

PAVILLON CIRCULAIRE
PAVILLON CIRCULAIRE

PAVILLON CIRCULAIRE



Gaspard BESSON



Thomas Ertzbischoff



Maëlle POTTIER



Édouard STEICHEN



Rémi TRAN VAN LIEU

Nos professeurs

Un remerciement particulier à nos professeurs encadrants Camille Boutemy, Margaux Gillet, et Jean-Aimé Shu qui ont enrichi le projet par leurs expertises et leur investissement et qui ont participé à le rendre possible.

Nos soutiens

Aux étudiants et stagiaires ayant donné de leur temps pour la réalisation des éléments de construction : Alexandre David, Luisa Marciniac, Lou Villegas, Émelyne et Alice

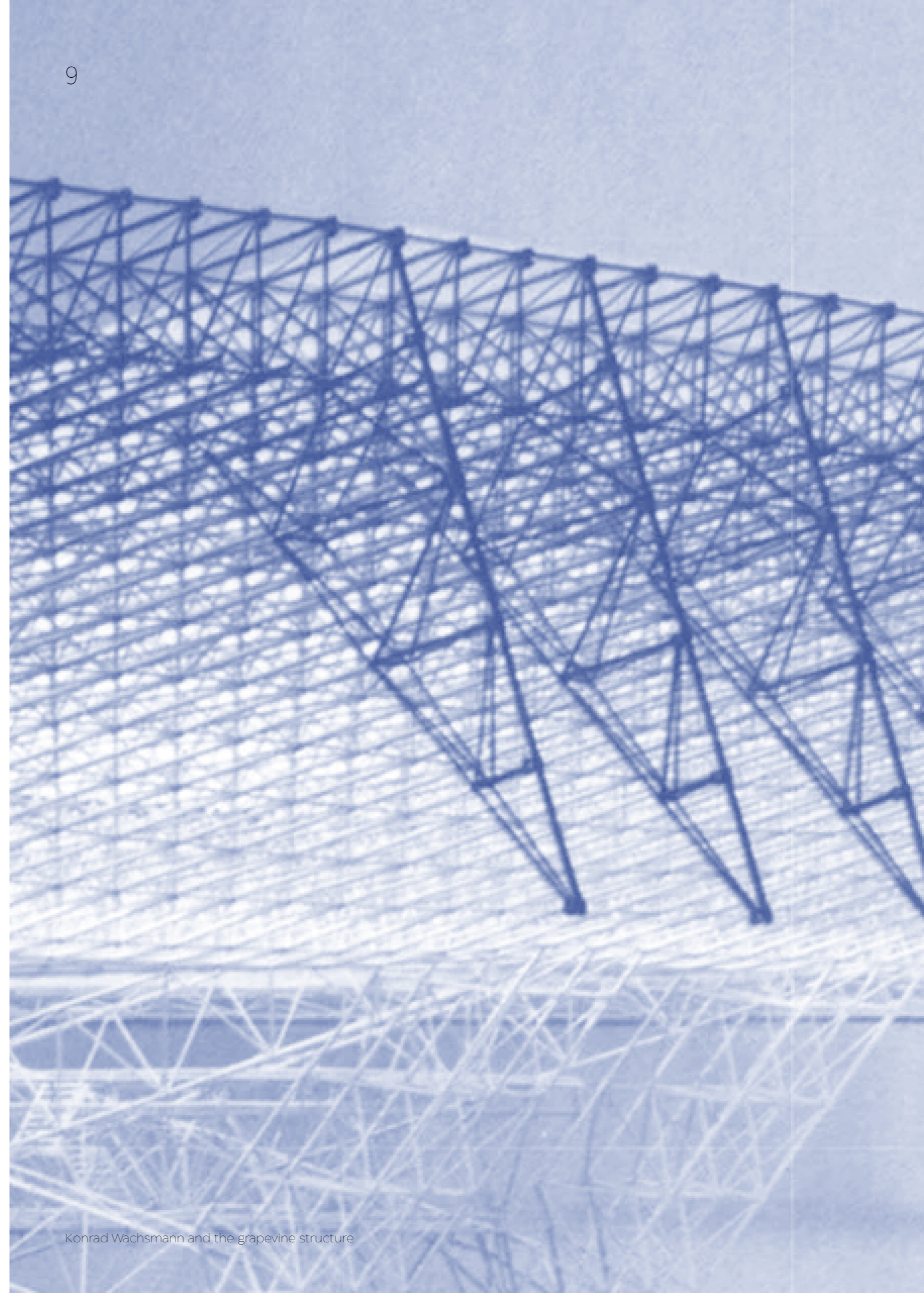
À l'ENSA Paris-est pour son soutien financier, mais également matériel à travers les nombreux prêts de l'Atelier Maquette.

À toutes les personnes anonymes qui ont participé à la collecte de matière première, un geste fondamental qui non seulement rend un ce projet ambitieux réalisable, mais aussi qui lui donne tout son sens en transformant des déchets en objet d'étude et de réflexions.

Durant les Trente Glorieuses, les structures en treillis ont incarné une innovation majeure dans le champ de la construction, en réponse directe aux enjeux économiques, industriels et sociaux de l'après-guerre. Leur principe, optimiser la résistance par la géométrie plutôt que par la masse, s'inscrivait dans une logique de rationalisation des matériaux, alors majeure dans un contexte de pénurie et de reconstruction rapide. Le treillis permettait de grandes portées, une standardisation des éléments et une préfabrication poussée, en adéquation avec l'industrialisation accélérée du bâtiment.

Sur le plan social, ces structures accompagnaient l'ambition d'un progrès technique au service du plus grand nombre : construire vite, beaucoup et à moindre coût pour répondre aux besoins massifs en équipements et infrastructures. Elles participaient ainsi à une vision optimiste de la modernité, où l'innovation constructive était indissociable d'un projet collectif de croissance et de performance.

Aujourd'hui, les enjeux ont évolué. Si l'efficacité économique demeure centrale, elle se conjugue désormais avec d'une part des impératifs environnementaux forts : réduction de l'empreinte carbone, sobriété matérielle et allongement du cycle de vie des bâtiments et d'autre part avec un progrès technologique significatif : l'avènement d'outils informatiques accessibles. Dans ce contexte, les structures en treillis peuvent trouver une pertinence nouvelle. Leur légèreté, leur démontabilité potentielle et leur logique d'assemblage en font des supports particulièrement adaptés aux stratégies de réemploi et de transformation des structures existantes. Là où le treillis des Trente Glorieuses symbolisait la production industrielle de masse, il peut aujourd'hui devenir un outil de l'économie circulaire, capable de répondre aux défis contemporains de préservation des ressources et de transition écologique.



SOMMAIRE

INTRODUCTION 2-4

Équipe / Remerciements	2
Intentions	4

I. GÉOMÉTRIE 8-15

Morphogénèse / Morphologie	10
Élaboration	12
Types / Rationalisation	14

II. MÉCANIQUE ET MATÉRIAUX 16-27

Pistes / Éléments	18
Matières premières / Origines	20
Protocole / Tests arrachement	22
Assemblages / Détails	24
Comportement / Contexte	26

III. MISE EN ŒUVRE 28-43

Budget / Phasage	30
Le Bâton : Outils / Méthode	32
La Balle : Outils / Méthode	34
Optimisation / Gabarits	36
Types de barres / Nomenclature	38
Levage / Nœuds	40
Hypothèses / Futures	42

I. GÉOMÉTRIE

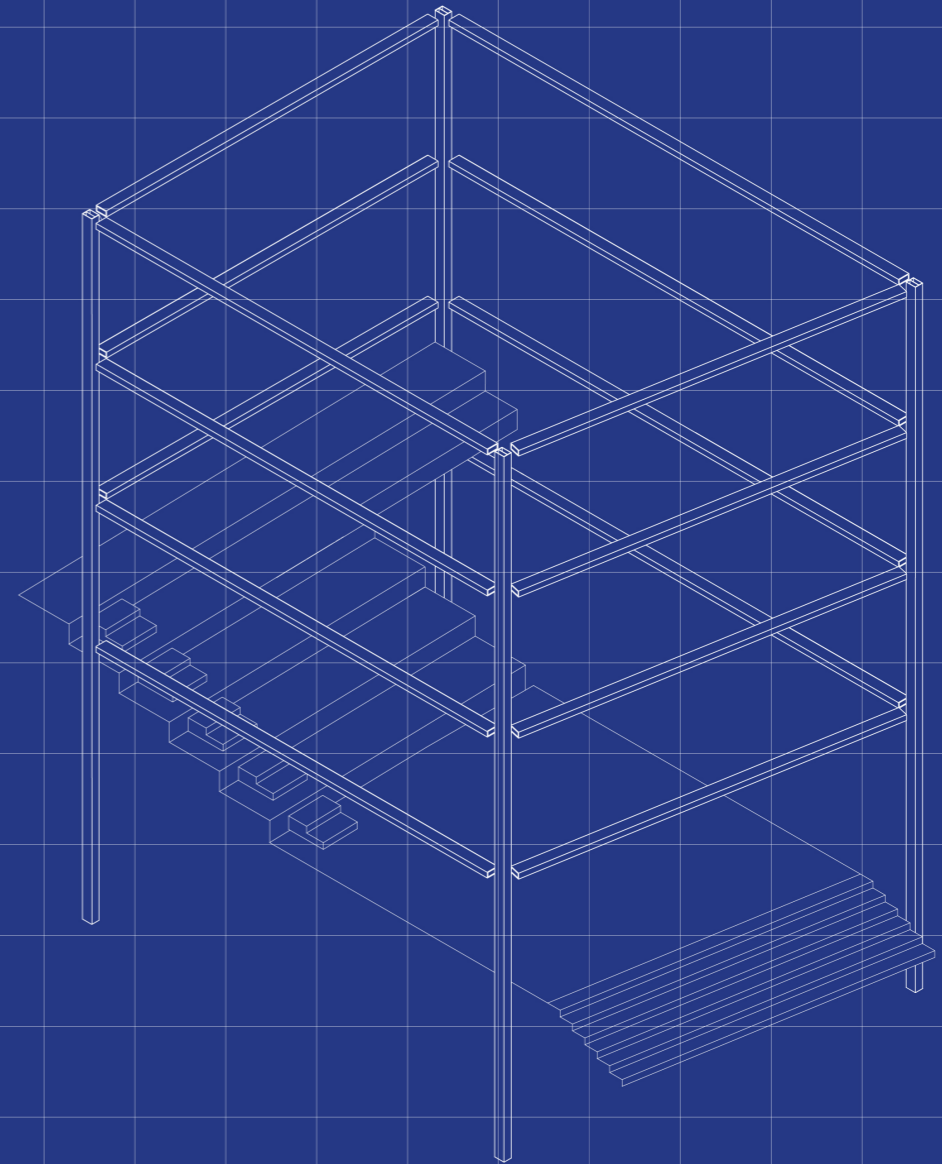
12

La morphologie et le choix du site de projet n'ont pas pour objet de répondre à un programme mais de mettre en scène le mode constructif et ses propriétés. Ils ont été voulus expressif de son potentiel, mais devaient répondre à des contraintes importantes de budget, de main d'œuvre, de délais, de solidité...

Le site de l'atrium inachevé de l'ENSA Paris-est a été retenu pour son accessibilité depuis les ateliers, son ample volume de 9,80 x 11,50 x 10,30m, son exposition aux défis que représentent les contraintes de pluie et de vent, sa visibilité depuis les espaces fréquentés adjacents et les nombreux points d'accroche qu'il offre dans l'optique d'une structure suspendue.

De son côté, la recherche de forme a été guidée par la volonté de maximiser le rapport Surface-Nombre de barre et s'est donc naturellement dirigée vers des cadres. La double courbure de la surface suggérée par ce cadre s'est imposée comme contrainte pour permettre d'imaginer une potentielle couverture en tissu élastique tendu en son centre.

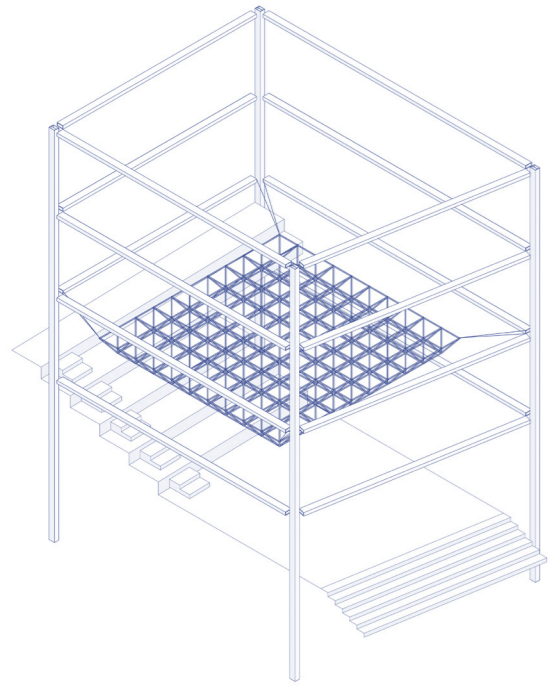
13



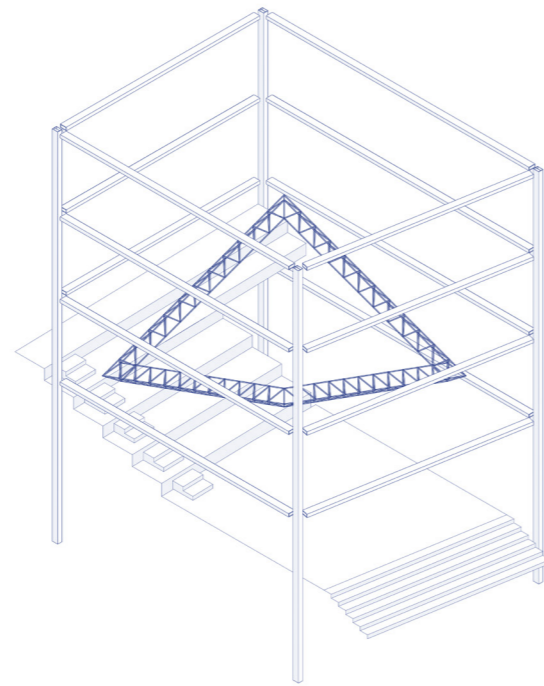
MORPHOGÉNÈSE

Des géométries expérimentales

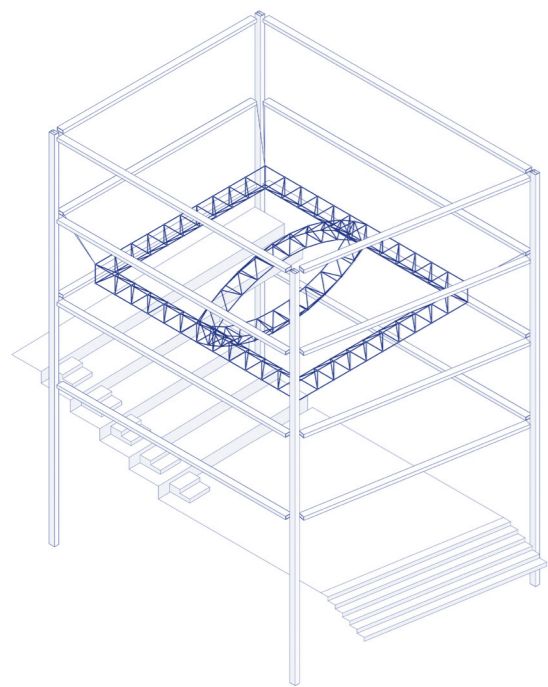
14



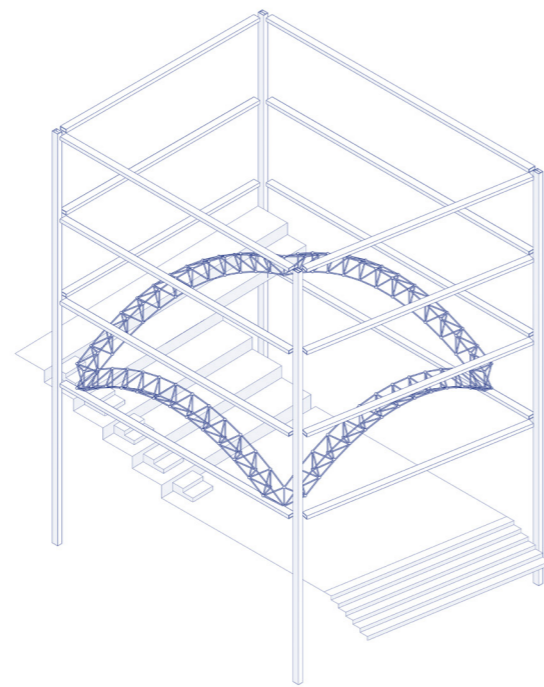
Nappe



Carré projeté sur parabololoïde hyperbolique



Double conoïde

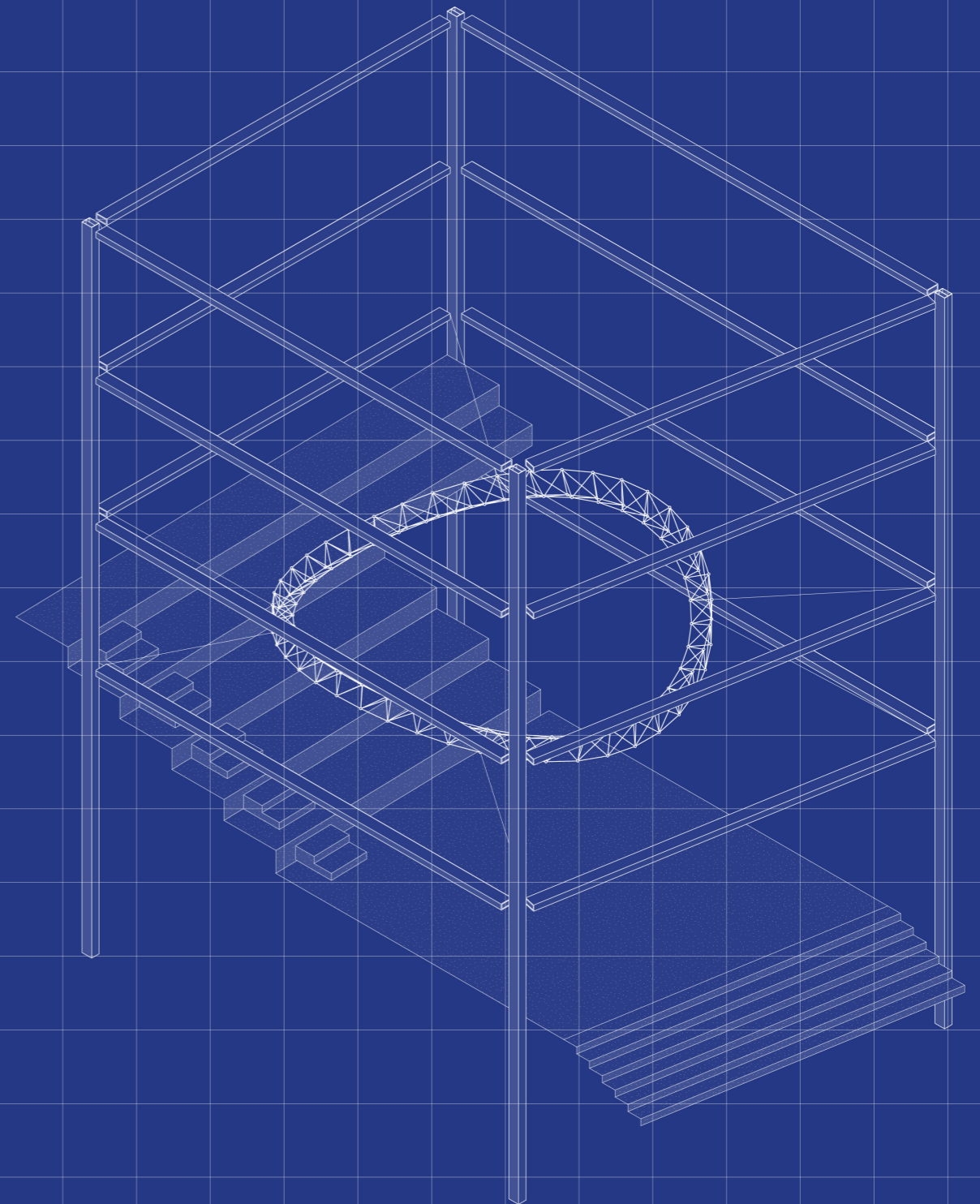


Croisée de voutes

15

MORPHOLOGIE

Cercle projeté sur parabololoïde hyperbolique

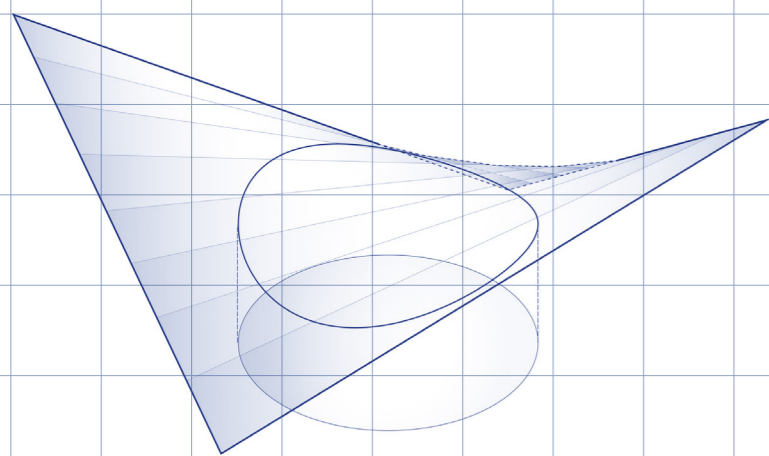


ÉLABORATION

Du treillis à partir de la géométrie choisie

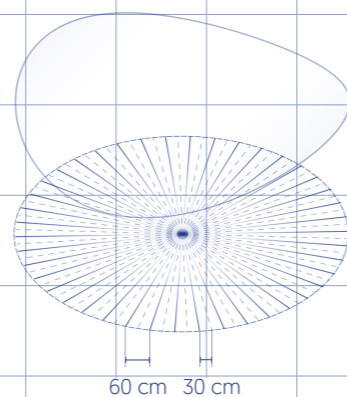
16

17



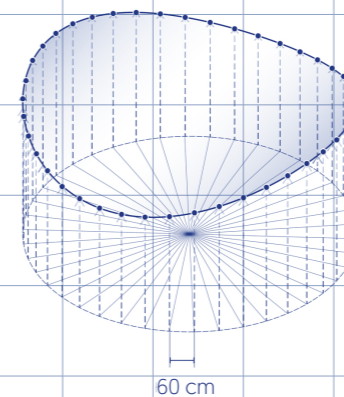
1. Courbe guide intérieure

Construction de la courbe de construction intérieure par projection d'un cercle de 8 m de diamètre sur une parabolode-hyperbolique.



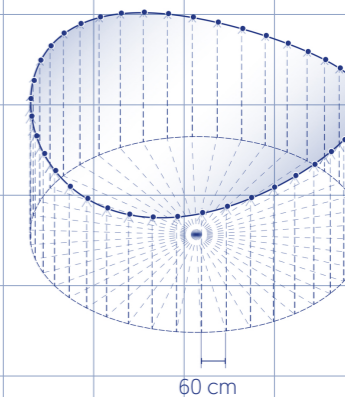
2. Trame principale et trame secondaire

Construction d'une trame principale par division du plan circulaire en arcs réguliers de 60 cm de corde (longueur imposée par les barres du treillis) et subdivision de cette trame primaire en arcs de 30 cm de corde..



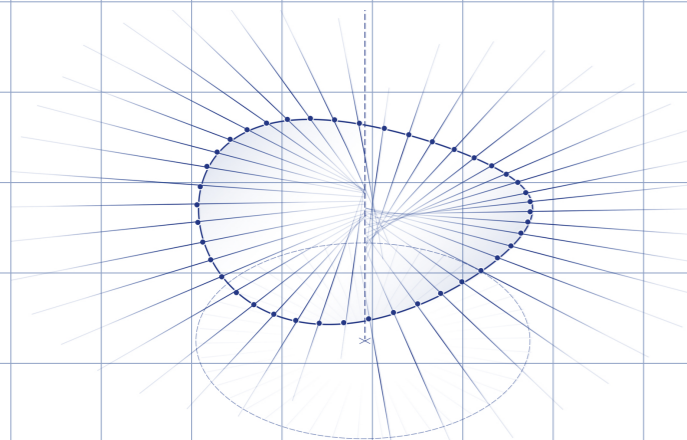
3. Sommets de la trame principale

Construction d'une série de points par projection de la trame principale sur la courbe guide.



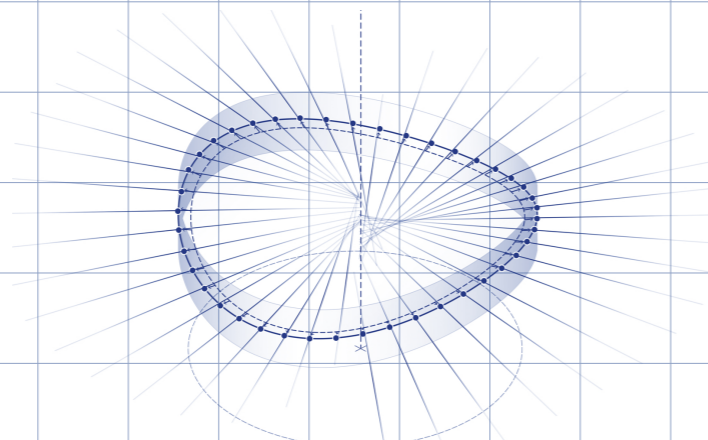
4. Sommets de la trame secondaire

Construction d'une seconde série de points par projection de la trame secondaire sur la courbe guide.



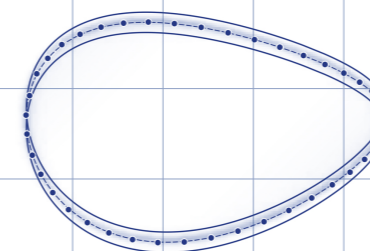
5. Axes de translation de la trame secondaire

Construction des droites normales horizontales aux points de la trame secondaire.



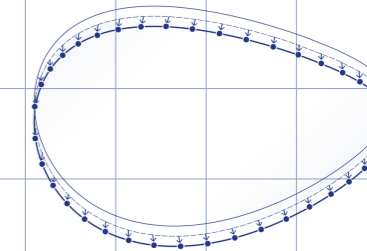
6. Courbe extérieure

Projection des points de construction le long des normales sur une courbe décalée de la parabolode hyperbolique de 45 cm vers l'extérieur.



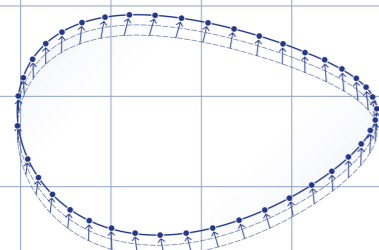
7. Courbes guides basses et hautes

Translations verticales de la courbe extérieure de 30 cm dans les deux directions



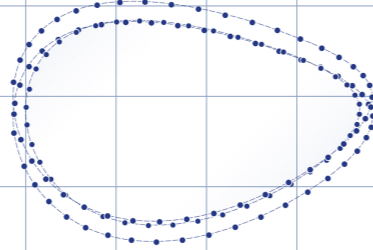
8. Sommets de la courbe basse

Construction de points à l'intersection de normales des points de la courbe extérieure avec la courbe basse.



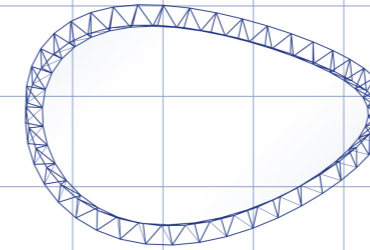
9. Sommets de la courbe haute

Construction de points à l'intersection de normales des points de la courbe guide basse avec la courbe haute.



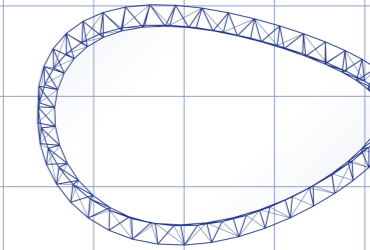
10. Ensemble des sommets

L'ensemble des points de la trame principale sur la courbe intérieure et ceux issus de la trame secondaire sur les courbes basse et haute représente les sommets des pyramides à base carré.



12. Construction des pyramides à base carré

Construction de segments entre les sommets pour former un ensemble de pyramides à base carré..



13. Contreventement des pyramides à base carré

Contreventement continue en Warren des pyramides à base carré.

RATIONALISATION

De la structure pour optimiser la mise en oeuvre

18

Le dessin initial du treillis était fortement influencé par les barres standardisées (bâtons de ski), avec pour objectif de simplifier leur découpe et préparation.

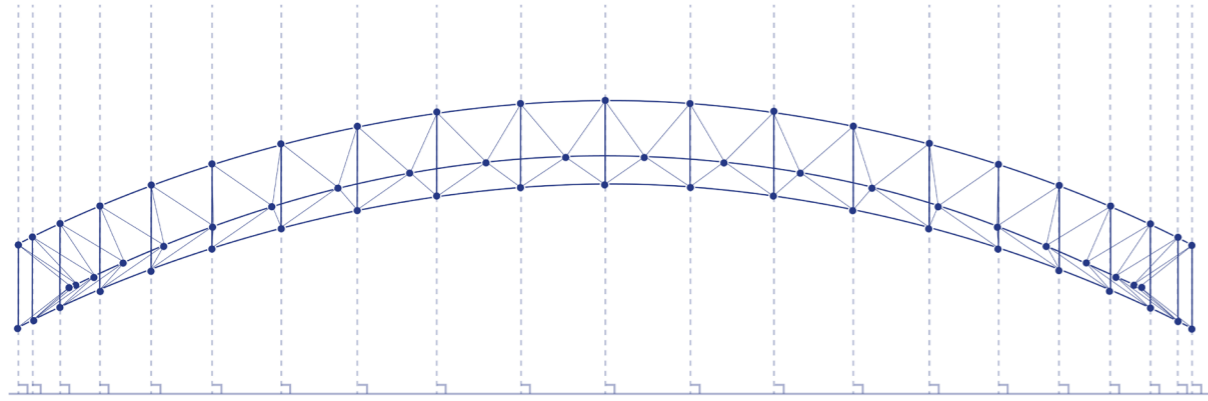
Cependant, les nœuds se sont rapidement révélés l'élément le plus chronophage, en raison de la diversité des angles à réaliser. La première géométrie présentait un écart angulaire d'environ 10° entre les nœuds des différentes membrures, rendant nécessaire la fabrication de 36 gabarits de perçage.

Nous avons donc accepté des longueurs de barres variables et rationalisé les angles des nœuds à environ 4° , permettant de limiter le nombre de gabarits à 6, tout en simplifiant le montage et la fabrication de l'ensemble de la structure.

Première géométrie

Les bases des pyramides étaient des parallélogrammes.

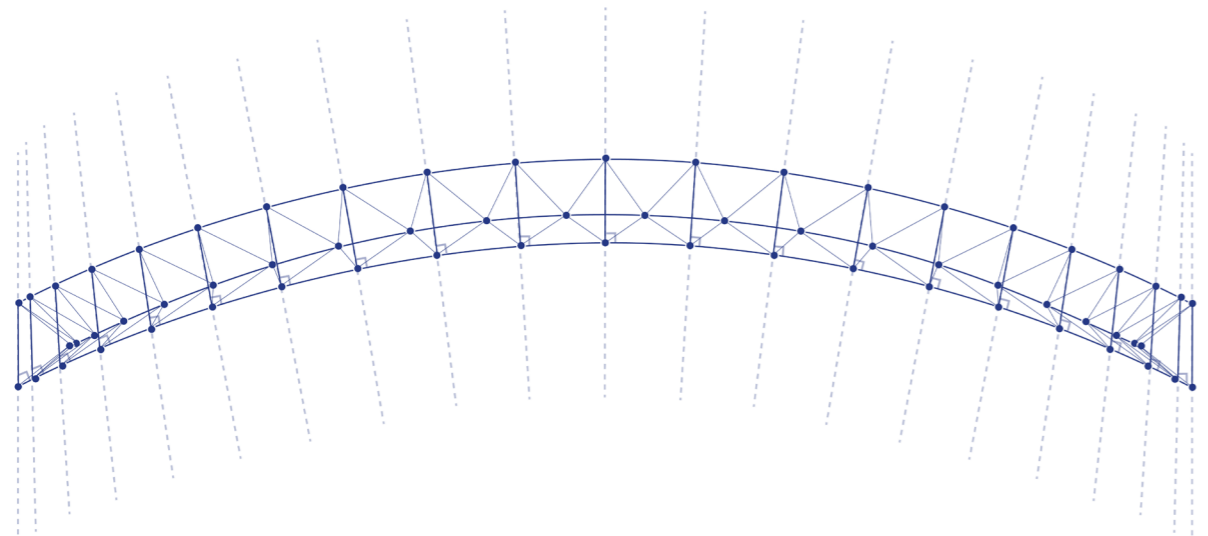
Les arêtes verticales reliant la membrure inférieure à la membrure supérieure étaient de même longueur et perpendiculaires au plan circulaire générateur.



Géométrie finale

Les bases des pyramides deviennent des polygones à côtés de longueurs variables.

Les arêtes verticales ne sont plus simplement perpendiculaires au plan circulaire, mais orientées perpendiculairement aux côtés de la membrure inférieure, permettant une homogénéisation des angles aux nœuds et une meilleure rationalisation du système constructif.

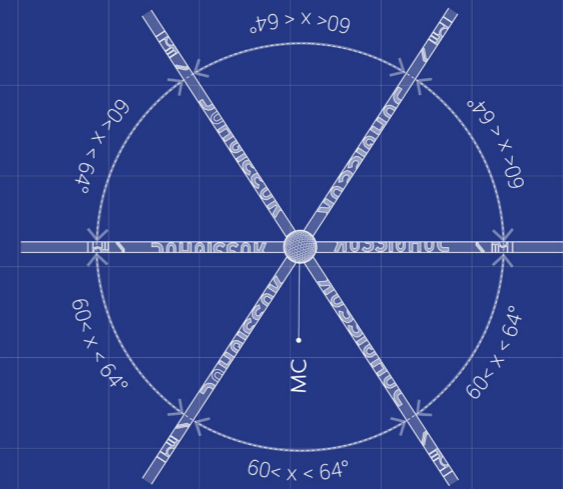


TYPES

Des sommets avec leurs angles

19

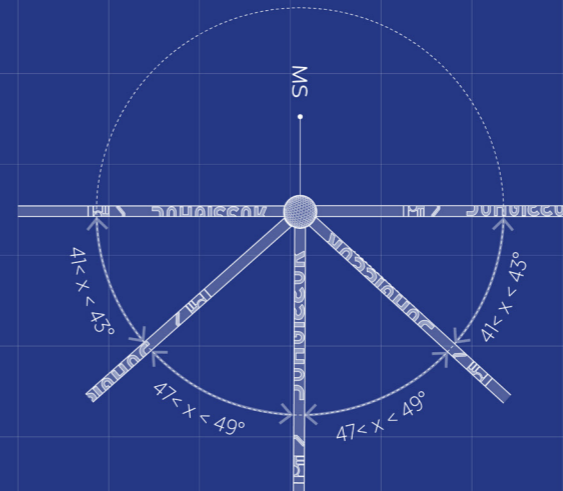
Sommets membrure centrale



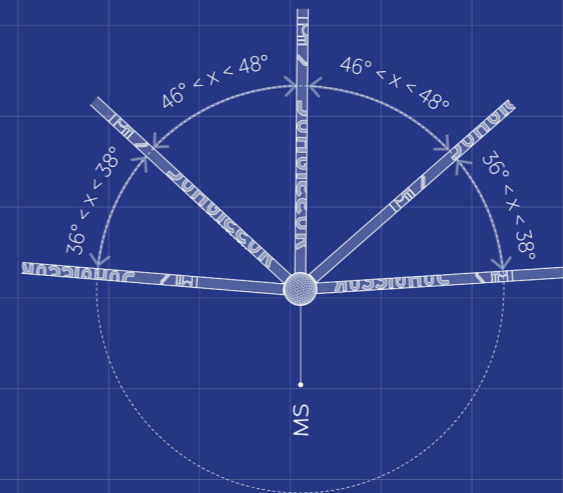
Sommets contreventés

Sommets non contreventés

Sommets membrure haute



Sommets membrure basse



MC : Membrure centrale - MS : Membrure supérieure - MB : Membrure basse

II. MÉCANIQUE ET MATÉRIAUX

Le recours au réemploi des éléments constructifs pose des difficultés techniques qui influencent directement la conduite des projets. La première contrainte a été l'identification et la qualification de gisements potentiels, souvent incertains en quantité, en qualité et en temporalité a fortiori pour une équipe encore peu sensibilisée au fonctionnement de la filière. Il nous a donc fallu comprendre les flux de matières qui nous intéressaient et imaginer un moyen de se glisser dans cette chaîne. Contrairement aux matériaux industriels classiques, le réemploi impose d'adapter le projet aux aléas des gisements, ce qui a engendré des difficultés non seulement dans l'approvisionnement mais également dans les tests de résistance.

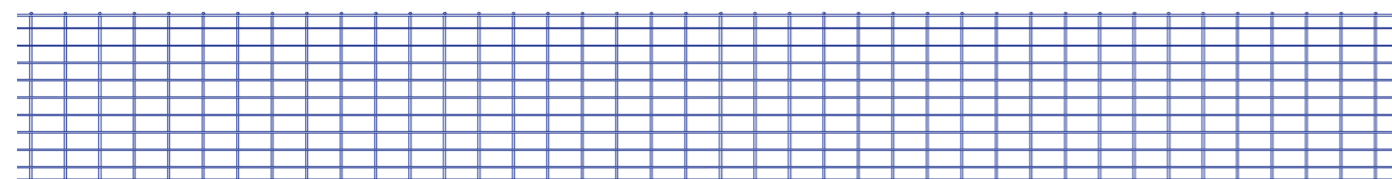


PISTES

de matériaux étudiées

Dès les débuts du projet, les intuitions de matériaux se sont orientés vers les déchets de chantier, tuyau, montant de cadre de fenêtre. La difficulté de cet exercice réside en notre distance avec le monde du chantier qui rendait difficile l'évaluation des gisements potentiels. Après une phase de prise de contact avec des professionnels du réemploi nous avons précisé nos méthodes et commencé à lister de potentiels fournisseurs. C'est de la prise de contact avec une entreprise de récupération dans le domaine du sport qu'est née l'idée du bâton de ski. Un gisement disponible, standardisé, rigide, facile à manipuler et à modifier. Nous récapitulons ci-dessous les différents gisements étudiés lors de la phase exploratoire du projet. La disponibilité, facteur de choix crucial, indique le potentiel de gisement de ce matériau en seconde vie.

Barres



Cablofil - Acier galvanisé Dimensions : 150*54 mm Section : U Disponibilité : forte



Rail de BA13 - Acier galvanisé Dimensions : 48*35 mm Section : U Disponibilité : faible



Néon - Verre Section : Tubulaire Disponibilité : moyenne
Diamètre : 28mm

Tube Thermodéformable - PVC Section : Tubulaire Disponibilité : moyenne
Diamètre : 16 mm



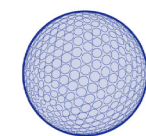
Bâton de ski - Aluminium Section : Tubulaire Disponibilité : moyenne
Diamètre : 14, 16 ou 18 mm

Nœuds



Tuyau d'arrosage - polyéthylène Section : Tubulaire Disponibilité : moyenne
Diamètre : 25mm

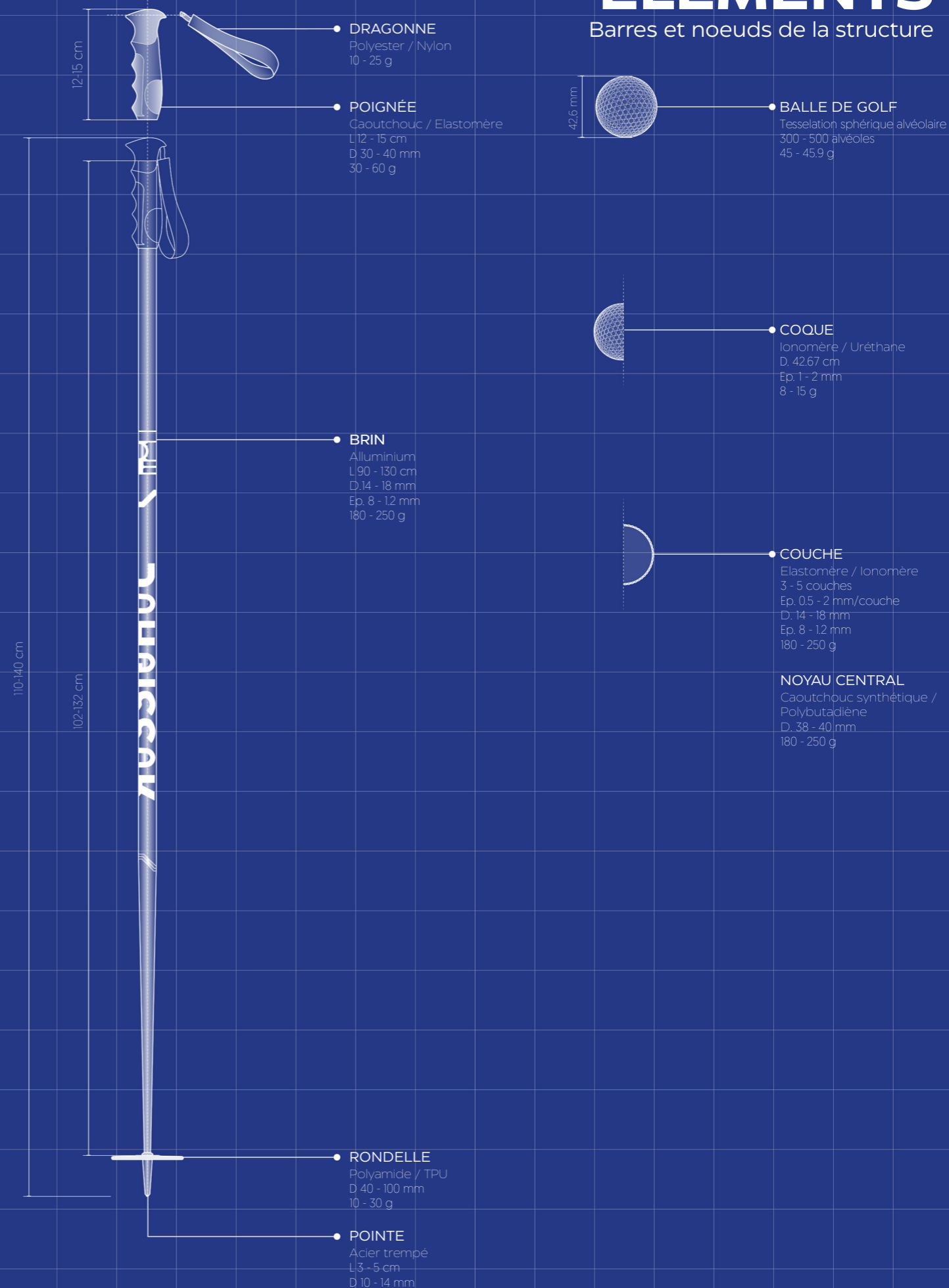
Gaine thermorétractable - EVA Section : Tubulaire Disponibilité : faible
Diamètre : de 1,5 à 13 mm



Balle de golf - Polybutadiène Diamètre : 42,67 mm Disponibilité : forte
Section : circulaire

ÉLÉMENTS

Barres et nœuds de la structure



MATIÈRES PREMIÈRES

Sélectionnés pour la réalisation du projet

Les éléments constitutifs du treillis sont les bâtons de ski, employés comme barres, et les balles de golf, utilisées comme nœuds, tous deux issus de la réutilisation. Pour constituer ce gisement, nous sommes allés directement à la source : les bâtons usagés, initialement destinés à la déchetterie, ont été collectés auprès de loueurs dans différentes stations de Haute-Savoie, tandis qu'une grande partie des balles de golf a été fournie par un club de golf à Morangis (voir carte page suivante).

Les éléments d'assemblage, bande perforée, vis et boulons, assurent la liaison mécanique entre les barres et les nœuds. Les quantités nécessaires et la standardisation de cette quincaillerie ont toutefois limité la possibilité d'un approvisionnement en réemploi.

Le levage et la mise en tension de la structure sont réalisés à l'aide de cordes d'escalade réutilisées et de paracorde. Si la corde d'escalade provient également du réemploi, les contraintes de calendrier liées à la mise au point du système de filet en paracorde n'ont pas permis d'en organiser la récupération.



Bâton de ski Gisement : Seconde vie Quantité utilisée : 374



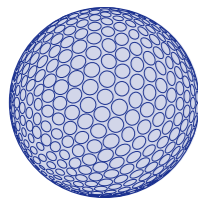
Corde d'escalade ø10mm Gisement : Seconde vie Quantité utilisée: 25m.l.



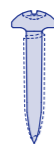
Bande perforée courbe Gisement : Neuf Quantité utilisée : 40m.l.



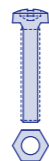
Cordelette ø2mm Gisement : Neuf Quantité utilisée : 24m.l.



Balle de golf
Quantité : 126



Vis
Quantité : 758



Boulon
Quantité : 758

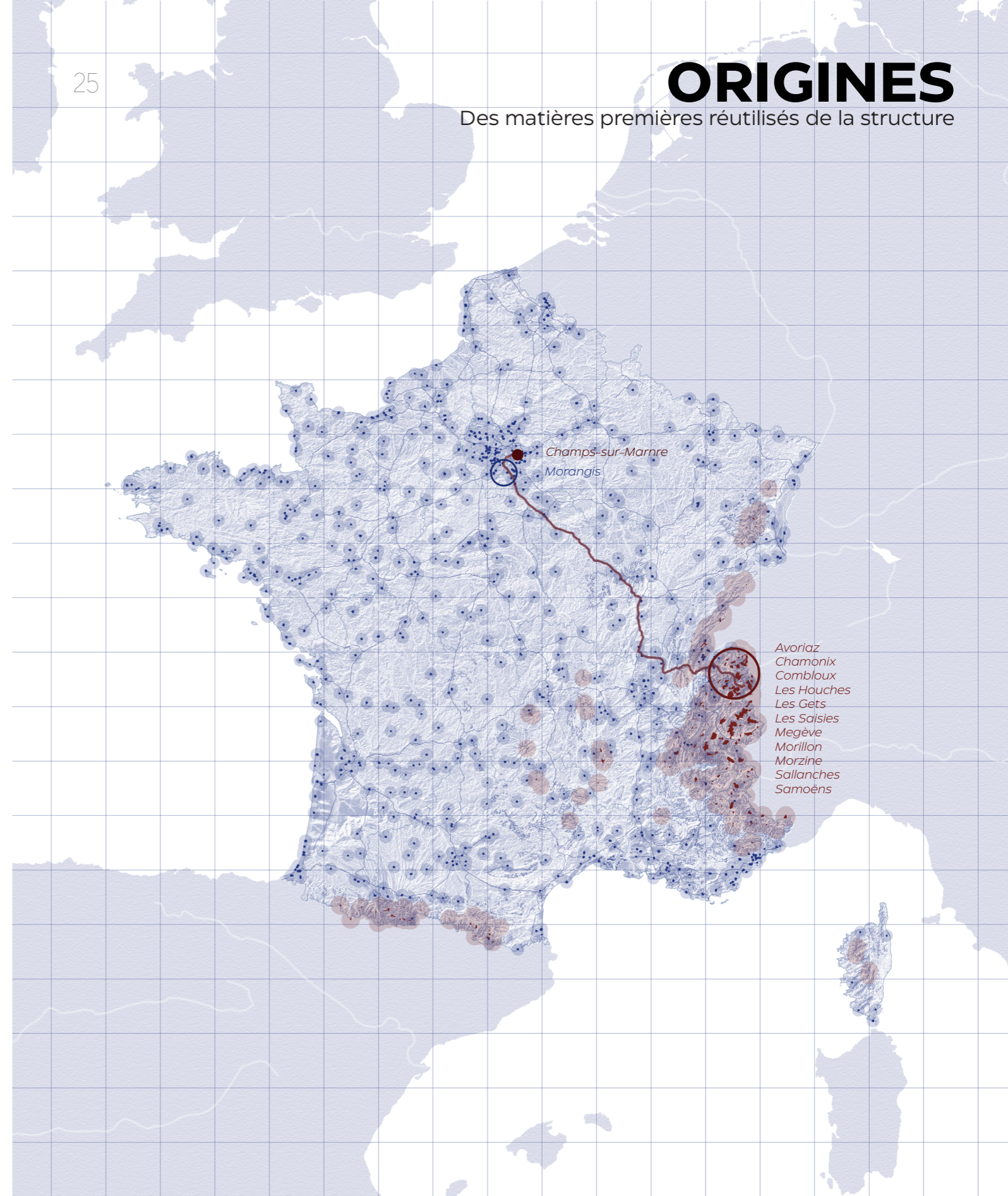
Gisement : Récupéré

Gisement : Neuf

Gisement : Neuf

ORIGINES

Des matières premières réutilisées de la structure



LÉGENDE

Bâton de ski

- Lieux d'usage courant
- Lieux de récupération
- Acheminement routier

Balle de golf

- Lieux d'usage courant
- Lieux de récupération

- Lieu de construction

PROTOCOLE

Résistance mécanique des assemblages

Afin d'évaluer la résistance mécanique des assemblages (nœuds) du treillis circulaire, un protocole d'essais en traction a été mis en place. Les assemblages testés assurent la liaison entre des tubes en aluminium issus de bâtons de ski de récupération et des balles de golf de récupération ; les essais portent sur les différents dispositifs mis en œuvre pour permettre cette connexion entre les bâtons et les balles.

Le protocole principal consiste en un essai de traction réalisé à l'aide d'un dynamomètre. Chaque assemblage est soumis à une charge axiale croissante appliquée de manière progressive. La charge est augmentée par paliers successifs de 5kg, permettant une lecture précise de l'évolution du comportement de l'assemblage sous effort.

La charge est appliquée jusqu'à la rupture de l'assemblage, définie comme la perte totale de capacité portante. La valeur maximale atteinte avant rupture correspond à la charge maximale supportée en traction par l'assemblage testé.

Chaque test est réalisé dans des conditions identiques afin d'assurer la comparabilité des résultats entre les différents types d'assemblages.

À la suite de ces essais, les assemblages présentant les meilleurs résultats en termes de résistance et de facilité de mise en œuvre font l'objet d'un test de Résistance à Charge Maintenue (RCM). Ce test consiste à appliquer une charge élevée sur une durée donnée afin d'observer le comportement de l'assemblage dans le temps et de vérifier sa fiabilité sous charge constante.

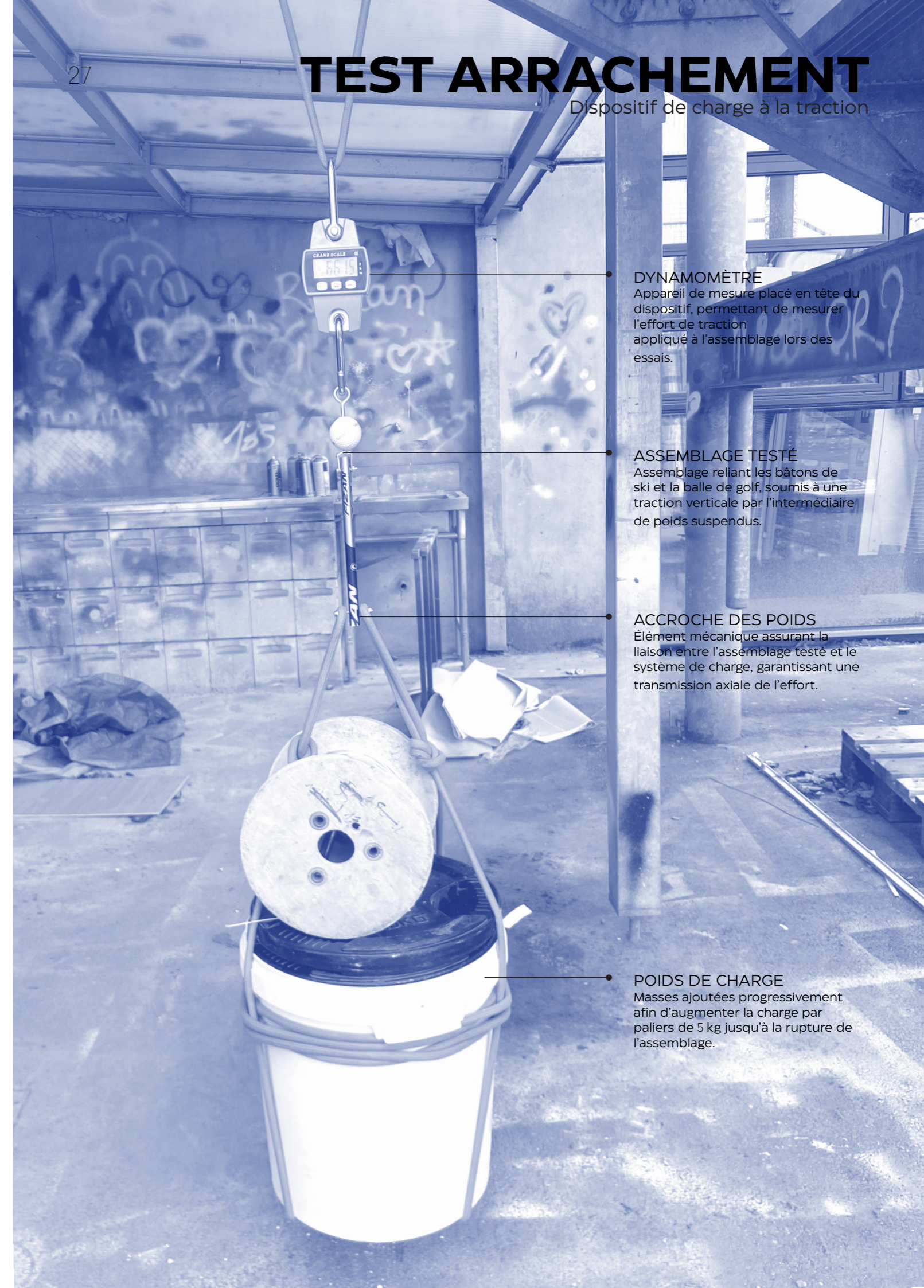
N°	Type de lien	Ø Barre	Déformation	Résist. max. traction	RCM (Résistance Charge Maintenue)
01	Assemblage gaines	16mm	NA	10 kilos	Non testé
02	Tube PVC thermoformé	16mm	NA	5 kilos	Non testé
03	Gaine - vissée sans goupille	16mm	NA	0 kilos	Non testé
04	Gaine vissée	16mm	22mm	40 kilos	Non testé
05	Gaine - vis à tête plate	16mm	17mm	40 kilos	Non testé
06	Gaine - Goupille sans écrou	16mm	20mm	30 kilos	Non testé
07	Chaîne métallique	18mm	1mm	+65 kilos	65 kilos (+60h) - Pas de rupture
08	Bande perforée métallique rectangulaire	18mm	Négligeable	+65 kilos	65 kilos (+60h) - Pas de rupture
09	Gaine - Rondelle épaisse	16mm	24mm	46 kilos	31 kilos (+16h) - Pas de rupture
10	Gaine doublée	16mm	17mm	57 kilos	Non testé
11	Gaine enfoncée	16mm	10mm	41 kilos	Non testé
12	Bande perforée métallique arrondie	16mm	Négligeable	+100 kilos	65 kilos (+60h) - Pas de rupture

26

27

TEST ARRACHEMENT

Dispositif de charge à la traction



DYNAMOMÈTRE

Appareil de mesure placé en tête du dispositif, permettant de mesurer l'effort de traction appliqué à l'assemblage lors des essais.

ASSEMBLAGE TESTÉ

Assemblage reliant les bâtons de ski et la balle de golf, soumis à une traction verticale par l'intermédiaire de poids suspendus.

ACCROCHE DES POIDS

Élément mécanique assurant la liaison entre l'assemblage testé et le système de charge, garantissant une transmission axiale de l'effort.

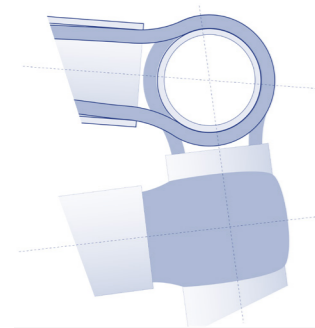
POIDS DE CHARGE

Masses ajoutées progressivement afin d'augmenter la charge par paliers de 5 kg jusqu'à la rupture de l'assemblage.

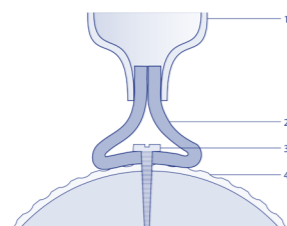
ASSEMBLAGES

Expérimentés

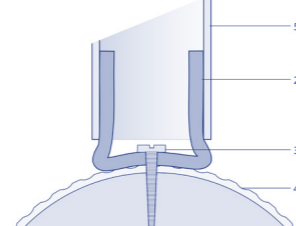
Les nombreux essais relatifs aux gaines s'expliquent par la plasticité de ces dernières qui présentaient une harmonie convaincante en épousant l'embouchure de la barre. Mais leur rigidité posait la limite des 46kg de chargement maximum pour les assemblages compatibles avec toutes les dimensions de barre. Une limite bien en deçà des performances du bâton de ski et de la balle de golf et qui semblait donc ne pas convenir à un ouvrage présentant un tel potentiel. C'est donc la bande perforée métallique, supportant plus de 100kg de charge (soit plus de 7 fois la charge maximale des points les plus sollicités), qui a semblé plus compatible avec les ambitions du projet.



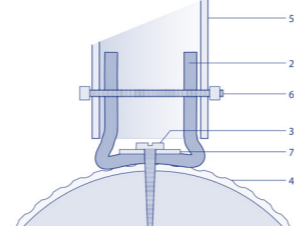
1. Assemblage gaines
Resist. max. traction : 0kg
RCM : Non testé
Déformation : Non testé
Compatibilité : 18mm, 16mm



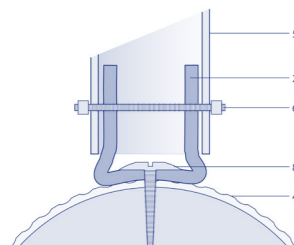
2. Tube PVC thermoformé
Resist. max. traction : 0kg
RCM : Non testé
Déformation : Non testé
Compatibilité : 18mm, 16mm



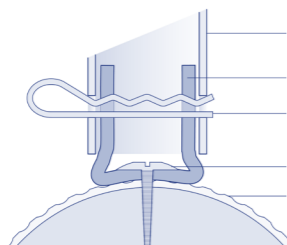
3. Gaine vissée sans goupille
Resist. max. traction : 0kg
RCM : Non testé
Déformation : Non testé
Compatibilité : 18mm, 16mm



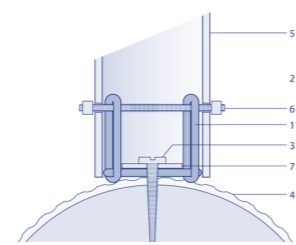
4. Gaine vissée
Resist. max. traction : 40kg
RCM : Non testé
Déformation : 22mm
Compatibilité : 18mm, 16mm



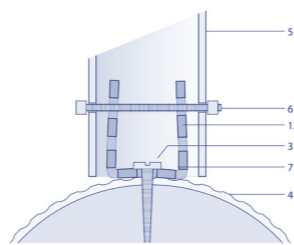
5. Visse à tête plate
Resist. max. traction : 40kg
RCM : Non testé
Déformation : 17mm
Compatibilité : 18mm, 16mm



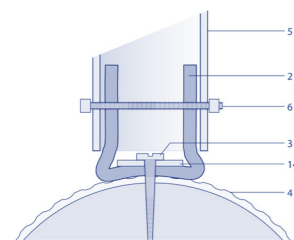
6. Goupille sans écrou
Resist. max. traction : Non testé
RCM : Non testé
Déformation : Non testé
Compatibilité : 18mm, 16mm



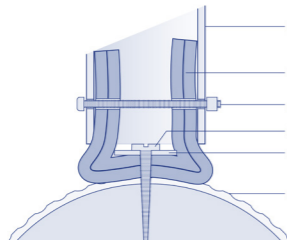
7. Chaîne
Resist. max. traction : +65kg
RCM : 65kg (+60h)
Déformation : 1mm
Compatibilité : 18mm



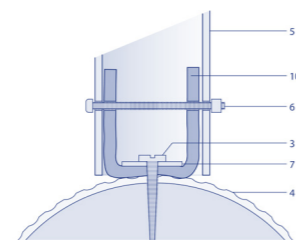
8. Bande perforée rectangle
Resist. max. traction : +65kg
RCM : 65kg (+60h)
Déformation : Négligeable
Compatibilité : 18mm



9. Rondelle épaissie
Resist. max. traction : 46kg
RCM : 31kg (16h)
Déformation : 24mm
Compatibilité : 18mm, 16mm



10. Double Gaine
Resist. max. traction : 57kg
RCM : Non testé
Déformation : 17mm
Compatibilité : 18mm



11. Gaine enfoncée
Resist. max. traction : 41kg
RCM : Non testé
Déformation : Non testé
Compatibilité : 18mm, 16mm

- 1. Tube PVC thermodéformable
- 2. Gaine «noire» (ép. 1mm)
- 3. Vis
- 4. Balle de golf
- 5. Bâton de ski

- 6. Boulon
- 7. Rondelle
- 8. Vis à tête plate
- 9. Goupille en épingle
- 10. Gaine «transparente» (ép. 2mm)

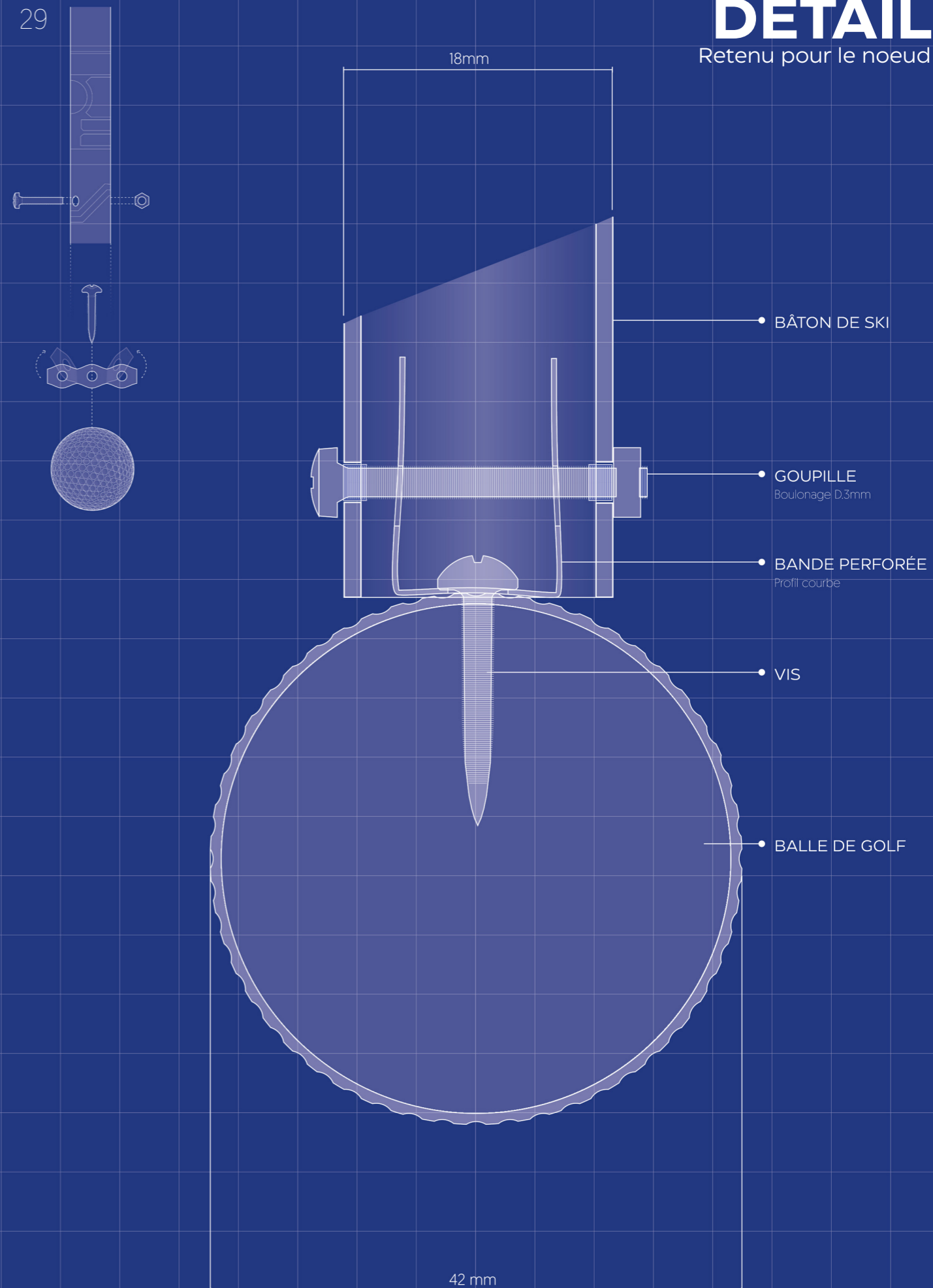
- 11. Chaîne métallique
- 12. Bande perforée rectangulaire
- 13. Gaine «transparente» doublée
- 14. Rondelle épaisse

28

29

DÉTAIL

Retenu pour le noeud



COMPORTEMENT

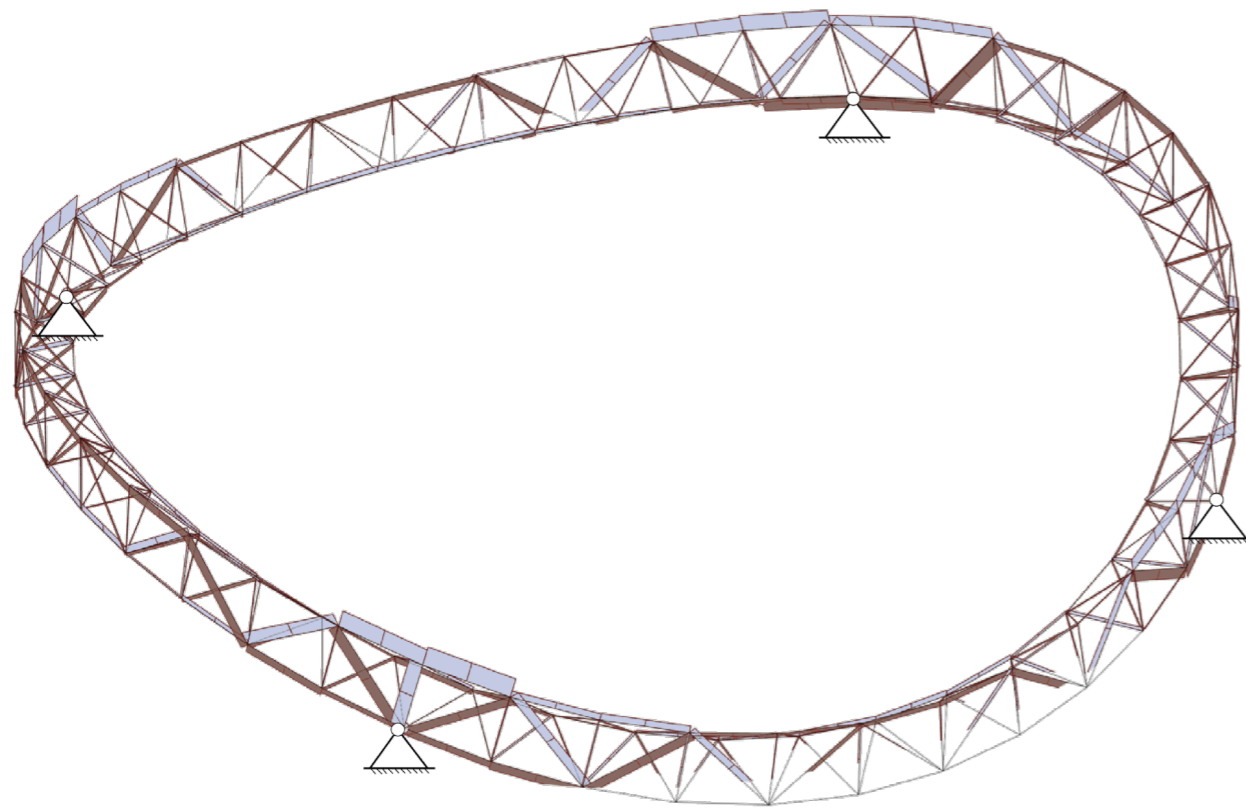
aux forces appliquées

30

En complément des essais physiques réalisés en situation réelle, une série de tests numériques a été menée à l'aide du logiciel Karamba, intégré à une modélisation 3D réalisée sous Rhinoceros. Cette démarche vise à analyser le comportement structurel du treillis et à déterminer les efforts internes maximaux s'exerçant sur les éléments, aussi bien en traction qu'en compression.

La modélisation numérique permet de simuler les conditions de chargement appliquées au projet et d'obtenir les valeurs des forces maximales transmises aux barres et aux nœuds du treillis. Ces résultats constituent une base de comparaison avec les essais expérimentaux, notamment les tests de traction réalisés sur les assemblages en situation réelle.

La confrontation entre les données issues de la simulation numérique et celles obtenues par les essais physiques permet de vérifier la cohérence des ordres de grandeur, de valider la pertinence du protocole expérimental, et d'identifier les zones les plus sollicitées du treillis. Cette approche croisée renforce la fiabilité du dimensionnement des assemblages et de la résistance des nœuds du treillis.



Treillis poids propre: 50 kg

Traction : 0,51 kN = 51 kg

Compression : -0,19 kN = 19 kg

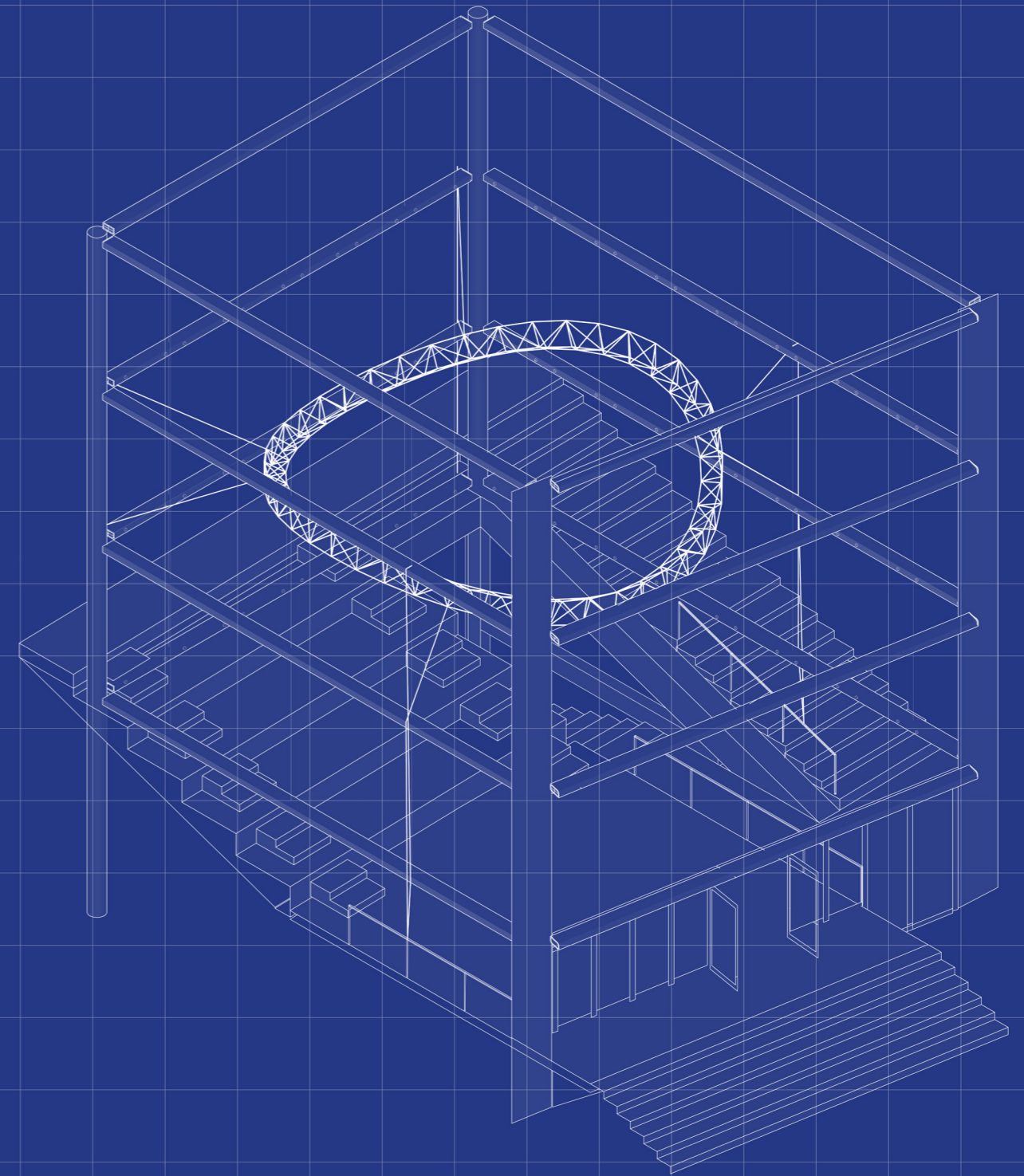
Analyse des efforts internes du treillis

Représentation des sollicitations mécaniques issues de la modélisation numérique : les éléments soumis principalement à la traction sont indiqués en bleu, tandis que les éléments travaillant en compression sont représentés en rouge.

31

CONTEXTE

imaginé pour l'étude des forces



III. MISE EN ŒUVRE

32

L'utilisation de matériaux normés, mais initialement conçus pour des usages différents de la construction, pose des défis techniques et méthodologiques importants. Bien que répondant à des standards industriels précis, ces matériaux nécessitent souvent des adaptations pour être intégrés à des systèmes constructifs, générant des phases supplémentaires d'étude, de prototypage et d'ajustement. L'enjeu principal réside alors dans la maîtrise du temps et du travail mobilisé, afin d'éviter que l'innovation ne se traduise par une surcharge opérationnelle. La rationalisation des processus devient un levier essentiel pour réduire les interventions sur chantier. En clarifiant en amont les modes de mise en œuvre, il est possible de transformer ces matériaux contraignants en ressources efficaces, conciliant exigences normatives, faisabilité technique et économie de projet.

33



BUDGET

par chefs de dépense

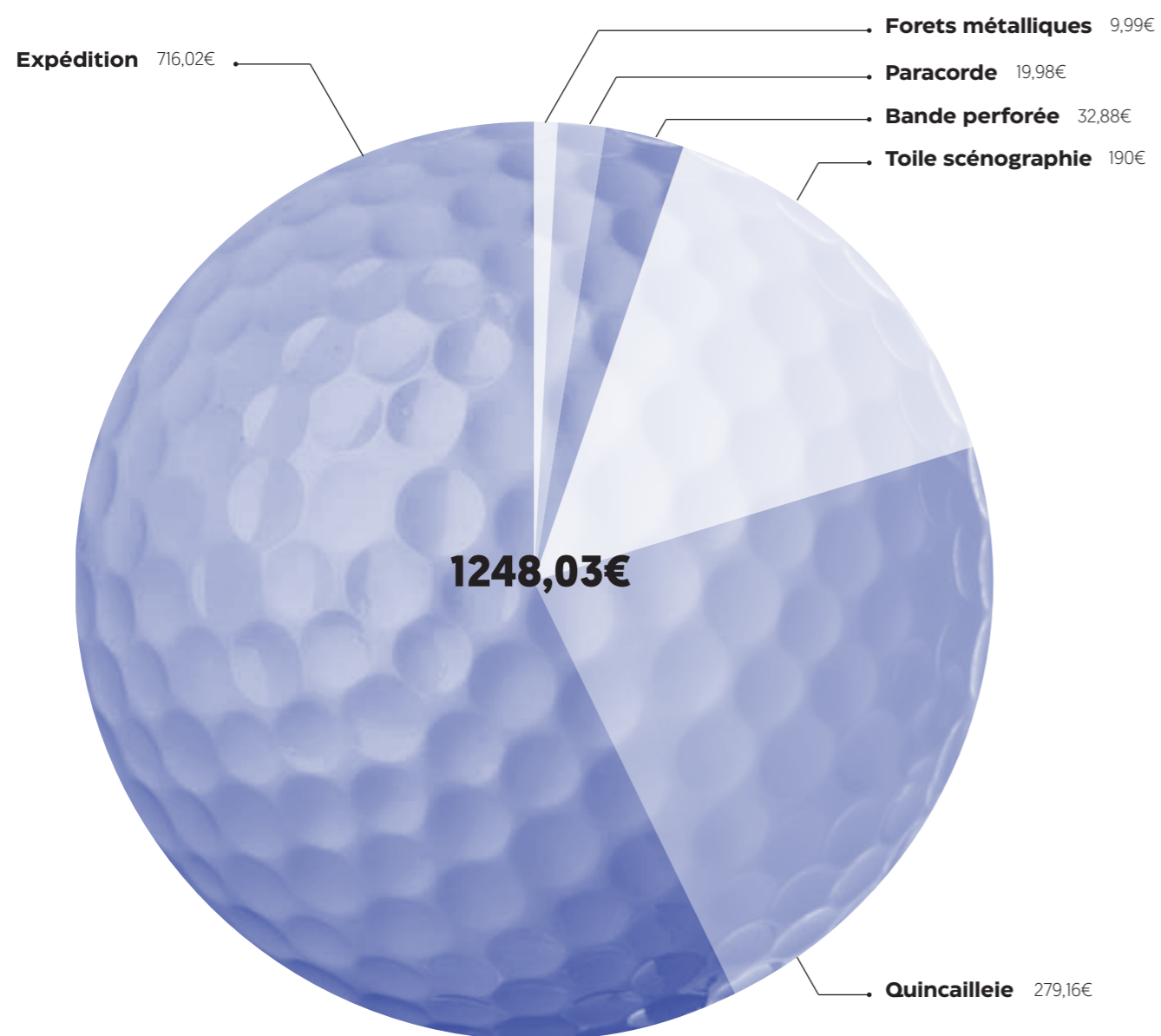
34

L'expédition bâton a représenté le premier post de dépense avec une part de 57% du budget total. Cette somme est partagée entre les frais de location d'un véhicule utilitaire à 358€, l'essence de l'aller-retour Champs-sur-Marne-Chamonix et des déplacements entre chaque magasin de location des stations de haute-savoie à 112,70€, Les péages à 148,99€, et les autres frais (hôtel, parking entretiens véhicule...) à 95,33€.

La quincaillerie représente le deuxième poste de dépense important soit 22% du total, il comprend 1000 vis en acier à 43,60€, 800 boulons 236,36€, et des forets de perçage à 9,99€.

Les 32 m de bande perforée à 32,88€ se sont révélés être la solution d'assemblage la plus économique par rapport aux assemblages en gaines plastiques ou chaînes.

Les autres postes de dépense qui représentent 219,97€ soit 17% du budget correspondent au contexte d'implantation et aux choix de scénographie et ne représentent pas une charge strictement nécessaire à la réalisation du treillis.



35

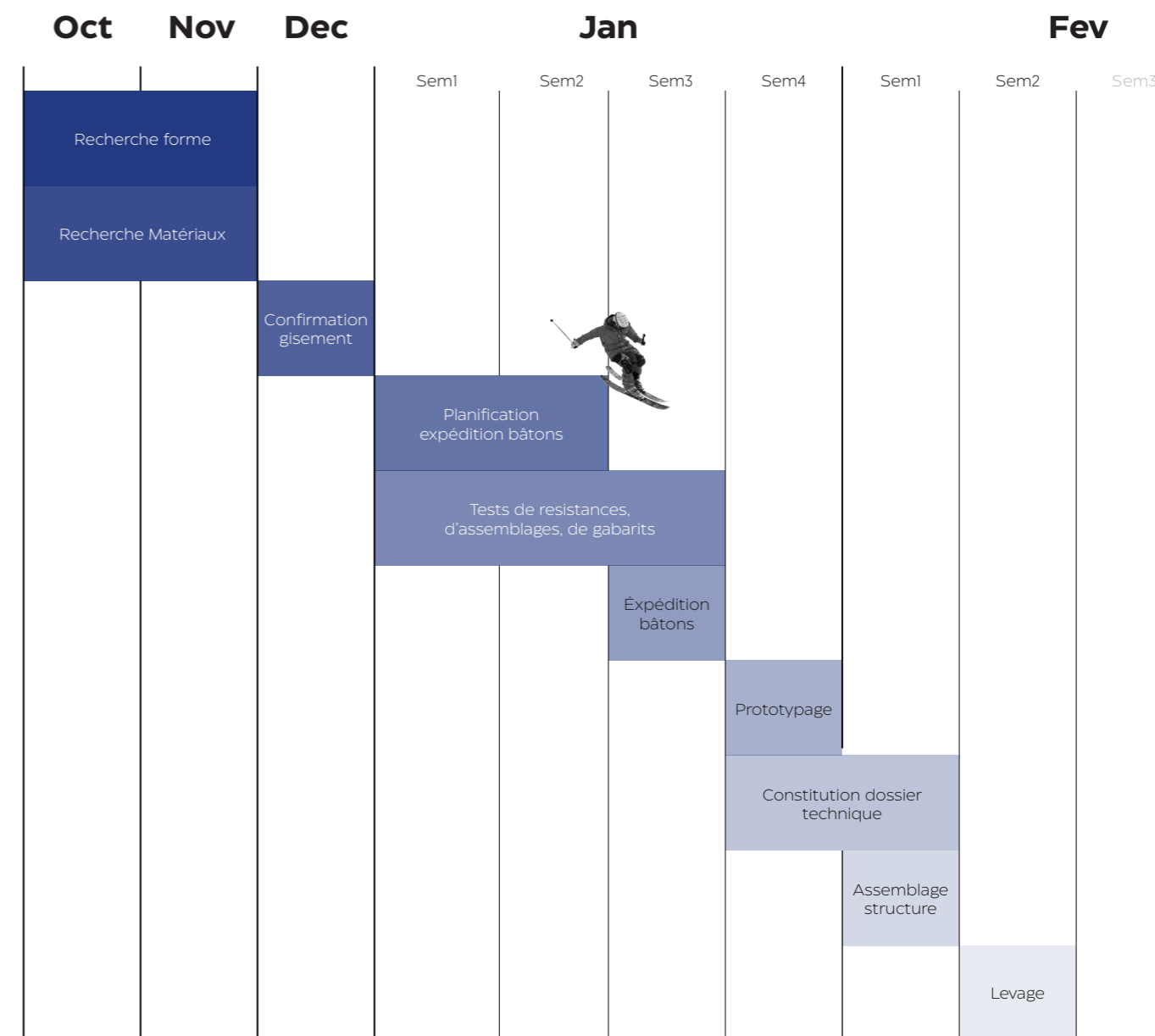
PHASAGE

par semaines

Les trois premiers mois de projet ont été dédiés à l'élaboration de la forme et la recherche de matière première, le démarchage de potentiels fournisseurs d'éléments destinés à être jetés. Cette phase a pris fin mi décembre mais s'est brièvement rouverte début janvier lorsque notre unique fournisseur de bâton s'est finalement rétracté.

Après quelque 80 appels à des loueurs de ski suffisamment rapprochés entre eux et une très rapide organisation du voyage nous sommes parvenus à trouver une solution d'approvisionnement dans les temps et à progresser dans les tests à la traction en parallèle.

Le montage intégral des quarts de structure a été réalisé en 4 jours de travail à trois personnes.



OUTILS

utilisés pour la mise en oeuvre des barres

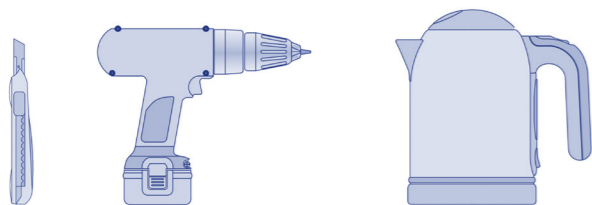
36

Etape 1 : Dépose des éléments rapportés

La préparation débute par le retrait de la dragonne et de la poignée.

La dragonne est retirée soit par dévissage des vis situées dans la poignée, soit par découpe directe au cutter lorsque le démontage n'est pas possible.

La poignée est ensuite extraite après immersion du bâton dans de l'eau bouillante pendant environ cinq minutes afin de ramollir la colle et faciliter son retrait sans détériorer la barre.

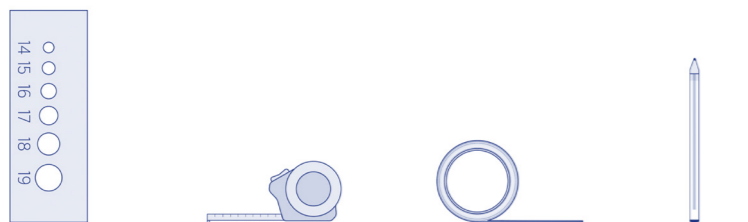


Cutter Perceuse électrique Bouilloire

Etape 2 : Tri et étiquetage

Les barres sont triées selon le diamètre de leur section la plus large. Un gabarit de contrôle, répertoriant les différentes sections rencontrées, permet de ne conserver que les éléments présentant un diamètre de 18 mm, compatible avec le système constructif retenu.

Chaque barre sélectionnée est ensuite étiquetée en fonction de sa longueur et de la nomenclature établie pour le montage, afin de permettre son repérage précis dans la structure (voir page ...)

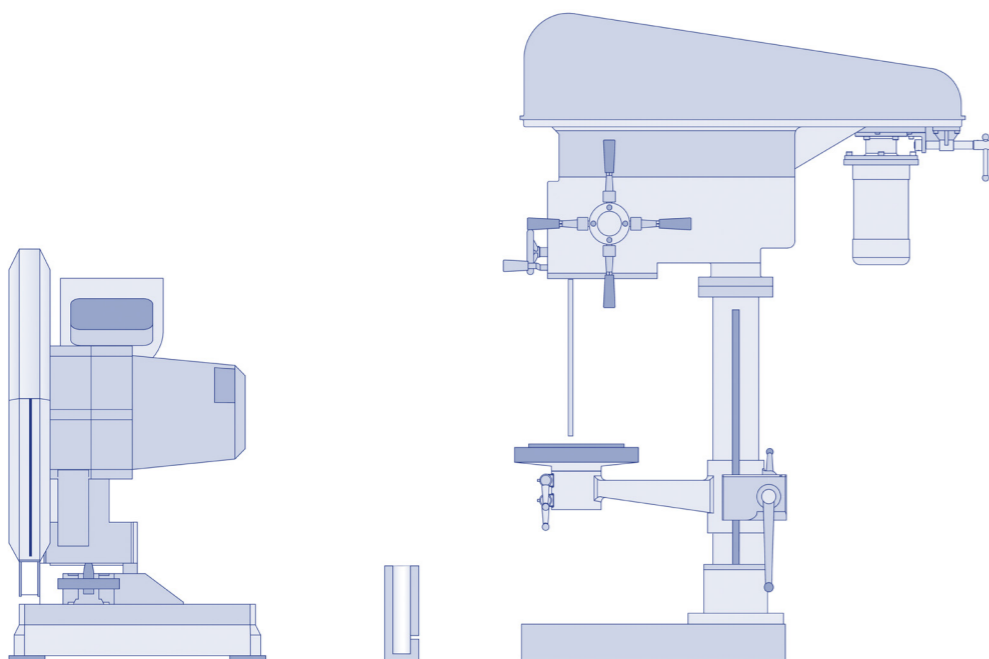


Gabarit de section Mètre ruban Ruban adhésif Marqueur

Etape 3 : Découpage et perçage

Les barres sont mises à longueur à l'aide d'une scie à onglet radiale.

Un perçage latéral de 5 mm de diamètre est réalisé à 12,5 mm de chaque extrémité de la barre grâce à un guide de peçage. Les deux extrémités sont percées afin de permettre l'assemblage mécanique avec les nœuds et les éléments de liaison.

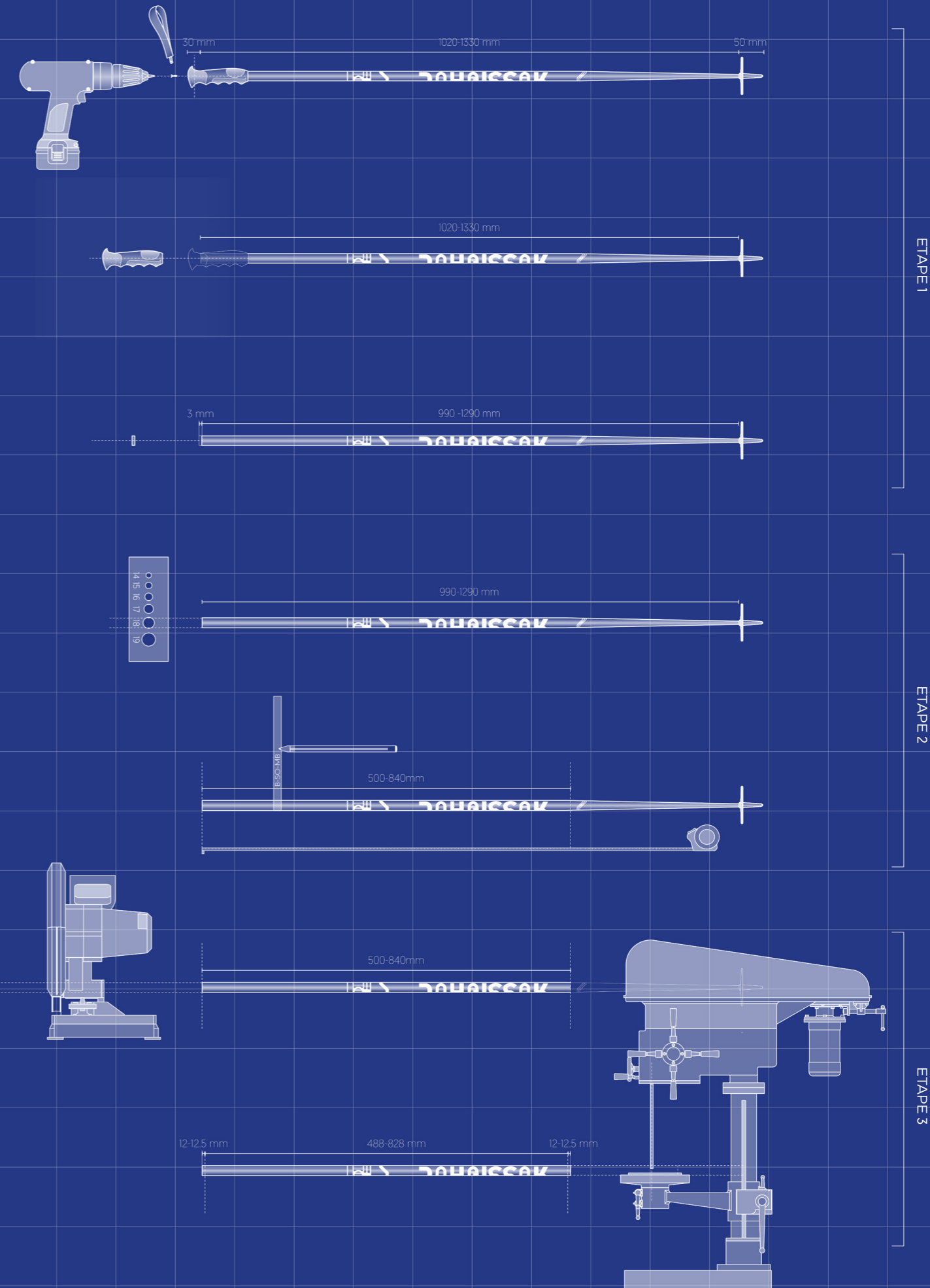


Scie à onglet radiale Guide de perçage Perceuse à colonne

37

CHAÎNE

de transformations des bâtons en barres



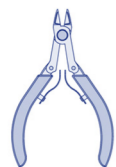
OUTILS

utilisés pour la mise en oeuvre des noeuds

38

Etape 1 : Découpe des éléments de jonction

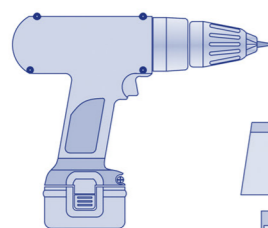
La bande perforée est découpée en segments de trois maillons, correspondant à une longueur de 36 mm. Ces éléments servent de pièces de jonction entre les barres du treillis et les noeuds.



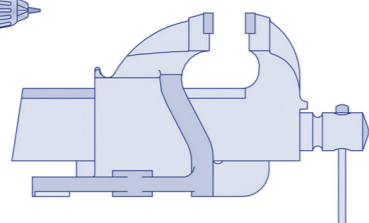
Pince coupante

Etape 2 : Perçage des noeuds

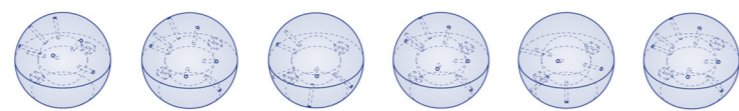
Le perçage des noeuds est réalisé à l'aide de six gabarits de guidage, modélisés sur Rhinocéros puis fabriqués par impression 3D. Ces gabarits assurent un positionnement précis et standard des perçages. Les 126 noeuds sont ainsi percés de 30 mm à la perceuse, avec un diamètre de perçage de 2 mm.



Perceuse électrique



Étau



Gabarits de perçage

Etape 3 : Repérage des perçages

Chaque noeud est ensuite étiqueté afin d'être identifié lors du montage de la structure. L'un des trous est également repéré pour indiquer le sens d'orientation du noeud, indispensable à la mise en oeuvre correcte du treillis.



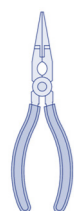
Ruban adhésif



Marqueur

Etape 4 : Pré-assemblage des noeuds

Les segments de bande perforée sont fixés aux noeuds par vissage du maillon central dans les trous percés. La bande est ensuite pliée à l'aide d'une pince pliante afin de former un profil en U, prêt à recevoir les barres lors de l'assemblage de la structure.



Pince pliante



Bande perforée



Vis

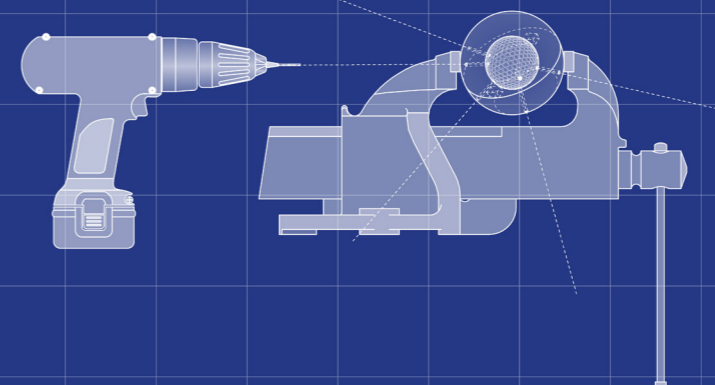
39

CHAÎNE

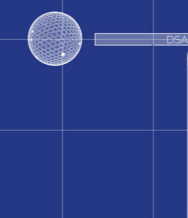
de transformations des balles de golf en noeuds



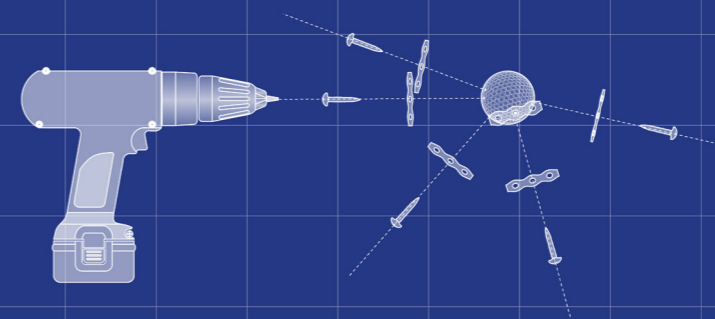
ETAPE 1



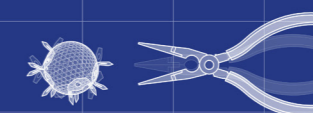
ETAPE 2



ETAPE 3



ETAPE 4



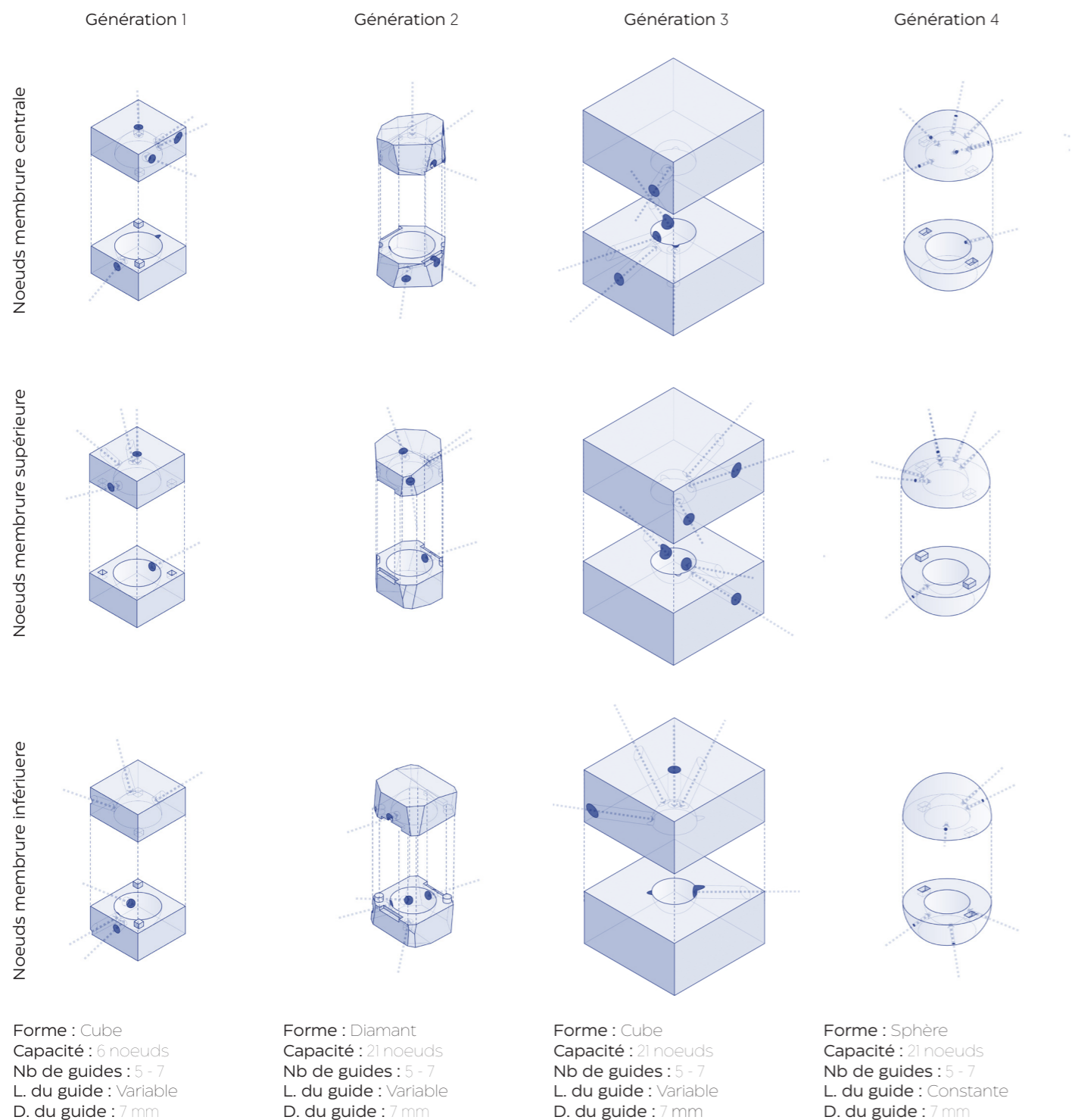
OPTIMISATION

des gabarits de pré-perçage des noeuds

Le repérage visuel des axes de perçage a rapidement montré ses limites pour percer les balles de golf selon les angles précis imposés par la géométrie du treillis. Afin de garantir la répétabilité et la précision du perçage, l'idée d'utiliser des gabarits de pré-perçage imprimés en 3D s'est imposée.

Les contraintes de temps liées à l'impression 3D — entre 3 et 6 heures par gabarit — ont rapidement orienté le travail vers le développement de gabarits à forte capacité, capables de produire le plus grand nombre possible de noeuds différents à partir d'un même outil. La première génération comptait 36 gabarits, chacun permettant de percer 6 noeuds, un résultat jugé insuffisant.

Cette limite a conduit à un redessin de la structure, visant à rationaliser les angles des noeuds à l'échelle de l'ensemble du treillis. Les angles des noeuds de la membrure centrale, de la membrure supérieure et de la membrure inférieure ont ainsi été rapprochés, avec un écart angulaire moyen d'environ 4°. L'assemblage tolérant un jeu angulaire supérieur à cette valeur, cette rationalisation a permis de réduire le nombre de gabarits nécessaires.



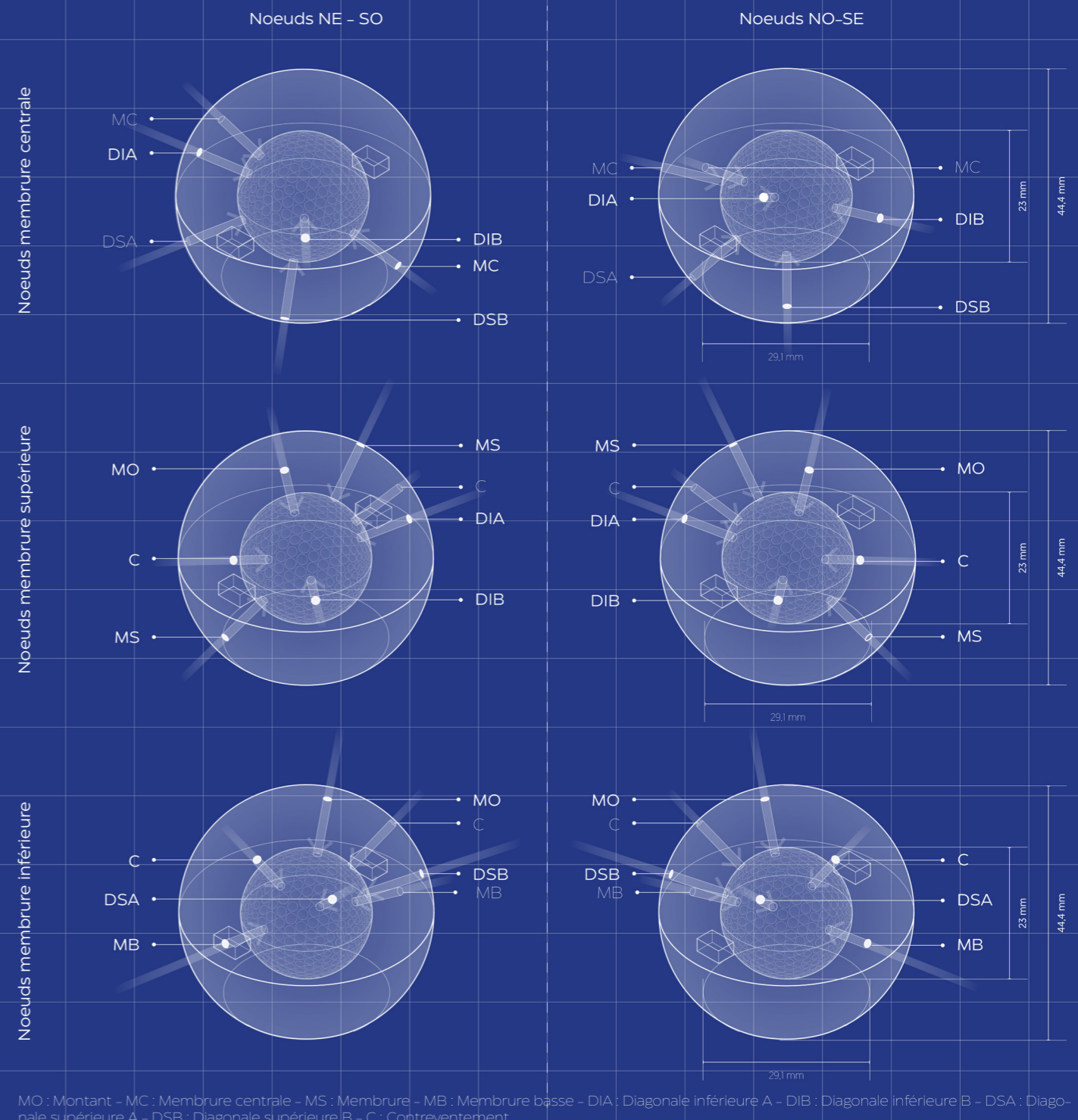
GABARITS

de pré-perçage des balles de golf retenus

À l'issue de cette rationalisation, un seul gabarit de perçage est utilisé pour chaque type de noeud :
 – noeud de la membrure centrale (MC) – noeud de la membrure supérieure (MS) – noeud de la membrure inférieure (MB).
 La géométrie de la paraboloïde hyperbolique induisant une symétrie globale de la structure, chacun de ces trois gabarits a été décliné en version symétrique, conduisant à un total de six gabarits, dès la deuxième génération.

Plusieurs géométries de gabarits ont été testées — boîtes cubiques ou diamanté (adaptée à une perceuse à colonne) mais ces solutions ont rapidement montré leurs limites, la longueur du guide de perçage variant selon la géométrie du gabarit. Or, le perçage des noeuds impose une profondeur constante.

Le choix s'est finalement porté sur un gabarit sphérique, pour lequel la longueur du guide de perçage reste constante, fixée à 20 mm. Cette solution garantit à la fois la précision angulaire, la répétabilité du perçage et la fiabilité du processus de fabrication des noeuds.



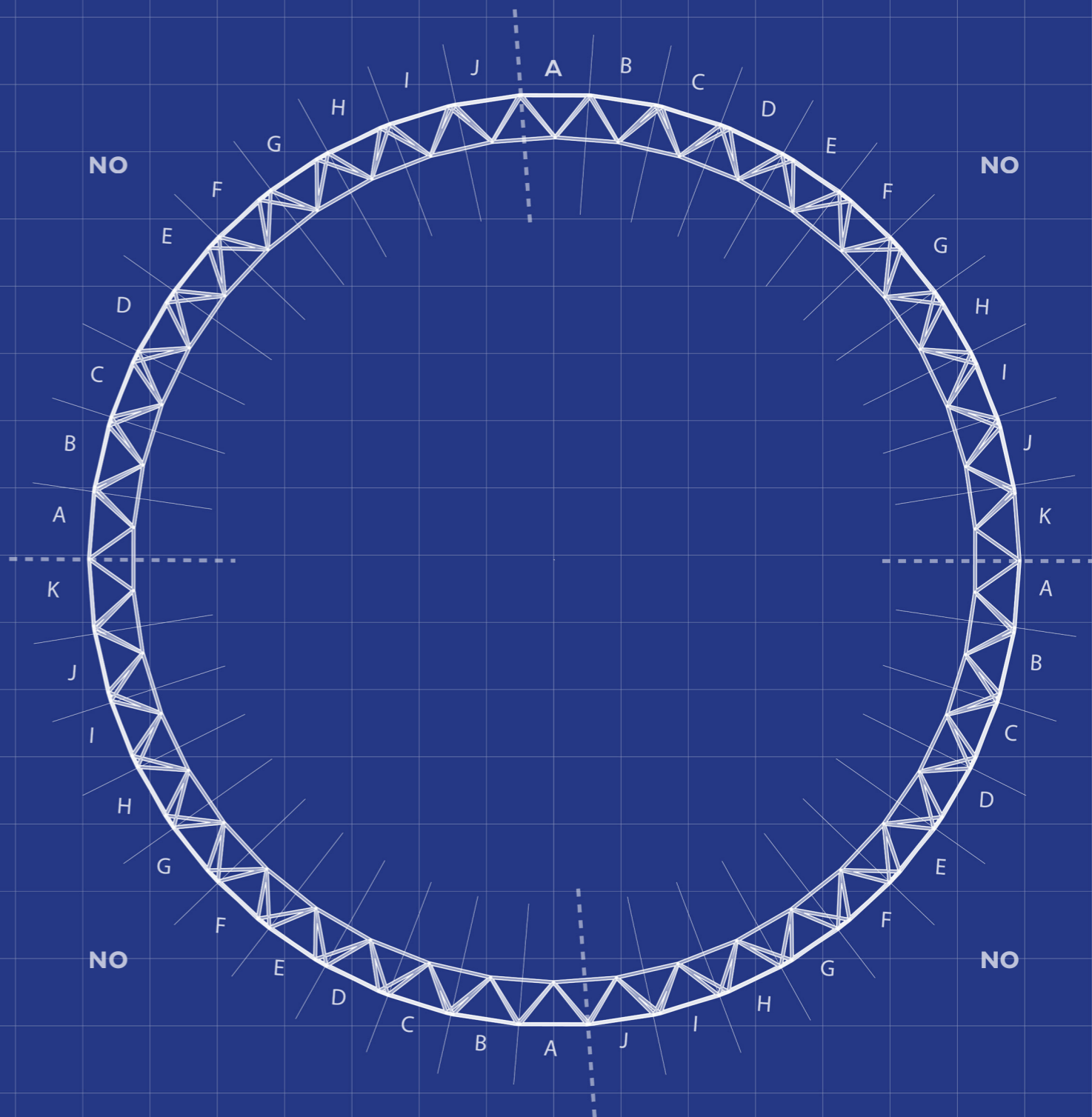
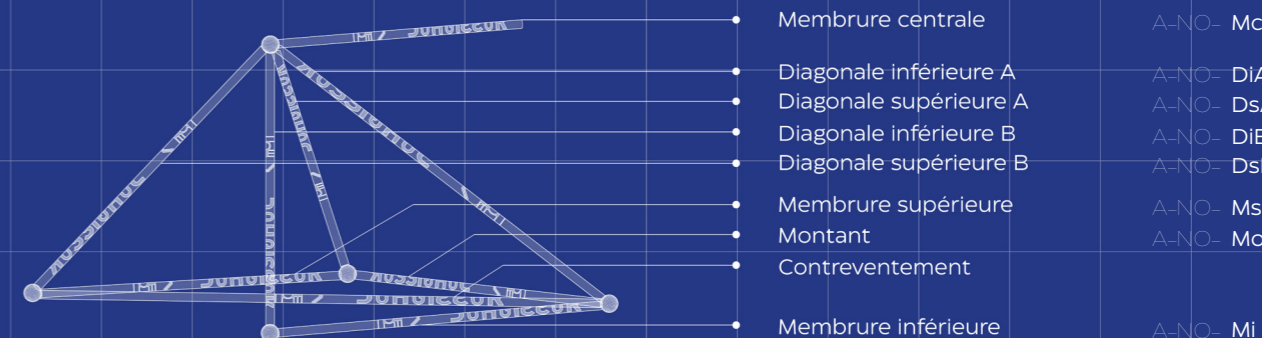
TYPES DE BARRES

Tableau exhaustif ces longueurs de barres en millimètres

SO-A-Mc	541	SO-A-Mi	624	NO-E-Dib	533	NE-H-Dsb	553	SE-F-Mo	542
SO-B-Mc	543	SO-B-Ms	626	NO-F-Dib	528	NE-I-Dsb	548	SE-G-Mo	544
SO-C-Mc	547	SO-C-Ms	626	NO-G-Dib	522	NE-J-Dsb	545	SE-H-Mo	548
SO-D-Mc	552	SO-D-Ms	627	NO-H-Dib	516	NE-K-Dsb	544	SE-I-Mo	554
SO-E-Mc	557	SO-E-Ms	626	NO-I-Dib	510	NE-A-Dsb	545	SE-J-Mo	558
SO-F-Mc	559	SO-F-Ms	623	NO-J-Dib	504	NE-B-Dia	499	SE-B-Dsa	544
SO-G-Mc	558	SO-G-Ms	618	NO-A-Dib	499	NE-C-Dia	504	SE-C-Dsa	545
SO-H-Mc	554	SO-H-Ms	610	NO-B-Mi	625	NE-D-Dia	510	SE-D-Dsa	548
SO-I-Mc	549	SO-I-Ms	600	NO-C-Mi	626	NE-E-Dia	516	SE-E-Dsa	553
SO-J-Mc	545	SO-J-Ms	591	NO-D-Mi	627	NE-F-Dia	522	SE-F-Dsa	560
SO-K-Mc	542	SO-K-Ms	585	NO-E-Mi	626	NE-G-Dia	528	SE-G-Dsa	568
SO-A-Mo	559	SO-A-Ms	582	NO-F-Mi	622	NE-H-Dia	533	SE-H-Dsa	577
SO-B-Mo	558	SO-B-C	839	NO-G-Mi	615	NE-I-Dia	537	SE-I-Dsa	586
SO-C-Mo	554	SO-C-C	838	NO-H-Mi	605	NE-J-Dia	542	SE-J-Dsa	595
SO-D-Mo	548	SO-D-C	840	NO-I-Mi	595	NE-K-Dia	545	SE-A-Dsa	602
SO-E-Mo	544	SO-E-C	839	NO-J-Mi	587	NE-A-Dia	547	SE-B-Dsb	548
SO-F-Mo	542	SO-F-C	840	NO-A-Mi	582	NE-B-Dib	497	SE-C-Dsb	554
SO-G-Mo	542	SO-G-C	842	NO-B-Ms	585	NE-C-Dib	497	SE-D-Dsb	561
SO-H-Mo	546	SO-H-C	838	NO-C-Ms	591	NE-D-Dib	500	SE-E-Dsb	570
SO-I-Mo	551	SO-I-C	842	NO-D-Ms	600	NE-E-Dib	506	SE-F-Dsb	580
SO-J-Mo	556	SO-J-C	837	NO-E-Ms	610	NE-F-Dib	513	SE-G-Dsb	589
SO-K-Mo	559	SO-K-C	840	NO-F-Ms	618	NE-G-Dib	522	SE-H-Dsb	598
SO-B-Dsa	606	SO-A-C	839	NO-G-Ms	623	NE-H-Dib	531	SE-I-Dsb	604
SO-C-Dsa	607	NO-A-Mc	542	NO-H-Ms	626	NE-I-Dib	538	SE-J-Dsb	607
SO-D-Dsa	604	NO-B-Mc	545	NO-I-Ms	627	NE-J-Dib	544	SE-A-Dsb	606
SO-E-Dsa	598	NO-C-Mc	549	NO-J-Ms	626	NE-K-Dib	547	SE-B-Dia	547
SO-F-Dsa	589	NO-D-Mc	554	NO-A-Ms	626	NE-A-Dib	547	SE-C-Dia	544
SO-G-Dsa	580	NO-E-Mc	558	NO-B-C	838	NE-B-Mi	582	SE-D-Dia	538
SO-H-Dsa	570	NO-F-Mc	559	NO-C-C	842	NE-C-Mi	587	SE-E-Dia	531
SO-I-Dsa	561	NO-G-Mc	557	NO-D-C	837	NE-D-Mi	595	SE-F-Dia	522
SO-J-Dsa	554	NO-H-Mc	552	NO-E-C	842	NE-E-Mi	605	SE-G-Dia	513
SO-K-Dsa	548	NO-I-Mc	547	NO-F-C	839	NE-F-Mi	615	SE-H-Dia	506
SO-A-Dsa	545	NO-J-Mc	543	NO-G-C	840	NE-G-Mi	622	SE-I-Dia	500
SO-B-Dsb	602	NO-A-Mo	559	NO-H-C	840	NE-H-Mi	626	SE-J-Dia	497
SO-C-Dsb	595	NO-B-Mo	556	NO-I-C	838	NE-I-Mi	627	SE-A-Dia	497
SO-D-Dsb	586	NO-C-Mo	551	NO-J-C	840	NE-J-Mi	626	SE-B-Dib	545
SO-E-Dsb	577	NO-D-Mo	546	NO-A-C	839	NE-K-Mi	625	SE-C-Dib	542
SO-F-Dsb	568	NO-E-Mo	542	NE-A-Mc	541	NE-A-Mi	624	SE-D-Dib	537
SO-G-Dsb	560	NO-F-Mo	542	NE-B-Mc	543	NE-B-Ms	626	SE-E-Dib	533
SO-H-Dsb	553	NO-G-Mo	544	NE-C-Mc	547	NE-C-Ms	626	SE-F-Dib	528
SO-I-Dsb	548	NO-H-Mo	548	NE-D-Mc	552	NE-D-Ms	627	SE-G-Dib	522
SO-J-Dsb	545	NO-I-Mo	554	NE-E-Mc	557	NE-E-Ms	626	SE-H-Dib	516
SO-K-Dsb	544	NO-J-Mo	558	NE-F-Mc	559	NE-F-Ms	623	SE-I-Dib	510
SO-A-Dsb	545	NO-B-Dsa	544	NE-G-Mc	558	NE-G-Ms	618	SE-J-Dib	504
SO-B-Dia	499	NO-C-Dsa	545	NE-H-Mc	554	NE-H-Ms	610	SE-A-Dib	499
SO-C-Dia	504	NO-D-Dsa	548	NE-I-Mc	549	NE-I-Ms	600	SE-B-Mi	625
SO-D-Dia	510	NO-E-Dsa	553	NE-J-Mc	545	NE-J-Ms	591	SE-C-Mi	626
SO-E-Dia	516	NO-F-Dsa	560	NE-K-Mc	542	NE-K-Ms	585	SE-D-Mi	627
SO-F-Dia	522	NO-G-Dsa	568	NE-A-Mo	559	NE-A-Ms	582	SE-E-Mi	626
SO-G-Dia	528	NO-H-Dsa	577	NE-B-Mo	558	NE-B-C	839	SE-F-Mi	622
SO-H-Dia	533	NO-I-Dsa	586	NE-C-Mo	554	NE-C-C	840	SE-G-Mi	615
SO-I-Dia	537	NO-J-Dsa	595	NE-D-Mo	548	NE-D-C	838	SE-H-Mi	605
SO-J-Dia	542	NO-A-Dsa	602	NE-E-Mo	544	NE-E-C	840	SE-I-Mi	595
SO-K-Dia	545	NO-B-Dsb	548	NE-F-Mo	542	NE-F-C	840	SE-J-Mi	587
SO-A-Dia	547	NO-C-Dsb	554	NE-G-Mo	542	NE-G-C	839	SE-A-Mi	582
SO-B-Dib	497	NO-D-Dsb	561	NE-H-Mo	546	NE-H-C	842	SE-B-Ms	585
SO-C-Dib	497	NO-E-Dsb	570	NE-I-Mo	551	NE-I-C	837	SE-C-Ms	591
SO-D-Dib	500	NO-F-Dsb	580	NE-J-Mo	556	NE-J-C	842	SE-D-Ms	600
SO-E-Dib	506	NO-G-Dsb	589	NE-K-Mo	559	NE-K-C	838	SE-E-Ms	610
SO-F-Dib	513	NO-H-Dsb	598	NE-B-Dsa	606	NE-A-C	839	SE-F-Ms	618
SO-G-Dib	522	NO-I-Dsb	604	NE-C-Dsa	607	X Æ A-Xii	405	SE-G-Ms	623
SO-H-Dib	531	NO-J-Dsb	607	NE-D-Dsa	604	SE-A-Mc	542	SE-H-Ms	626
SO-I-Dib	538	NO-A-Dsb	606	NE-E-Dsa	598	SE-B-Mc	545	SE-I-Ms	627
SO-J-Dib	544	NO-B-Dia	547	NE-F-Dsa	589	SE-C-Mc	549	SE-J-Ms	626
SO-K-Dib	547	NO-C-Dia	544	NE-G-Dsa	580	SE-D-Mc	554	SE-A-Ms	626
SO-A-Dib	547	NO-D-Dia	538	NE-H-Dsa	570	SE-E-Mc	558	SE-B-C	840
SO-B-Mi	582	NO-E-Dia	531	NE-I-Dsa	561	SE-F-Mc	559	SE-C-C	837
SO-C-Mi	587	NO-F-Dia	522	NE-J-Dsa	554	SE-G-Mc	557	SE-D-C	842
SO-D-Mi	595	NO-G-Dia	513	NE-K-Dsa	548	SE-H-Mc	552	SE-E-C	838
SO-E-Mi	605	NO-H-Dia	506	NE-A-Dsa	545	SE-I-Mc	547	SE-F-C	842
SO-F-Mi	615	NO-I-Dia	500	NE-B-Dsb	602	SE-J-Mc	543	SE-G-C	840
SO-G-Mi	622	NO-J-Dia	497	NE-C-Dsb	595	SE-A-Mo	559	SE-H-C	839
SO-H-Mi	626	NO-A-Dia	497	NE-D-Dsb	586	SE-B-Mo	556	SE-I-C	840
SO-I-Mi	627	NO-B-Dib	545	NE-E-Dsb	577	SE-C-Mo	551	SE-J-C	838
SO-J-Mi	626	NO-C-Dib	542	NE-F-Dsb	568	SE-D-Mo	546	SE-A-C	839
SO-K-Mi	625	NO-D-Dib	537	NE-G-Dsb	560	SE-E-Mo	542		

NOMENCLATURE

Plan nomenclature

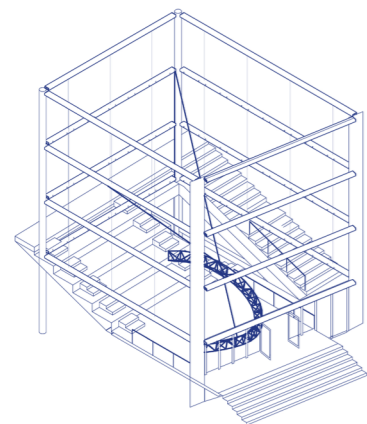


LEVAGE

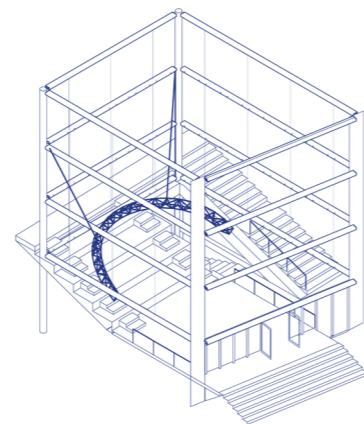
et suspension à la structure existante

L'espace au cœur de l'ossature métallique pré-existante est partagée entre une partie plate de 7m par 6m et un gradin praticable de 7m par 4m, accessibles mais insuffisants pour accueillir la structure entière à plat, et un escalier de secours plus d'un mètre plus bas, protégé par des gardes corps. L'enjeu de l'assemblage final est donc de positionner la structure de manière à pouvoir assembler les quarts depuis le sol en garantissant la sécurité du chantier.

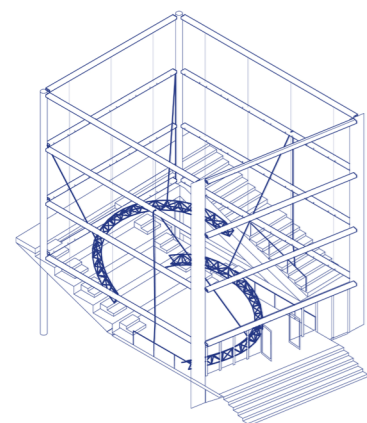
44



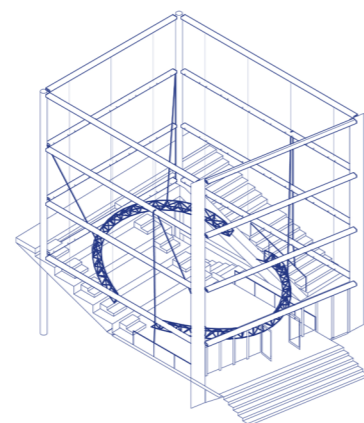
1. Assemblage des deux quarts nord à plat sur la terrasse. Sécurité à l'aide de cordes.



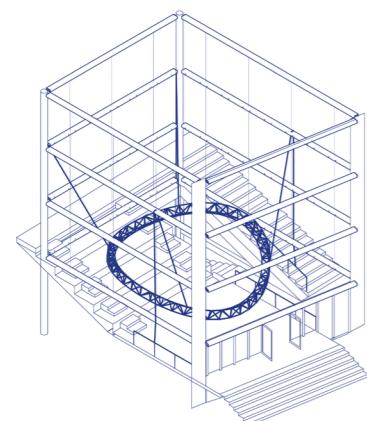
2. Déplacement sur les gradins, et en surplomb des escaliers en direction du parking. Verrouillage au moyen de cordes.



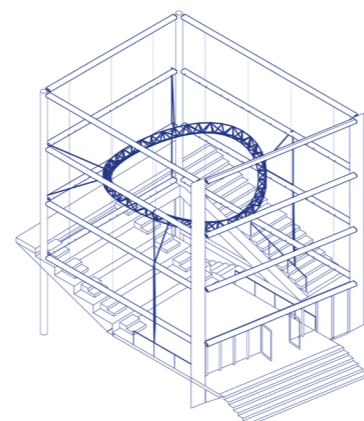
3. Assemblage des deux quarts sud à plat sur la terrasse. Sécurité à l'aide des cordes.



4. Suspension de la moitié sud sur la terrasse de l'atrium et en surplomb de la terrasse de l'entrée. Verrouillage au moyen de cordes.



5. Assemblage des deux moitiés portée manuellement et sécurisée par leurs cordes de suspension.



6. Suspension de la structure. Sécurité aux translations verticales au moyen de cordes inférieures.

45

NOEUDS

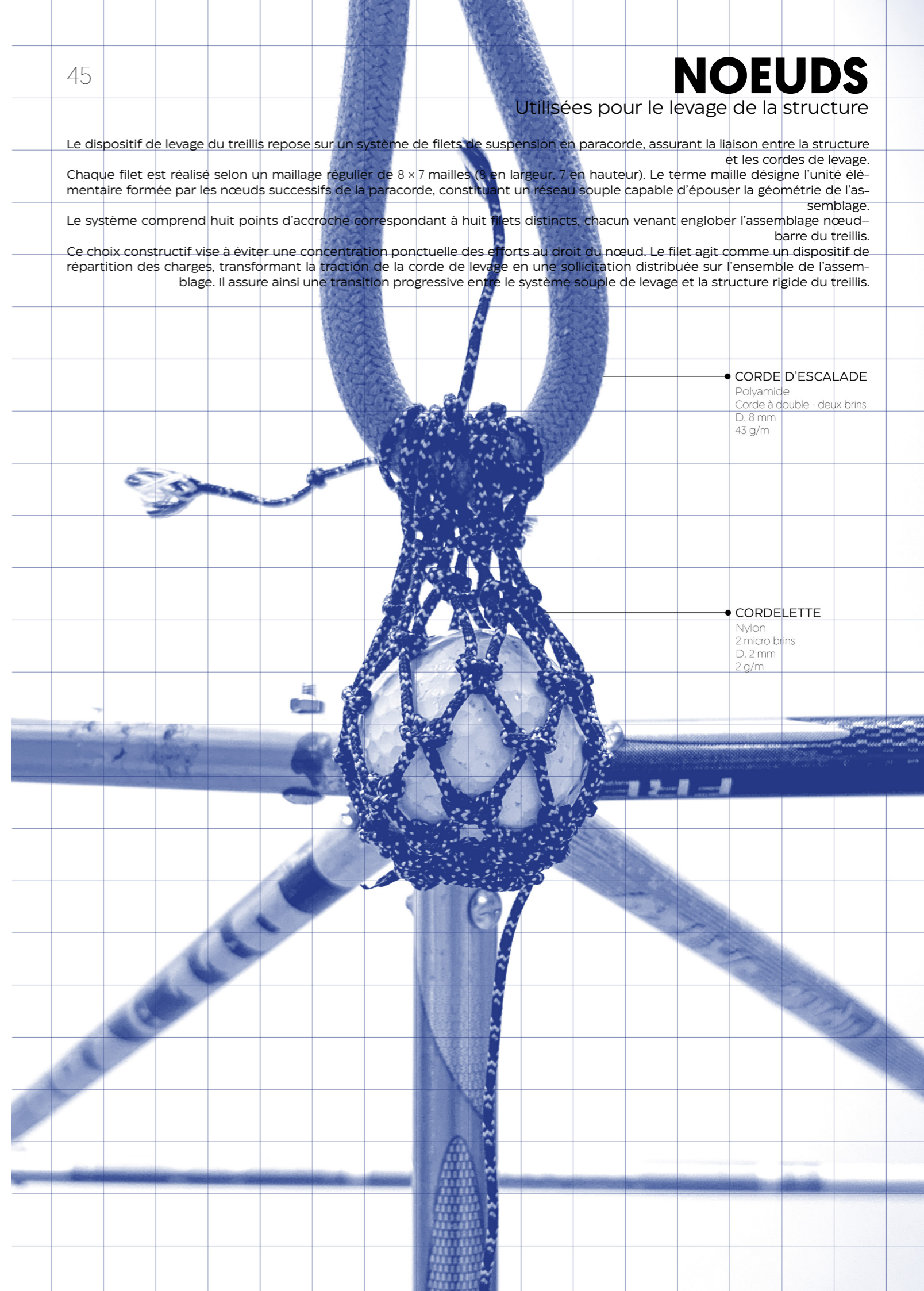
Utilisées pour le levage de la structure

Le dispositif de levage du treillis repose sur un système de filets de suspension en paracorde, assurant la liaison entre la structure et les cordes de levage.

Chaque filet est réalisé selon un maillage régulier de 8 x 7 mailles (8 en largeur, 7 en hauteur). Le terme maille désigne l'unité élémentaire formée par les nœuds successifs de la paracorde, constituant un réseau souple capable d'épouser la géométrie de l'assemblage.

Le système comprend huit points d'accroche correspondant à huit filets distincts, chacun venant englober l'assemblage nœud-barre du treillis.

Ce choix constructif vise à éviter une concentration ponctuelle des efforts au droit du nœud. Le filet agit comme un dispositif de répartition des charges, transformant la traction de la corde de levage en une sollicitation distribuée sur l'ensemble de l'assemblage. Il assure ainsi une transition progressive entre le système souple de levage et la structure rigide du treillis.



CORDE D'ESCALADE

Polyamide
Corde à double - deux brins
D. 8 mm
43 g/m

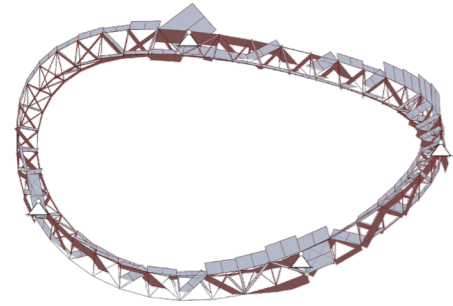
CORDELETTE

Nylon
2 micro brins
D. 2 mm
2 g/m

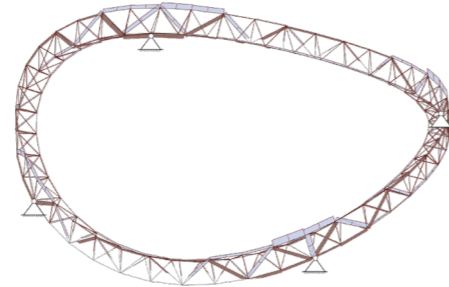
HYPOTHÈSES

de chargement dans d'autres contextes

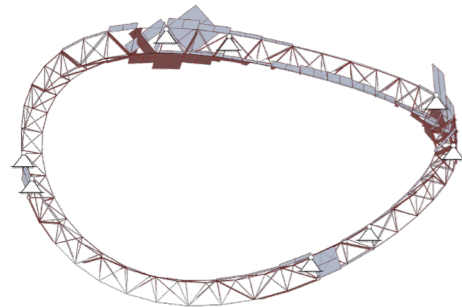
46



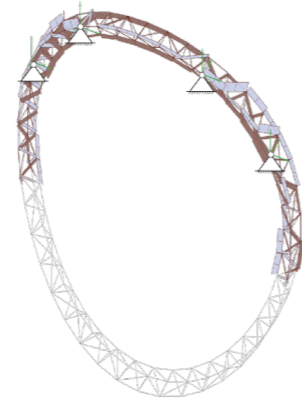
Cimaise
Traction : 1,5 kN = 150 kg
Compression : -1,8 kN = 18 kg



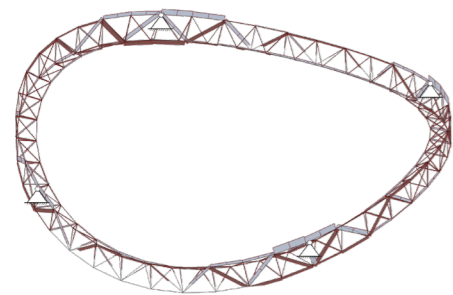
Nappe
Traction: 0,51 kN = 51 kg
Compression : -0,19 kN = 19 kg



Discotheque
Traction : -0,75 kN = 75 kg
Compression : 0,65 kN = 65 kg



DJ-set
Traction : 1,2 kN = 120 kg
Compression : -1,0 = 100 kg

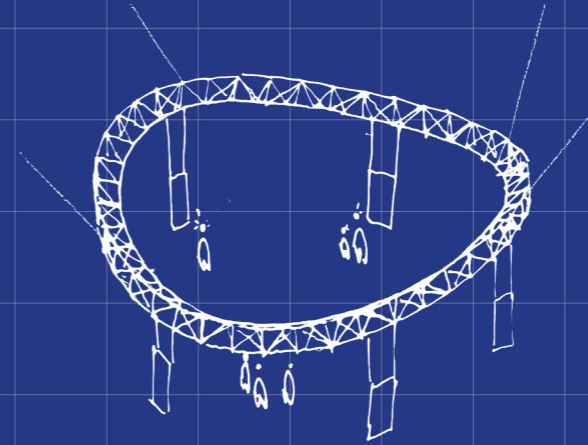


Ombriere
Traction: 0,55 kN = 55 kg
Compression : 0,3 kN = 30 kg

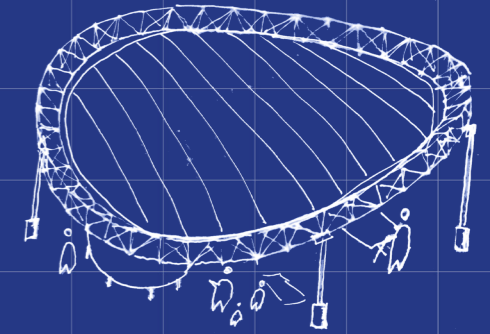
47

FUTURES

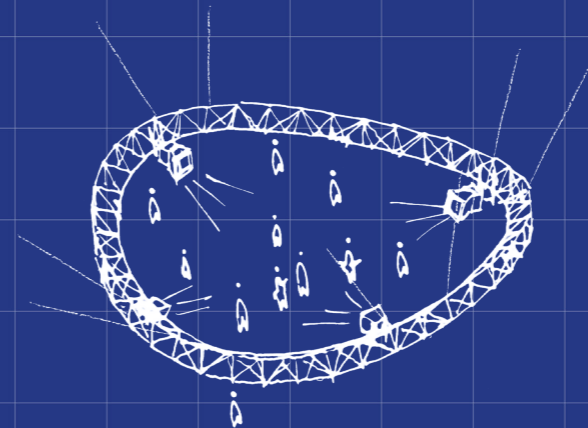
potentielles applications



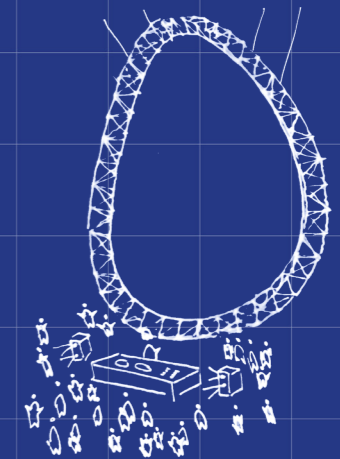
Cimaise
Suspension ponctuelle de panneaux d'exposition.



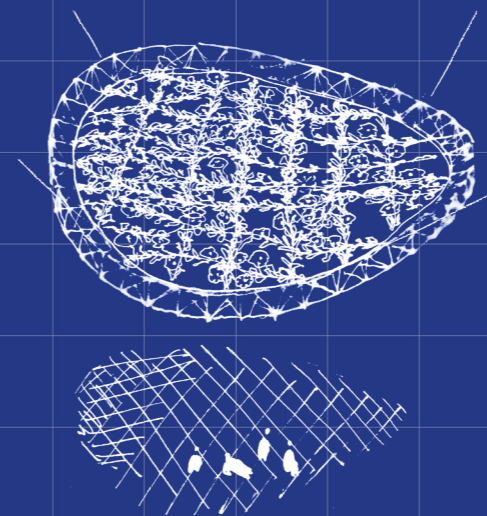
Nappe
Mise en tension d'une membrane textile créant un plafond léger.



Discothèque
Accrochage de luminaires et d'équipements scénographiques



DJ set
Suspension et support d'un équipement sonore et scénique.



Ombrière
Support d'un dispositif d'ombrage assurant une protection solaire.