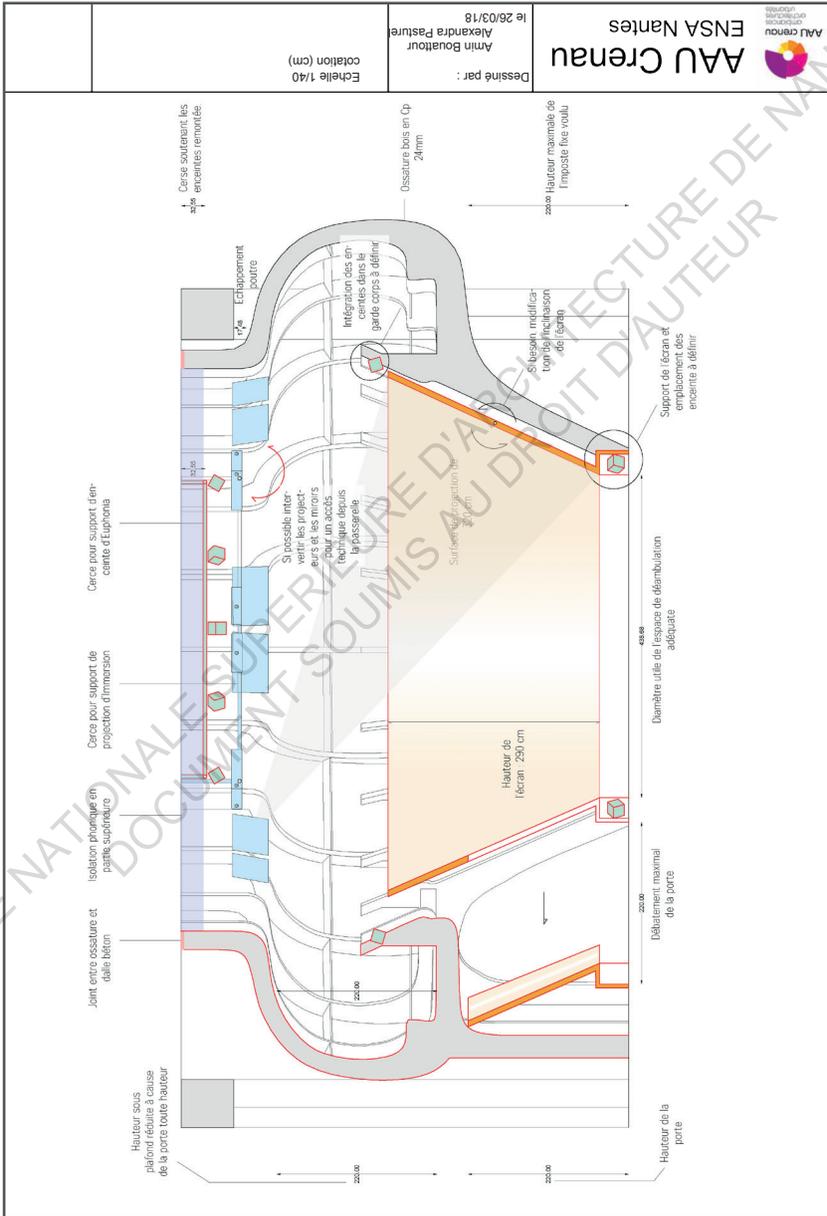


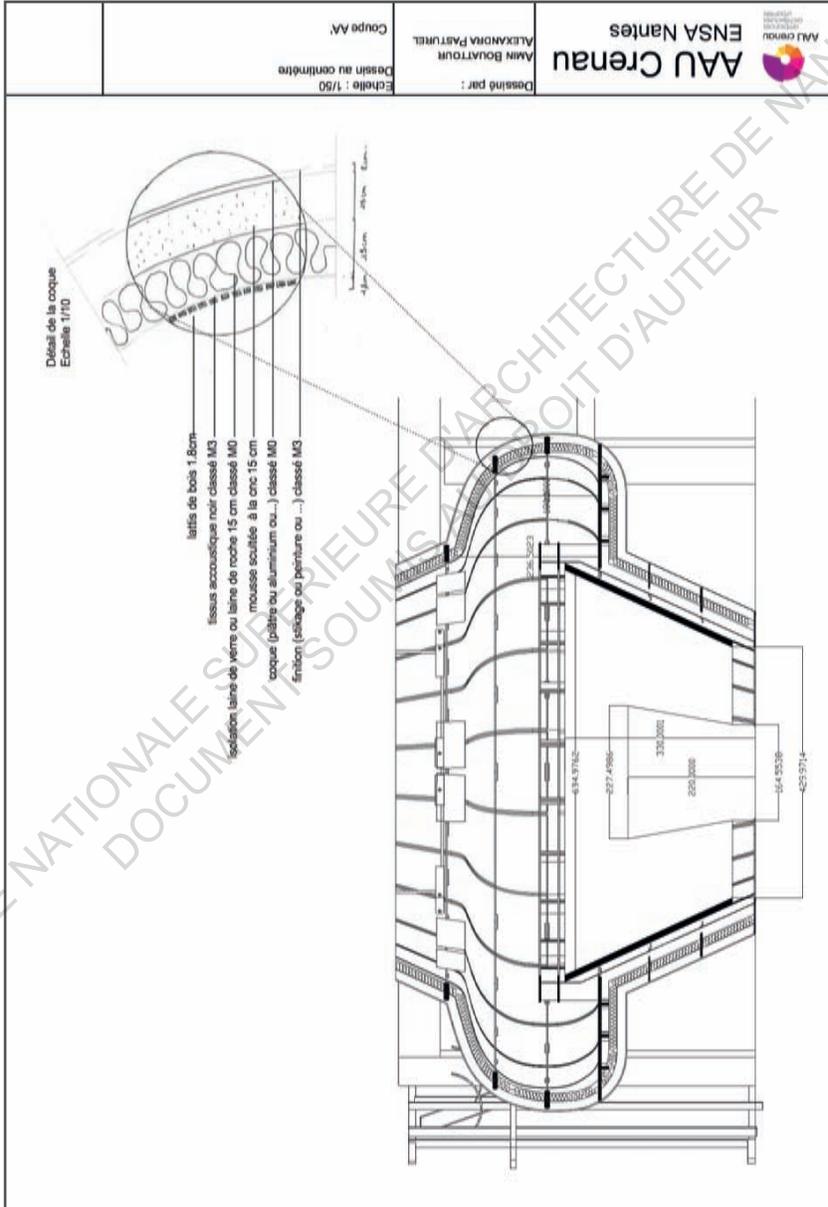
Schéma annoté de l'état d'avancement et des problématiques de Coraulis à la date du 28 mars 2018 - sans échelle

Schéma annoté de l'état d'avancement et des problématiques de Coraulis à la date du 28 mars 2018 - sans échelle



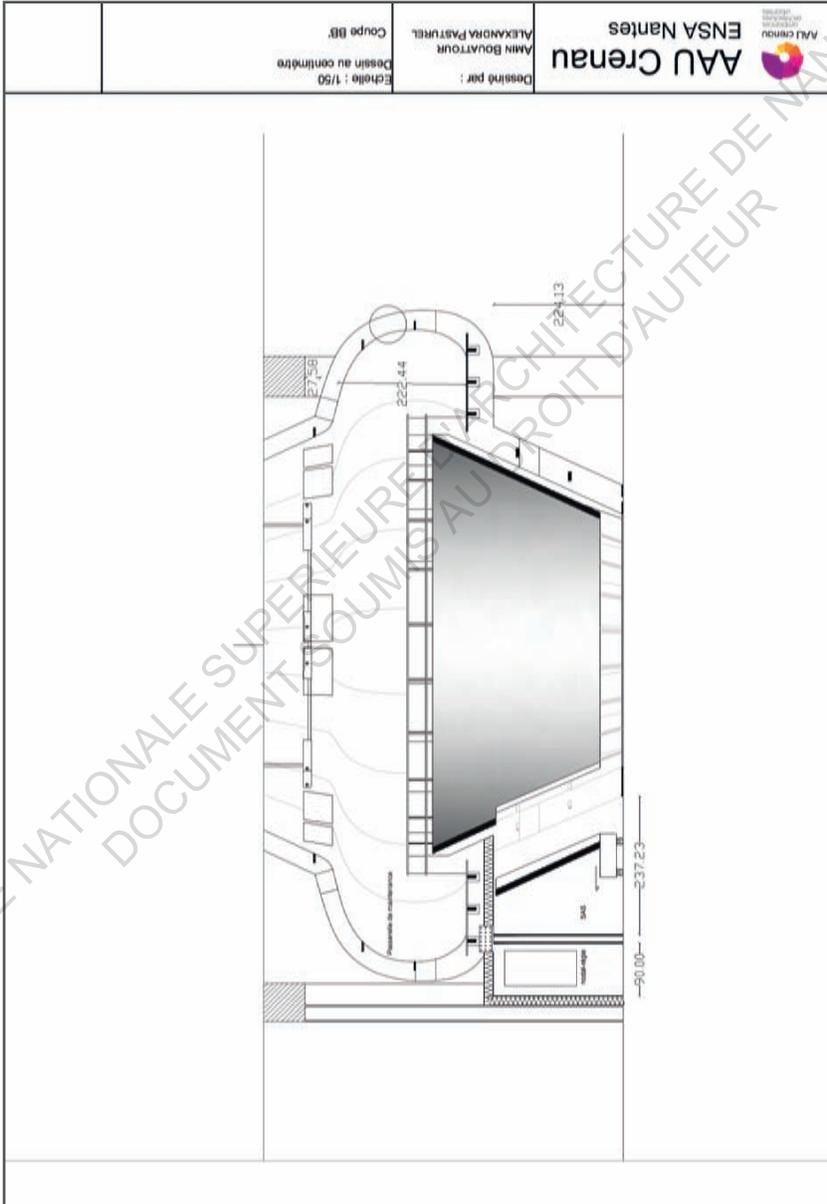
AAU Crenau
 ENSA Nantes
 Dessiné par :
 Amin Bouttour
 le 26/03/18

Echelle 1/40
 cotation (cm)

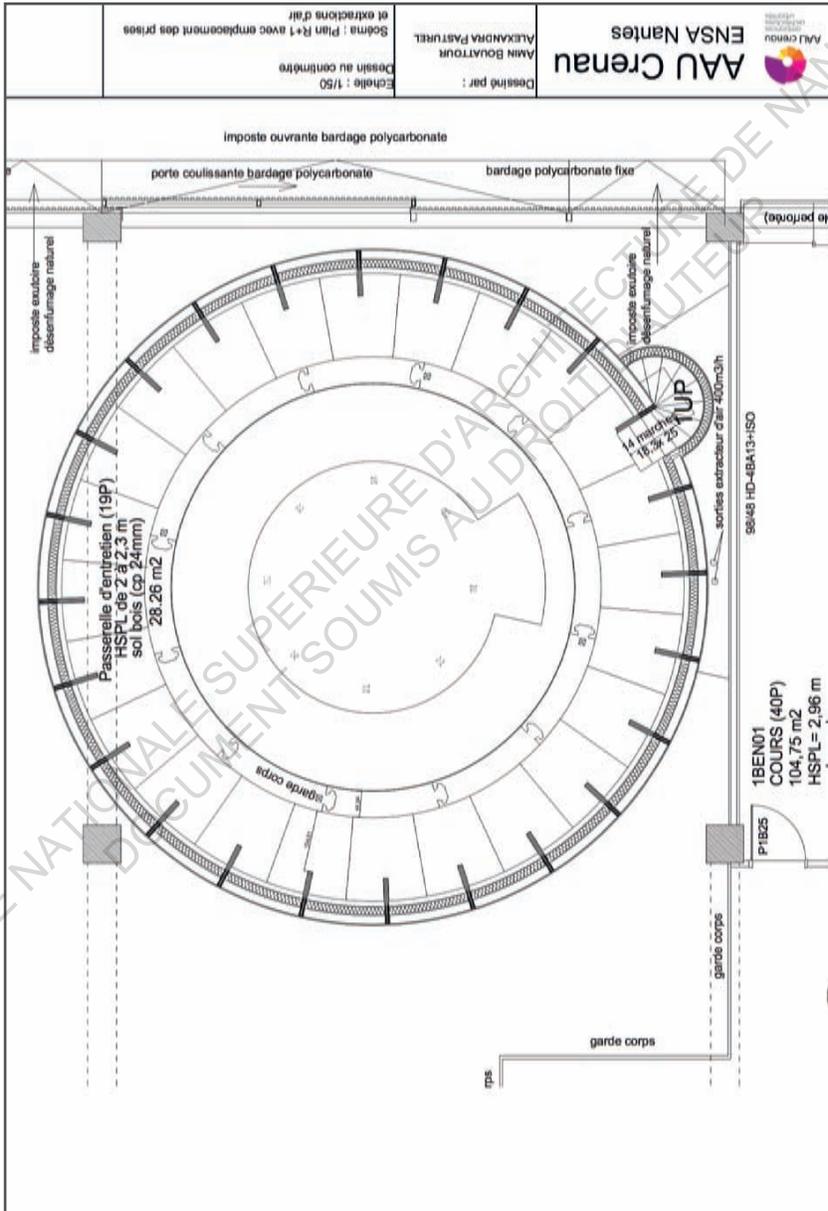


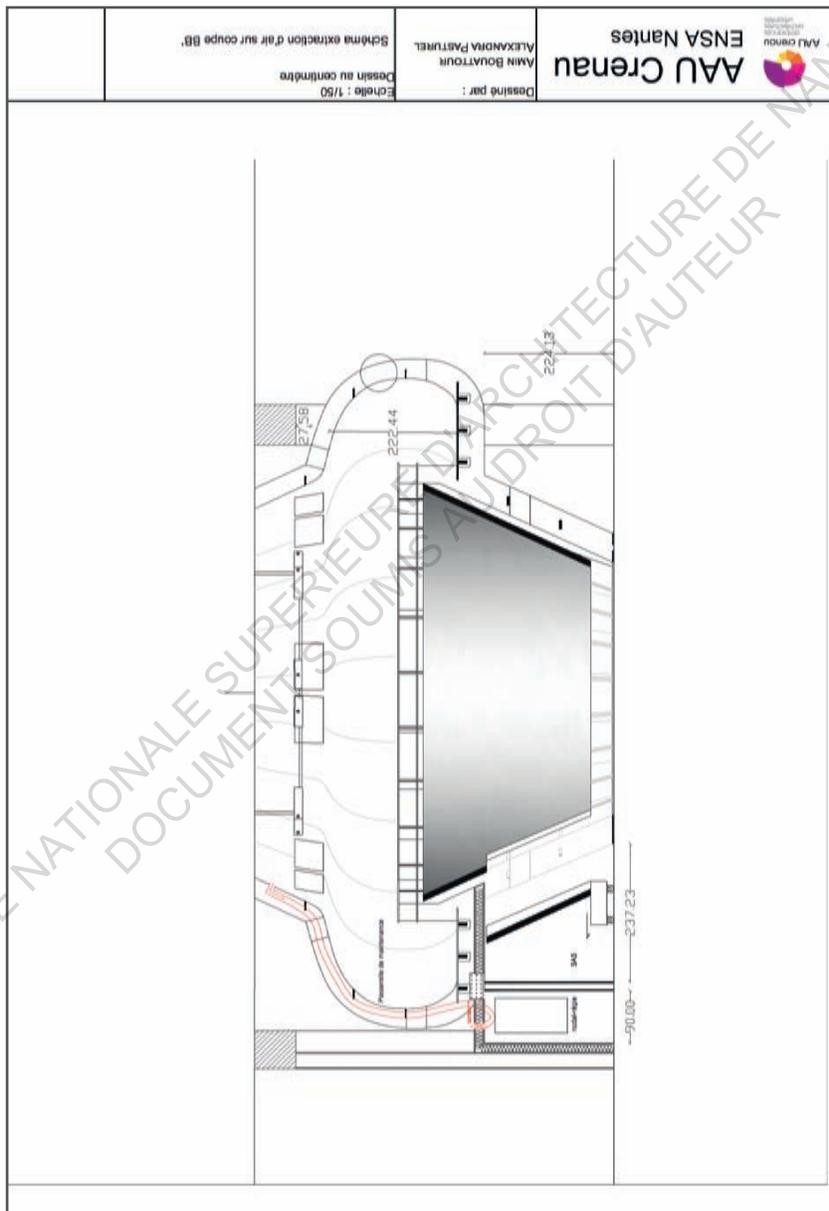
Géométraux
 pour la réunion du 19 avril 2018
 avec Socotec - sans échelle

Géométraux
pour la réunion du 19 avril 2018
avec Socotec - sans échelle

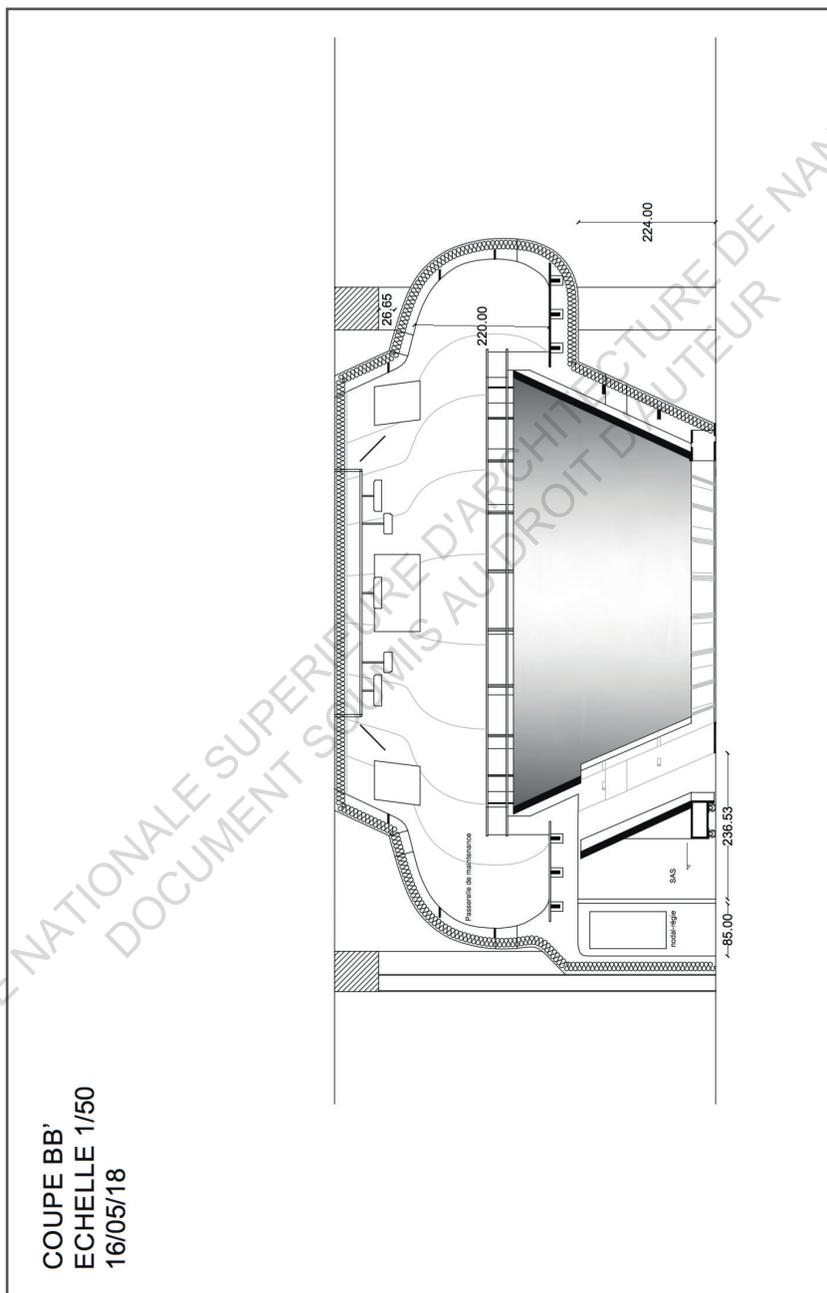


Géométraux
pour la réunion du 19 avril 2018
avec Socotec - sans échelle





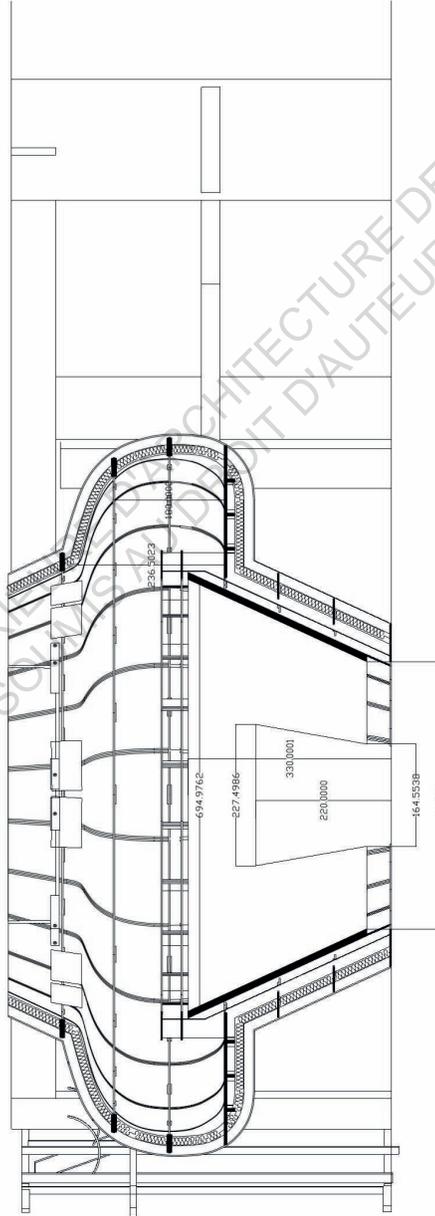
Géométraux
pour la réunion du 19 avril 2018
avec Socotec - sans échelle

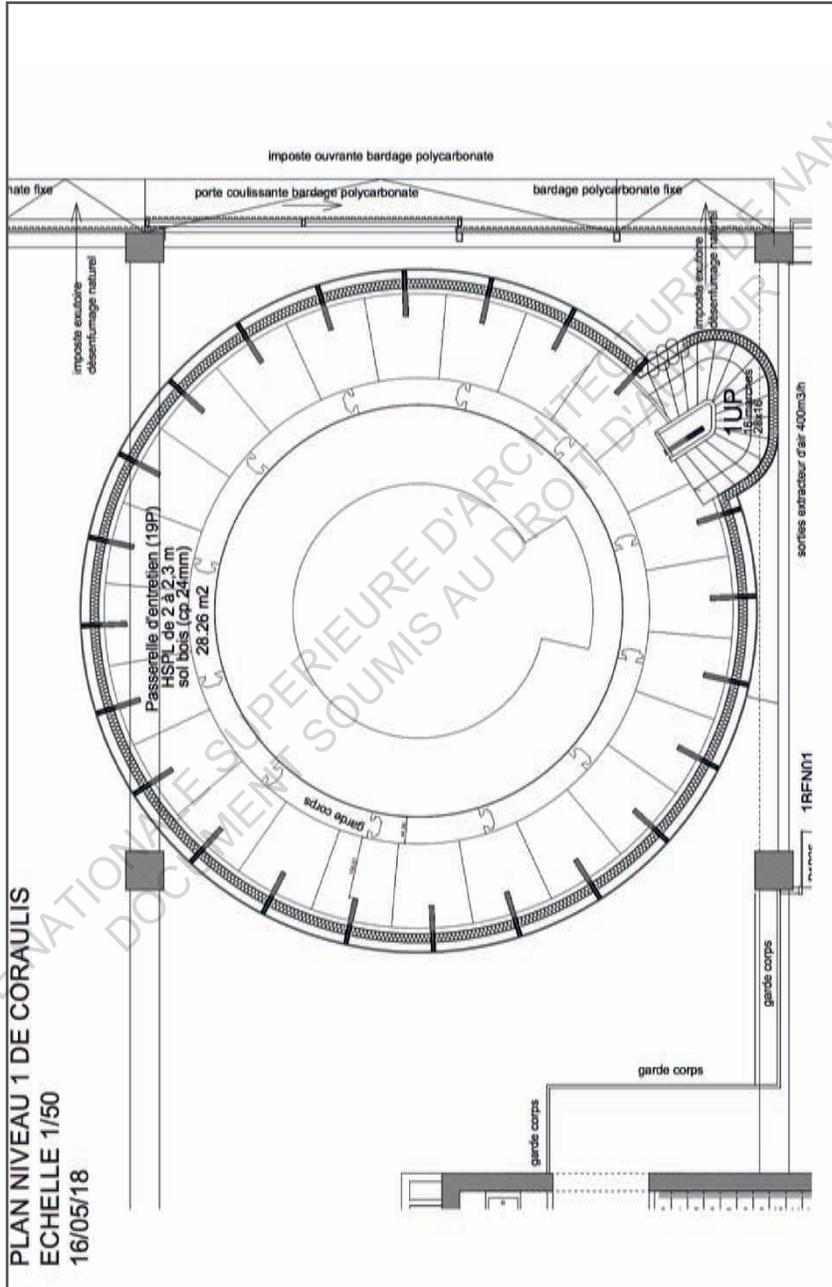


Géométraux
pour la réunion du 16 mai 2018 - sans échelle

Géométraux
pour la réunion du 16 mai 2018 - sans échelle

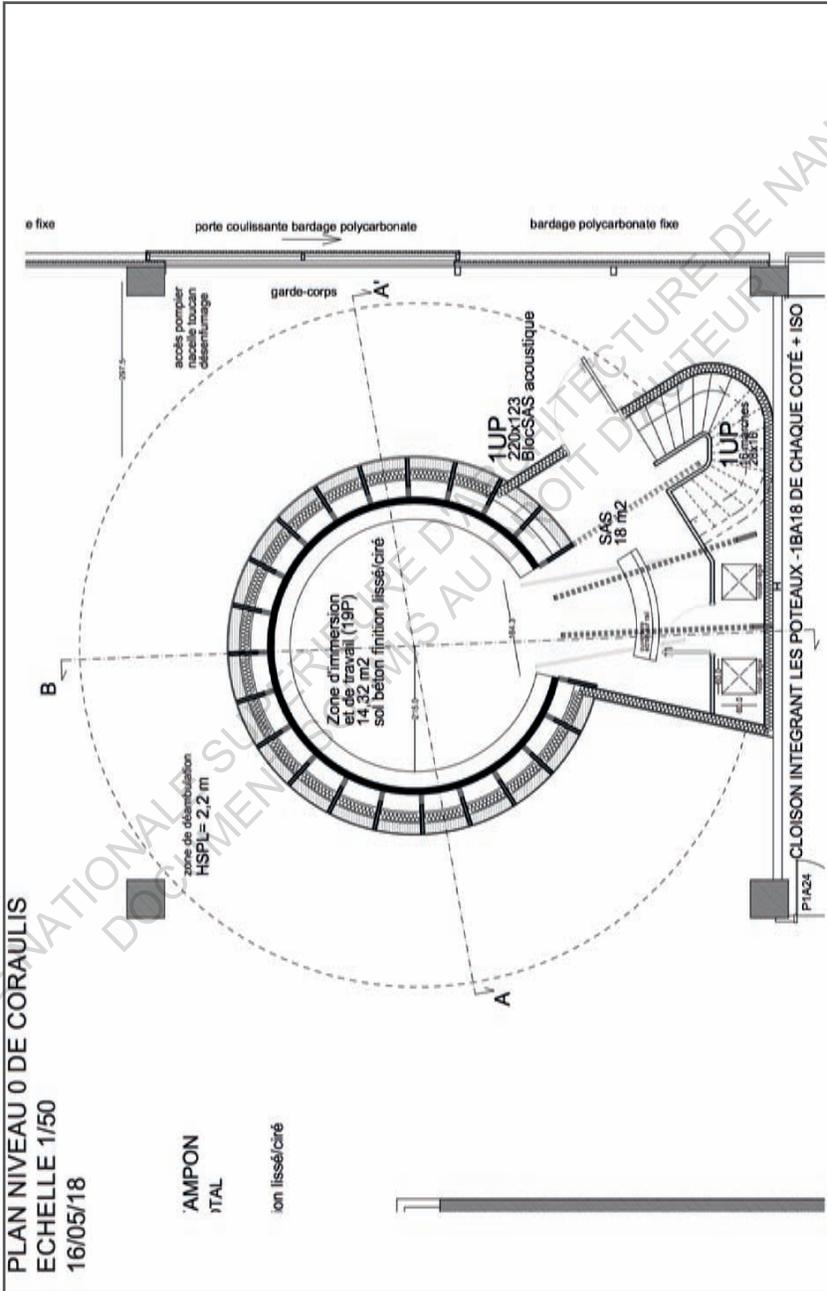
COUPE AA'
ECHELLE 1/50
16/05/18





Géométraux
pour la réunion du 16 mai 2018 - sans échelle

Géométraux
pour la réunion du 16 mai 2018 - sans échelle



DECLARATION DES PERFORMANCES (DOP)

N° DOP : DDP 002 Version 3 du 07/11/2017
 Code d'identification : EN 636-1 S
 Numéro de type : ALLIN PLY TOUT OKOUME
 Usage prévu : Pour une utilisation en structure (plancher, toiture, mur) en intérieur
 Fabricant : SAS ALLIN - Route de la Couarde - 79270 LE VANNEAU
 allin-sa@alin.fr - www.allin.fr
 Système d'évaluation et de vérification des performances : CE 2+
 L'organisme notifié : FCBA 0380
 a réalisé : l'inspection initiale de l'établissement de fabrication et du contrôle de la production en usine ainsi que la surveillance, l'évaluation et l'appréciation permanente du contrôle de la production en usine
 a délivré : le certificat de contrôle de la production en usine : 0380 – CPR – N°211

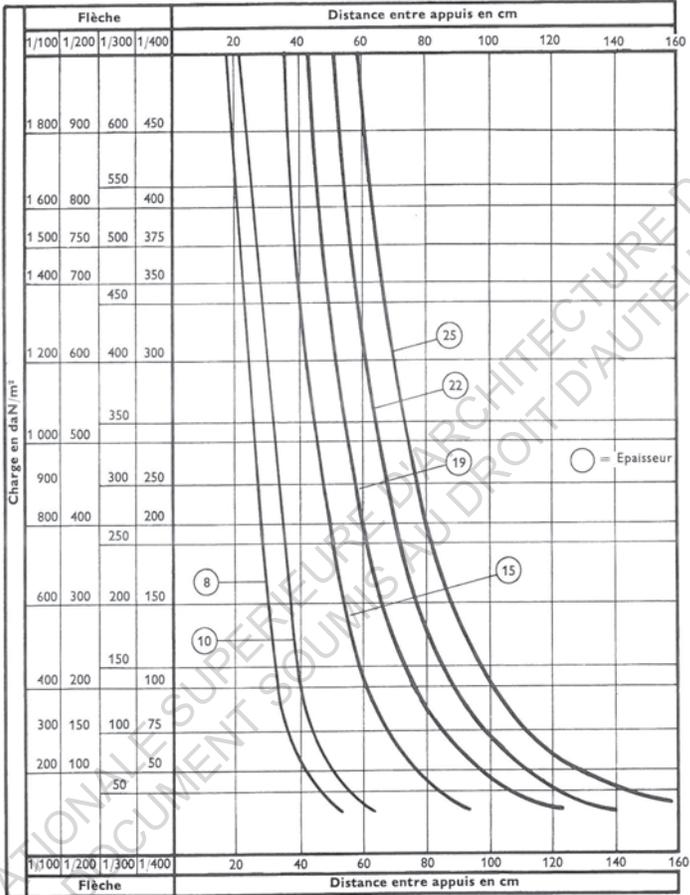
Performances déclarées :

Caractéristiques essentielles	Performances																Spécification technique harmonisée		
	Épaisseur en mm		3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	18	19	22	25		30	40
Qualité du collage	1																EN 13986 : 2004 + A1 : 2015		
Masse volumique : Kg/m ³	500																		
Réaction au feu	E								D>S2,d0										
Dégagement de formaldéhyde maxi	E1																		
Résistance : N/mm²																			
- Flexion // aux faces	54,4	51,1	51,6	41,7	36,9	33,9	31,0	30,5	27,0	26,7	25,4	25,3	30,6	24,4	24,0	23,5			
- Flexion ⊥ aux faces	3,5	5,9	5,5	12,9	16,6	18,6	20,9	20,7	23,3	22,5	23,1	23,0	17,2	23,0	23,0	22,8			
- Traction // aux faces	13,4	11,5	11,8	8,1	6,7	7,6	6,8	6,0	5,6	6,6	6,2	6,7	8,3	6,8	6,8	6,6			
- Traction ⊥ aux faces	5,7	6,8	6,6	6,6	7,7	6,7	7,4	8,1	8,3	7,2	7,5	7,0	5,3	6,8	6,7	6,8			
- Compression // aux faces	22,0	18,8	19,3	13,2	11,0	12,4	11,1	9,8	9,2	10,9	10,1	11,0	13,6	11,1	11,1	10,9			
- Compression ⊥ aux faces	9,3	11,1	10,8	10,8	12,7	11,0	12,1	13,2	13,6	11,7	12,3	11,4	8,7	11,1	11,0	11,1			
- Cisaillement roulant // aux faces	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1			
- Cisaillement roulant ⊥ aux faces	1,4	1,4	1,4	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1			
- Cisaillement de voile	5,5	5,4	5,4	5,2	5,1	5,0	5,0	5,0	4,9	4,9	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,7			
Module d'élasticité : N/mm²																			
- Flexion // aux faces	8 520	8 000	8 090	6 540	5 780	5 310	4 850	4 780	4 240	4 180	3 980	3 960	4 790	3 830	3 760	3 680			
- Flexion ⊥ aux faces	540	930	860	2 020	2 590	2 920	3 270	3 250	3 640	3 530	3 620	3 600	2 700	3 600	3 600	3 580			
- Traction // aux faces	5 280	4 510	4 620	4 230	3 530	3 980	3 550	3 140	2 940	3 470	3 250	3 500	4 360	3 560	3 550	3 480			
- Traction ⊥ aux faces	2 970	3 550	3 460	3 406	4 040	3 510	3 870	4 240	4 360	3 750	3 930	3 660	2 770	3 550	3 530	3 560			
- Compression // aux faces	5 280	4 510	4 620	4 230	3 530	3 980	3 550	3 140	2 940	3 470	3 250	3 500	4 360	3 560	3 550	3 480			
- Compression ⊥ aux faces	2 970	3 550	3 460	3 460	4 040	3 510	3 870	4 240	4 360	3 750	3 930	3 660	2 770	3 550	3 530	3 560			
- Cisaillement roulant // aux faces	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53	53			
- Cisaillement roulant ⊥ aux faces	70	70	70	63	63	60	60	60	59	56	56	55	55	55	54	54			
- Cisaillement de voile	380	370	370	350	350	340	340	340	330	330	330	330	330	330	320	320			
Résistance au poinçonnement	NPD																		
Résistance au choc	NPD																		
Perméabilité à la vapeur d'eau (μ)																			
- coupelle humide	70																		
- coupelle sèche	200																		
Absorption acoustique [250-500] Hz	0,1																		
Absorption acoustique [1000-2000] Hz	0,3																		
Conductivité thermique (W/m.K)	0,13																		
Teneur en pentachlorophénoï (ppm)	< 5																		

Les performances du produit identifié sont conformes aux performances déclarées.
 La présente déclaration des performances est établie sous la seule responsabilité du fabricant.
 Pour le fabricant et en son nom par J. ROUSSEAU Responsable Qualité Le : 07/11/2017 à : Le Vanneau




DOP
du contreplaqué répondant aux critères
de LeichtFrance - juin 2018



Abaque 1. — Utilisation du contreplaqué NF Extérieur CTB-X en okoumé et autres tropicaux tendres posés sur deux appuis

Contreplaqué orthotrope. Utilisation fil du bois sens longueur ou fil du bois sens travers.
 Dans le cas d'une pose sur trois appuis et plus, multiplier par 1,25 les distances entre appuis.

L'ATELIER SUR MER					
13 RUE DES THERMES PA du BOSSENO 56340 CARNAC					
Téléphone : 02 97 55 89 84 Fax : 02 97 55 89 87 E-mail: asm@ateliersurmer.com Siret : 44909878900042 RC : LORIENT APE: 7311Z N° Intracom: FR38449098789			Référence client 996553 / 99655300		Page 1
Contact Client :					
Références Amin BOUATTOUR /HABILLAGE ECRIN CORAULIS					
ENSA (Ecole Archi Nantes) 6 QUAI FRANCOIS MITTERAND BP 16202 44262 NANTES CEDEX 2					
Devis N°	Date	Représentant	Mode de règlement		Devis
05363	27/06/2018	C. TILLEAU	CHEQUE A RECEPTION		EUROS
Référence	Désignation	Qty	P.U. HT	P.U. Net	Montant HT
706172	POURNITURE ADHESIF SPECIAL CONFORMABLE MAT, GLOSS, METALLIC OU DIAMOND AU CHOIX (150 CM X 9 ML) X 24 EX + POSE SUR SPHERE SELON VISUEL 2 PERSONNES / 5 JOURS / 8H PAR JOUR SELON BAT ET SUPPORT VALIDES	1.00	12100.00	12100.00	12100.00
708501	FORFAIT HOTEL 4 NUITS + 3 REPAS/JOUR POUR 2 PERSONNES	1.00	1350.00	1350.00	1350.00
708501	DEPLACEMENT AR CARNAC / NANTES PLANNING INTERV : JANVIER 2019 OPTION / IDEM CI-DESSUS AVEC ADHESIF TEXTURE OU COLORFLOW TARIF (HORS HOTEL & DEPLACT)= 17670 € HT TOTAL = 19200 € HT / 23040 € HT	1.00	180.00	180.00	180.00
Taux TVA	Montant HT	Port & Embal.	Montant TVA	Total HT	
20.00	13630.00		2726.00	13630.00	
				Total TVA	
				2726.00	
				Total TTC	
				16356.00	
Bon pour accord					
REGLEMENT A RECEPTION DE FACTURE					
<i>Pas d'escompte pour paiement anticipé, passé la date d'échéance, tout paiement différé entraîne l'application d'une pénalité de 3 fois le taux d'intérêt légal. (Loi no 2008-776 du 04/08/2008)</i>					
Net à payer en EUROS				16356.00	

Devis
de l'Atelier Sur Mer pour le «total covering»
de l'écrin de Coraulis

----- Forwarded message -----
From: **Guellec, Arnaud [Bois et Matériaux]** <arnaud.guellec@boisetmatériaux.com>
Date: mar. 26 juin 2018 à 07:37
Subject: CP okoumé
To: pasturela@gmail.com <pasturela@gmail.com>

Bonjour,

Suite a notre entretient du Lundi 25 Juin,voici mon offre concernant ;

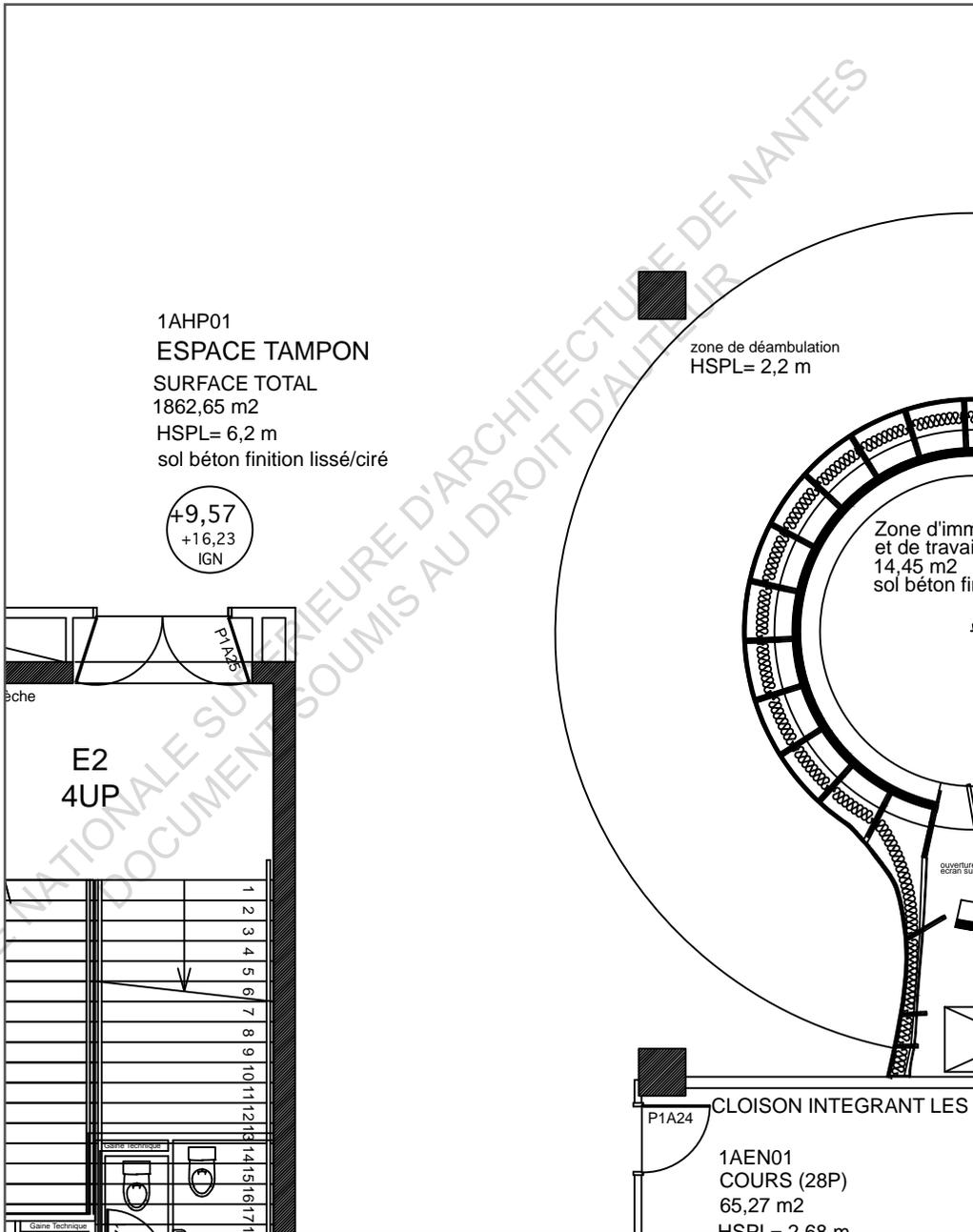
CP Allinply tout okoumé
3100x1830 qualité II/III
En 22mm(9 plis) / vendu par colis de 22 px
Prix ;25,35ht/m2

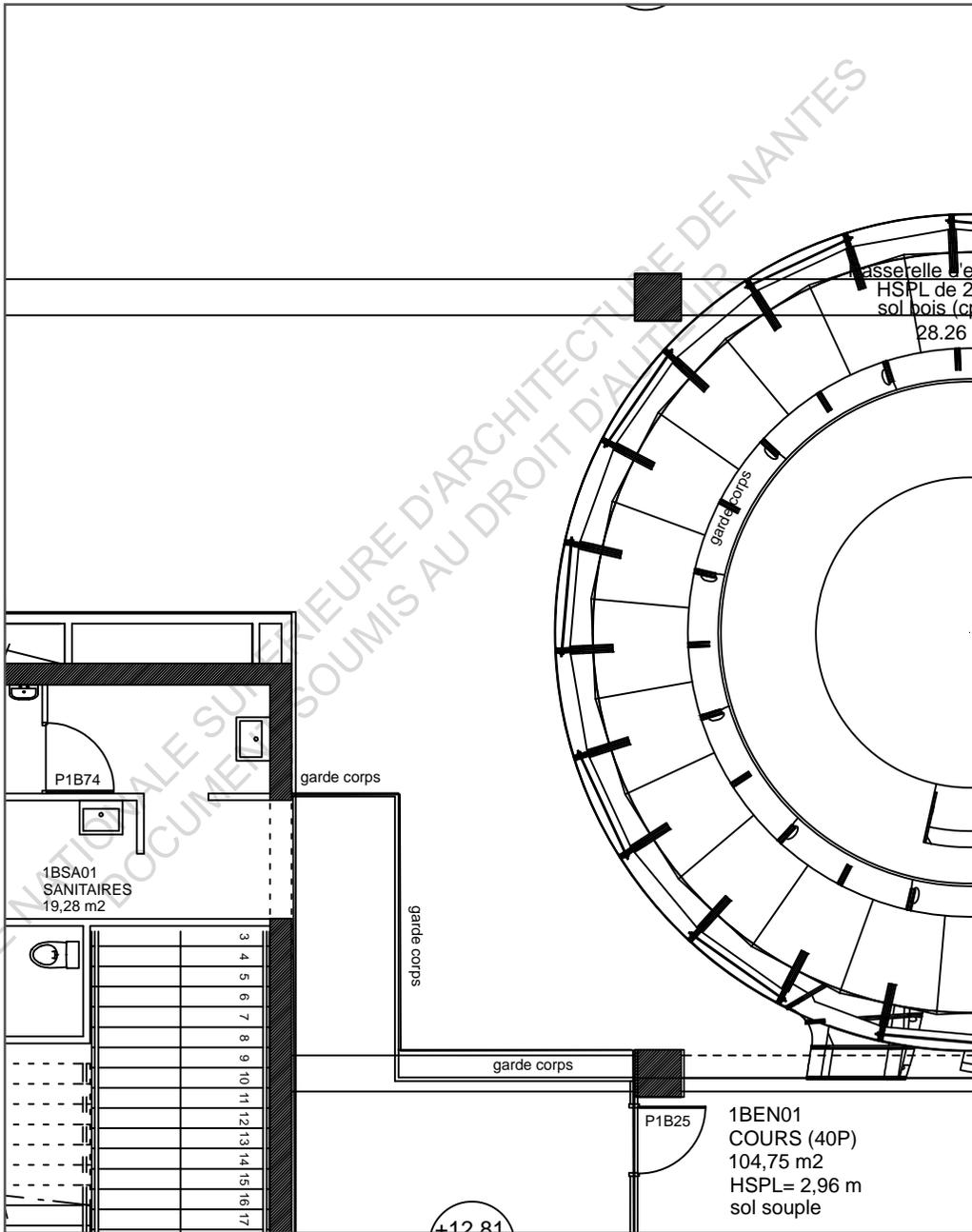
En 25mm(11plis) / vendu par colis de 20 px
Prix ; 28,80ht/m2

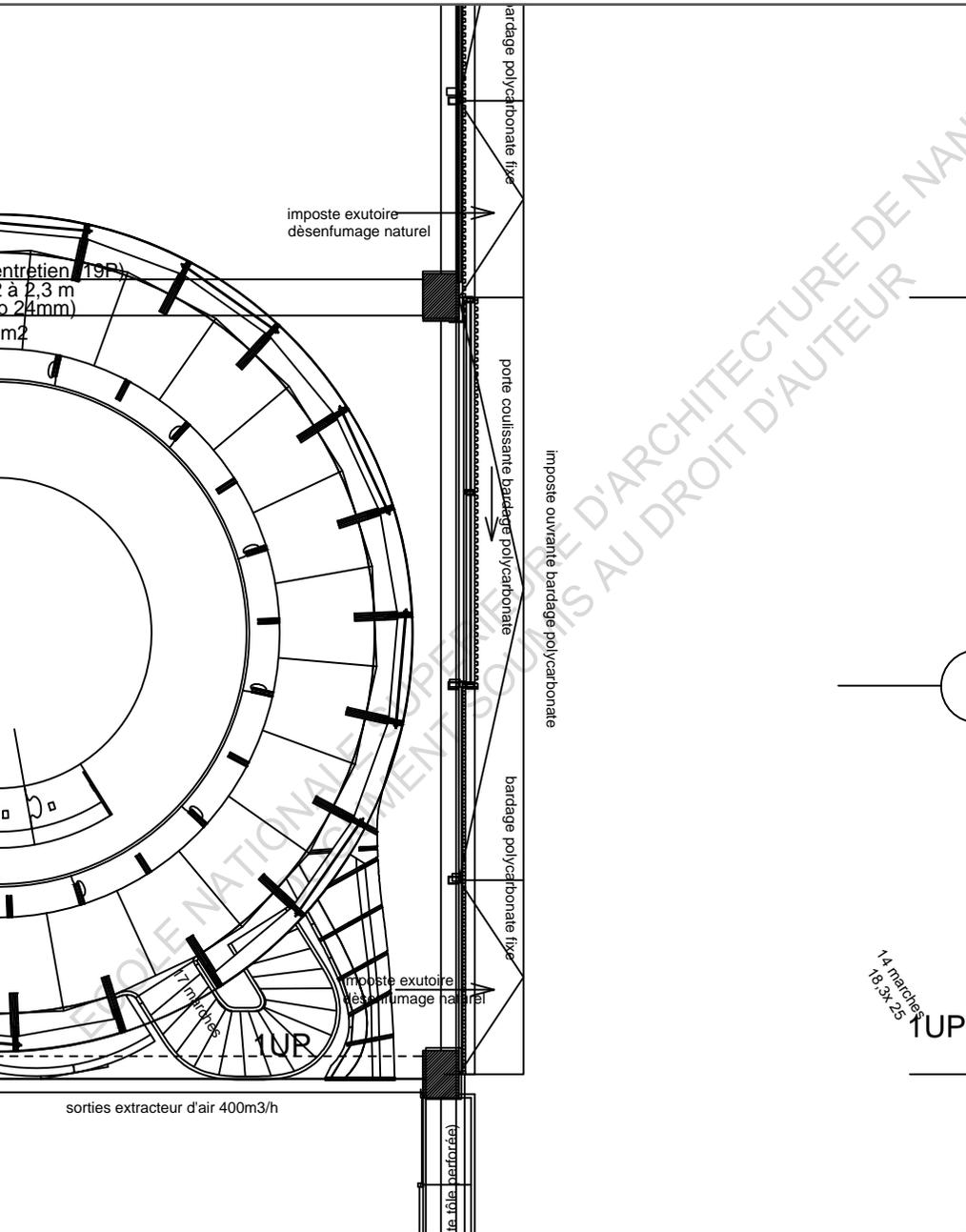
Qté :200px

Bonne journée

Devis provisoire
d'un commercial de PanoFrance
pour le contreplaqué nécessaire à la construction de
l'ossature de l'écrin







Plan R + 1
de Coraulis à la date du 29 juin 2018
échelle : 1/100^{ème}

