



HAL
open science

Modélisation et conception d'un coffrage réutilisable pour la fabrication de coques minces en béton de formes complexes

Camille Boutemy, Arthur Lebée, Mélina Skouras, Marc Mimram, Olivier Baverel

► To cite this version:

Camille Boutemy, Arthur Lebée, Mélina Skouras, Marc Mimram, Olivier Baverel. Modélisation et conception d'un coffrage réutilisable pour la fabrication de coques minces en béton de formes complexes. SCAN'22 - 10e Séminaire de Conception Architecturale Numérique, Oct 2022, Lyon, France. pp.09003, 10.1051/shsconf/202214709003 . hal-04390796

HAL Id: hal-04390796

<https://enpc.hal.science/hal-04390796v1>

Submitted on 16 Jan 2024

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.

Modélisation et conception d'un coffrage réutilisable pour la fabrication de coques minces en béton de formes complexes

Design and conception of a reusable inflatable formwork for complex shape concrete shells

Camille Boutemy^{*1}, Arthur Lebéé¹, Mélina Skouras², Marc Mimram³, et Olivier Baverel^{1,4}

¹Laboratoire Navier UMR8205, École des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS

²Université Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP, LJK

³Laboratoire OCS / UMR AUSser 3329, ENSA Paris-Est / Université Gustave Eiffel

⁴GSA / École Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble

Résumé. La construction de coques minces en béton est coûteuse en matériaux et en main d'œuvre à cause de la fabrication du coffrage qui génère une vaste quantité de déchets. Ces éléments non réutilisables ont un impact négatif sur l'ACV de la construction. Ces difficultés expliquent en partie pourquoi la construction de coques minces est devenue rare à la fin du XX^{ème} siècle malgré l'indéniable qualité architecturale qu'elles confèrent aux espaces créés. Cette recherche a pour objectif de modéliser et concevoir un nouveau système de coffrage économe en moyens, pour préfabriquer des éléments surfaciques en béton à partir de structures gonflables. Contrairement à des exemples historiques proposant des gonflables à simple peau, nous proposons de liasonner deux membranes selon un motif. Composé de courbes, le motif est conçu afin qu'une fois les membranes gonflées, la métrique du plan varie de manière non uniforme et génère une surface en trois dimensions selon le *theorema egregium de Gauss*. Le dessin du motif d'assemblage est guidé par un outil numérique capable de simuler précisément une forme gonflée en 3D à partir d'un motif de soudure en 2D. Cette méthode de fabrication serait automatisable et transposable à plus grande échelle. L'article décrira les principes géométriques et l'outil de simulation numérique. Nous présenterons une application, la fabrication d'un coffrage gonflable et la construction d'une coque mince en béton.

Mots clés. Structure Gonflable, Structure pneumatique, Coffrage, Béton, Membrane, Coque Mince.

* Corresponding author: camille.boutemy@enpc.fr

Abstract. Construction of concrete shells is expensive and generates wastes from the fabrication of formworks. Being non-reusable, these elements have a negative impact on the life-cycle assessment of the construction. The purpose of this research is to design and build a new inexpensive formwork system made of inflatable structures for precast and thin concrete shells construction. By sealing two membranes according to a pattern, this system allows the construction of complex inflated shapes. The sealing pattern is designed such that, once inflated, the planar metric becomes not uniform and generates a 3D surface following Gauss's Theorema Egregium, a classical result of differential geometry. This design of the seal pattern is guided by a numerical tool capable of accurately predicting the inflated shape. The simulations are compared to physical models made of fabrics, before manufacturing inflatable formwork prototypes in composite membranes from about 1 to three metres wide. Support is set up to pour concrete on the inflatable formwork without damaging it for reuse. The resulting thin concrete shell and its fabrication method are eligible for wider-scale application in the AEC industry.

Keywords. Inflatable Structure, Pneumatic Structure, Formwork, Concrete, Membrane, Thin Shell.

1 Créer des coques minces en béton à partir de structures gonflables

Les coffrages sur-mesure sont coûteux et génèrent une grande quantité de déchets dans l'Industrie de l'Architecture, de l'Ingénierie et de la Construction (AEC). Dans les constructions de structures standards en béton dont la géométrie est simple et composée de plans, 53% des coûts de fabrication sont dédiés aux coffrages (matériaux et installation). Ces coûts relatifs aux coffrages représentent 88% du budget des constructions de structures plus complexes avec des formes libres (fig. 1). De plus, ces éléments ne sont souvent ni réutilisables ni recyclables et ont un impact négatif sur l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) du projet de construction. La réalisation de la dalle en vague du Rolex Learning Center, par SANAA en 2015, est un exemple de coffrage sur-mesure exceptionnel générant beaucoup de déchets. La quantité de matière perdue est optimisée, notamment grâce à l'utilisation d'étais standards pour surélever les caissons et planches de coffrages [1]. Ces difficultés expliquent en partie pourquoi la construction de coques minces est devenue rare à la fin du XXème siècle malgré l'indéniable qualité architecturale qu'elles confèrent aux espaces créés [2].

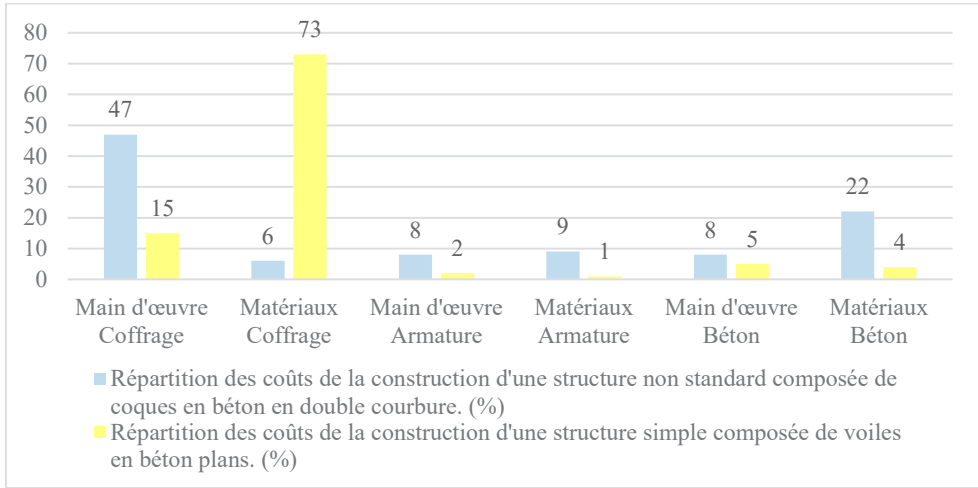


Fig. 1. Répartition des coûts de la construction d'une structure en béton dont la géométrie est simple ou complexe [3] [4].

Cette recherche a pour objectif de modéliser et concevoir un nouveau système de coffrage économe en moyens pour préfabriquer des coques minces à partir de structures gonflables. La gare de Montpellier de Marc Mimram est une référence comme exemple d'application pour notre technique : de grandes palmes discrétisées en plus petites coques d'environ 18m de portée et 5cm d'épaisseur, préfabriquées en BFUP (béton fibré ultra haute performance). Cinq moules ont été nécessaires à la réalisation des 115 palmes, représentant pour chacun un coût d'environ 200 000 euros.

Les structures gonflables sont intéressantes pour leurs propriétés de légèreté et les possibilités de formes qu'elles offrent. Elles sont économiques puisque fabriquées à partir de matériaux fin et souples standards mis en forme par la pression de l'air. Elles ont déjà été utilisées comme coffrages pour fabriquer des coques en béton, comme le projet Domecrete de Heifetz, les dômes Bini de Dante Bini dans les années 1960s [5], ou l'exemple contemporain Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering de Kromoser et al. [6]. Ces exemples utilisent des gonflables en forme de dôme composés d'une simple membrane confectionnée selon un patron, ce qui limite les formes constructibles à des surfaces de type CMC (Constant Mean Curvature) (fig. 2 1a, 1b, 1c). Ces dômes gonflés sont utilisés pour lever et mettre en forme du béton frais ou des éléments préfabriqués en béton pour construire des dômes.

Nous proposons de concevoir une structure gonflable comme coffrage, en superposant deux épaisseurs de toile sans patron, assemblées selon un motif 2D (fig. 2 2a, 2b, 2c). Une fois gonflées, les assemblages deviennent des nervures entre les cavités gonflées. Cette technique a été introduite par Ou et al. [7], avec des maquettes en papier soudées qui fléchissaient une fois gonflées.

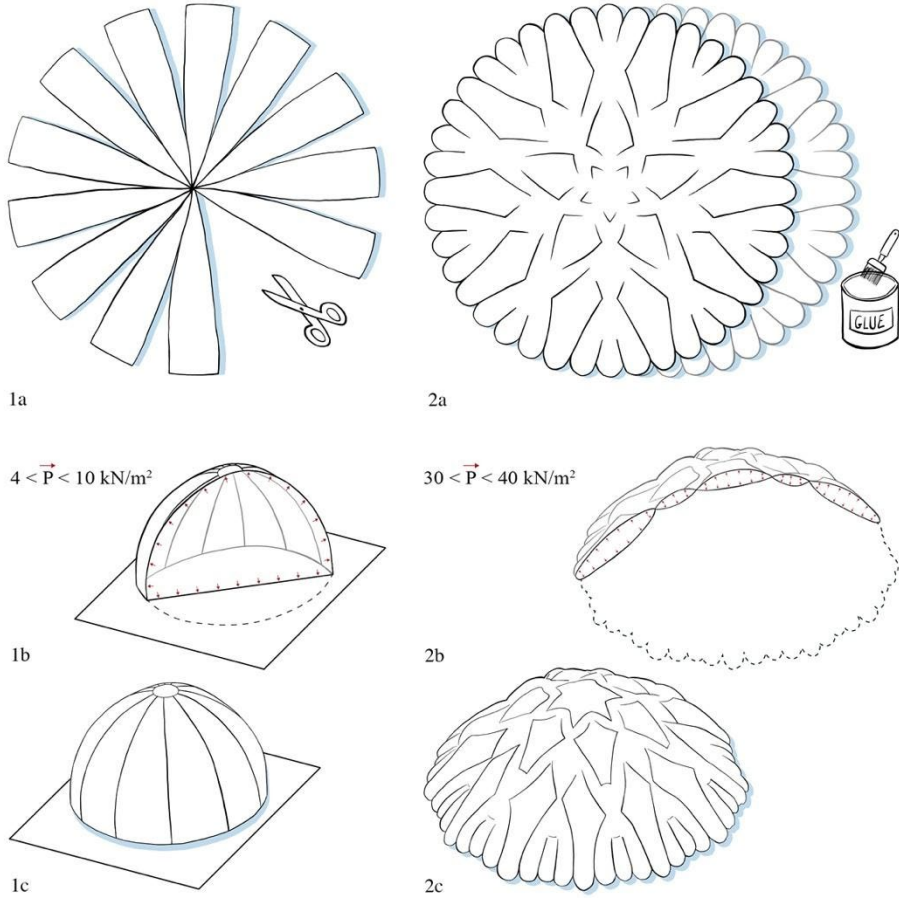


Fig. 2. La méthode du patron (1a, 1b, 1c) et la méthode des deux membranes collées (2a, 2b, 2c) pour fabriquer des structures gonflables.

2 Géométrie des gonflables et simulations numériques

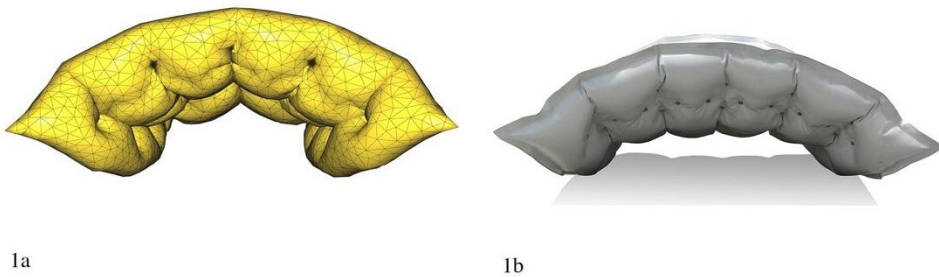


Fig. 3. Simulation numérique (1a) et prototype (1b) de deux épaisseurs de membranes soudées selon le même motif 2D et gonflées.

Comme évoqué dans la première partie, nous explorons une méthode de fabrication sans patron. Un outil numérique interne, *InflatableSheetSimulator*², simule deux membranes scellées à partir d'un motif 2D composé de lignes et d'intersection [7]. Cet outil génère uniquement la géométrie de deux maillages connectés par le motif (fig. 3 1a). L'application requière le dessin en deux dimensions du motif et le réglage de certains paramètres comme la précision du maillage, l'épaisseur de la membrane et son module de Young, ainsi que la pression interne. Les membranes soumises à une pression uniforme sont modélisées selon la théorie des champs en tensions (tension field theory), un modèle convexifié de membrane très efficace : lorsque la membrane est en compression, sa raideur s'annule afin que les instabilités de plissement soient régularisées. Une interpolation linéaire par triangle suffit pour discrétiser numériquement cette approche.



Fig. 4. Maquette fabriquée avec deux épaisseurs de toiles en nylon soudées selon un motif 2D.

Nous utilisons aussi des maquettes physiques pour observer la mise en forme des membranes scellées et gonflées. Les petites maquettes d'environ 30 à 40 cm de diamètre sont confectionnées en toiles de nylon enduites de TPU et soudées avec un fer à souder en suivant un motif (fig. 4). Des prototypes plus grands (environ 1m) en membrane plus épaisse, matériau à échelle 1, sont confectionnés et comparés aux simulations numériques dont les géométries d'avèrent très proches (fig. 3 1a 1b). Ces simulations sont très réalistes et aident au design des motifs d'assemblage en vérifiant rapidement leurs effets sur la géométrie gonflée.

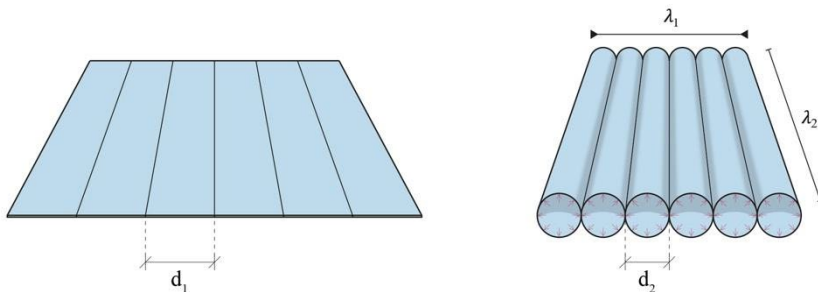


Fig. 5. Deux membranes soudées selon des lignes parallèles et gonflées.

² Outil de simulation numérique développé par Mélina Skouras (Université Grenoble Alpes, Inria, CNRS, Grenoble INP, LJK) pour ces travaux.

Gonfler deux membranes assemblées modifie la métrique de leur surface par contraction. Un motif de soudure créant des cavités permet de faire varier de manière uniforme ou non uniforme la métrique de surface des 2 épaisseurs de membranes liaisonnées. Dans un premier temps, illustrons de manière simple comment le gonflage change la métrique. Nous soudons deux membranes selon un motif composé de lignes parallèles (fig. 5). Lorsque l'on gonfle, des tubes se forment et la métrique change uniquement dans la direction perpendiculaire aux soudures. La section de la membrane gonflée entre deux soudures devient un demi-cercle avec la pression exercée par l'air en deux dimensions. Avec d_2 comme la projection orthogonale dans le plan du motif entre deux soudures, pour une contraction maximale, nous avons $d_2 = \frac{2}{\pi} d_1$. Le facteur de contraction λ , induit par la pression de l'air, peut varier de $\frac{\pi}{2}$ à 1. Dans le cas présenté précédemment, la contraction maximale est dans la direction transversale, $\lambda_1 = \frac{2}{\pi}$ et il n'y a pas de contraction le long des soudures, $\lambda_2 = 1$.

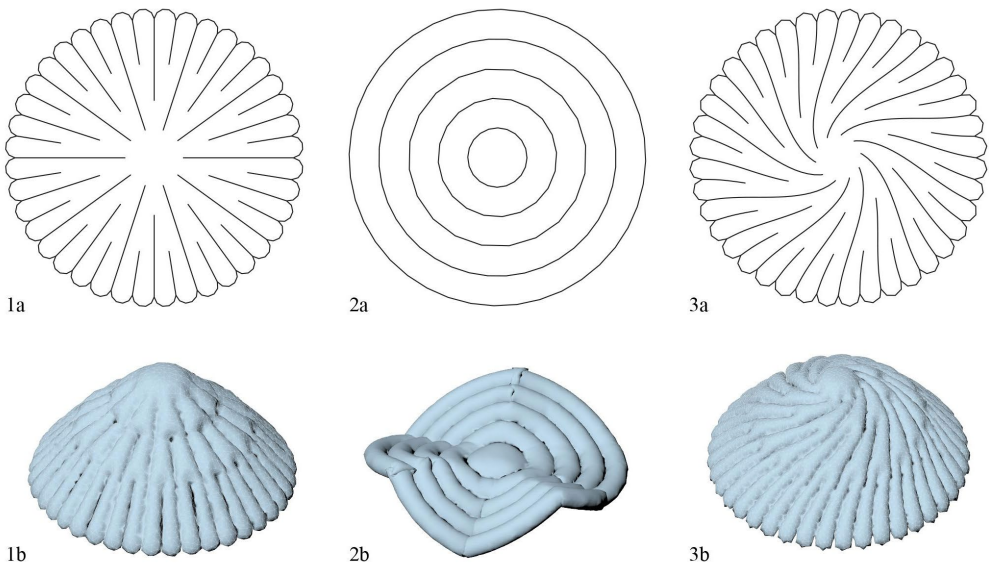


Fig. 6. Motifs 2D et simulation numérique de 2 membranes soudées selon un motif et gonflées. Lignes radiales (1a) (1b). Cercles concentriques (2a) (2b). Spirales (3a) (3b).

L'exemple précédent montrait le comportement de deux membranes soudées et gonflée formant une structure gonflable dont la géométrie globale reste plane. Lorsque l'orientation des soudures varie, les membranes gonflées prennent la forme d'une surface en trois dimensions [8]. À partir de deux disques de membrane, nous proposons quelques motifs pour qu'une fois gonflés, ils adoptent une surface en double courbure positive ou négative. Les motifs dont les soudures rayonnent sont composés de courbes de longueurs différentes : les principales (fig. 9 1a) et les secondaires (fig. 9 1b). Les secondaires sont des subdivisions permettant de mieux discrétiser la forme gonflée et d'harmoniser la taille des cavités. Avec un motif dont les lignes correspondent aux rayons du cercle (fig. 6 1), la rétraction conique des tubes modifie la relation entre l'aire et le périmètre des disques de membrane. Le périmètre rétrécit et la surface sort de son plan pour adopter une forme à double courbure positive comme le montre la simulation (fig.6 1b) et le prototype fabriqué (fig.7 2).

D'autre part, avec un motif dont les soudures sont des cercles concentriques (fig. 6 2), la surface rétrécit alors que le périmètre reste le même : la surface sort de son plan, la forme de l'objet évolue en double courbure négative.

3 Modélisation d'un coffrage pour la réalisation d'une coque mince en béton

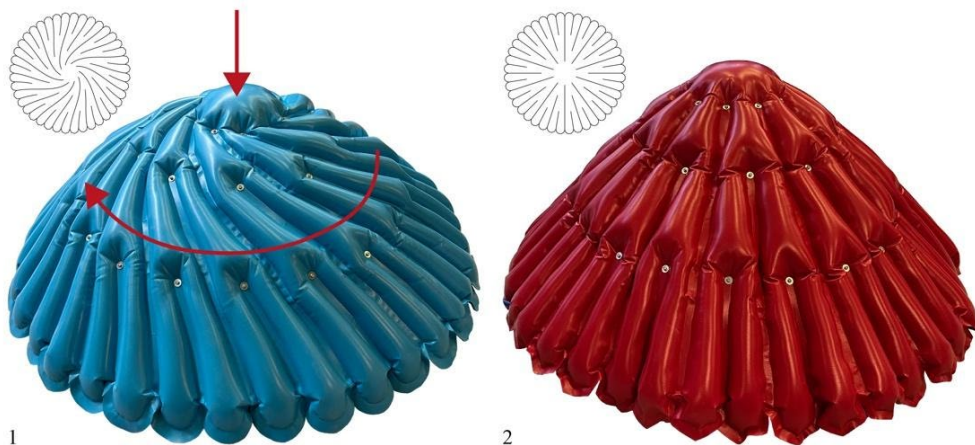


Fig. 7. Prototypes réalisés à partir de deux disques de membranes soudés selon un motif avec des spirales (1) et un motif avec des lignes radiales (2).

La forme cible pour ces travaux, dans un premier temps, est celle du dôme régulier en double courbure positive. Cette géométrie et les conditions aux appuis pour la coque sont simples, un anneau de traction reprendra les poussées de celle-ci. Siefert et al. [8] propose un motif de soudures avec des spirales pour obtenir une forme gonflée dont la surface se rapproche d'une portion de parabolôide de révolution. Cette forme est idéale pour le comportement en compression d'une coque mince en béton. Lorsque l'on coule le béton sur la structure gonflée, les lignes du motif qui sont en creux deviennent des nervures sur la coque en béton. Cependant les nervures générées par ce motif ne sont pas en faveur de la stabilité de la coque en béton. La simulation numérique selon ce motif (fig. 6 3b) est très satisfaisante dans sa géométrie, tout comme le prototype fabriqué (fig. 7 1), mais ce dernier s'avère très instable. Lors du gonflage, numérique (fig. 8) comme physique, une rotation apparait. Celle-ci se répète lorsqu'on applique une charge au sommet du prototype gonflé. À noter que les soudures agissent comme des articulations dans le comportement structurel du gonflable. Au contraire, le prototype soudé avec le motif de rayons (fig. 7 2) présente, une fois gonflé, des tubes droits qui rigidifient la structure.

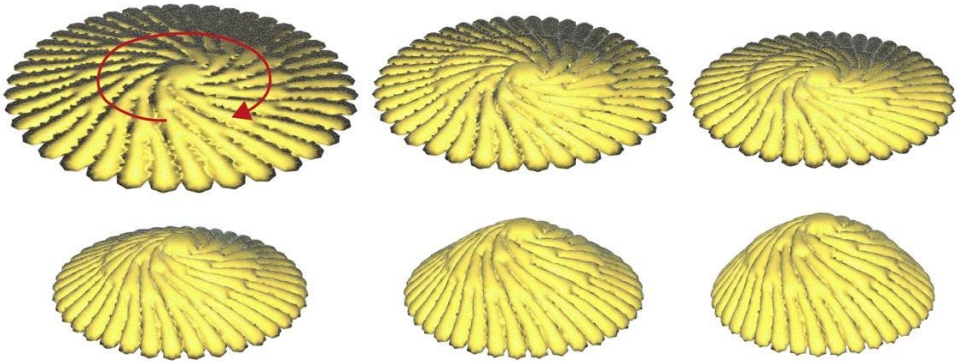


Fig. 8. Rotation lors de la cinématique de gonflage.

En s'inspirant des nervures de la coque du Petit Palais des Sports de Rome par Pier Luigi nervi, construit en 1957 [9], nous proposons d'ajouter un second réseau de spirales, en miroir par rapport au premier, (fig. 9 1c). À partir de ce réseau, nous proposons 3 motifs (fig. 9 2) :

2a. En conservant les courbes du réseau de départ pour obtenir sur la coque des nervures efficaces. La structure gonflable est cependant trop souple puisqu'il n'y a pas de continuité d'air d'une limite à l'autre et que les lignes soudées, nombreuses, se comportent comme des articulations.

2b. En dessinant des losanges entre des tubes gonflés en forme de spirale. Ces tubes apportent de la robustesse au gonflable et l'aident à adopter sa forme parabolique. Cependant ce motif génère des nervures discontinues qui ne sont pas efficaces.

2c. Cette dernière proposition de motif est un compromis entre des continuités d'air suivant les spirales qui assurent forme et stabilité et des soudures continues générant des nervures efficaces pour la coque en béton. Des continuités d'air radiales renforcent le gonflable comme nous l'avons observé avec le prototype (fig.7 2). La force exercée en pelage sur les soudures par la pression de l'air est plus importante quand la cavité est plus grande. On observe une concentration de contraintes aux extrémités des lignes et aux sommets des angles ouverts du motif de soudure. Ce motif est arrangeant puisque les angles ouverts sont orientés vers les plus petites cavités.

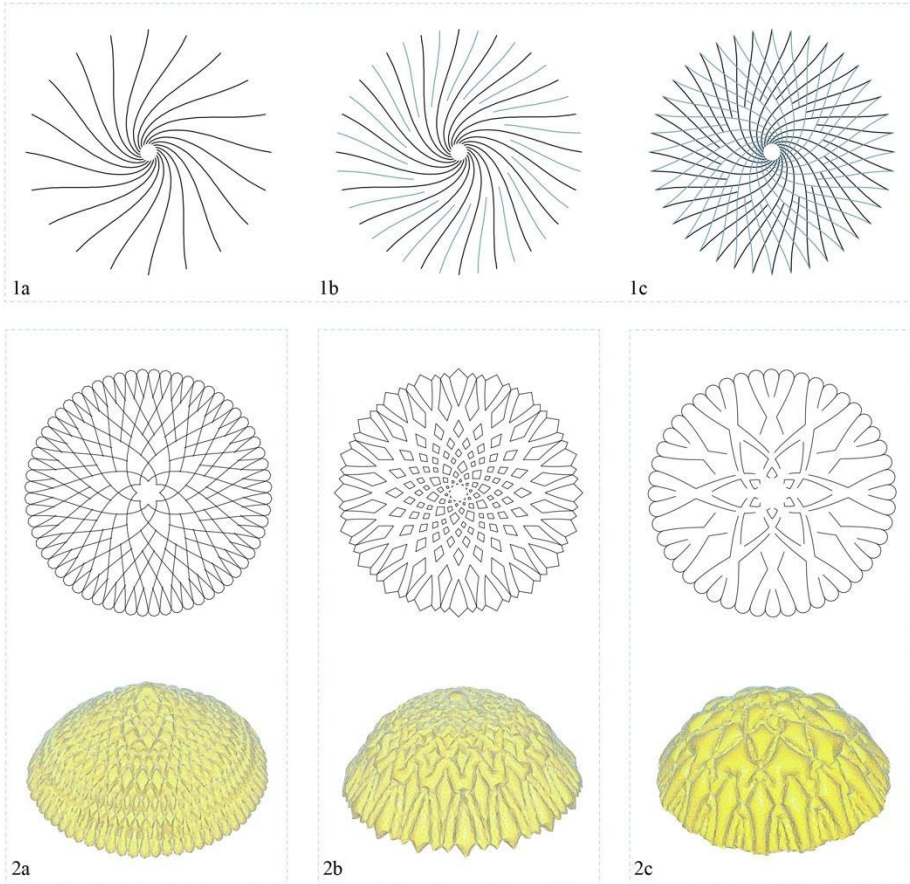


Fig. 9. A partir d'un réseau (1), 3 motifs créés (2a, 2b, 2c).

Nous choisissons de poursuivre nos travaux avec le motif 2c (fig. 8) qui semble le plus convaincant. Il est cependant nécessaire d'affiner ce motif à travers différents paramètres : la distance minimale entre deux soudures pour assurer une bonne circulation de l'air, le nombre de modules en réseau polaire et la juste répartition des courbes principales et secondaires pour avoir une bonne discrétisation de la surface comme évoqué précédemment.

Ces paramètres dépendent de la taille du gonflable fabriqué (fig.10). La différence de taille entre les cavités du motif est réduite pour harmoniser la tension de la toile sur l'ensemble du gonflable et pouvoir correctement gonfler toutes les cavités à une même pression ; le but étant d'éviter les cavités sous-gonflées ou l'arrachement des soudures.

La relation entre la force à l'arrachement par unité de longueur ρ (N/m) le long des soudures, la pression interne p (N/m²), l'aire A (m²) et le périmètre l (m) de la cavité s'écrit :

$$\rho = \frac{pA}{l} \tag{2}$$

Le nombre de modules dans le réseau polaire reste inchangé, mais le module est modifié en ajoutant un troisième niveau de subdivision. Ces courbes ajoutées divisent le périmètre du gonflable 2 fois plus, passant de 40 divisions dans la première version du motif (fig. 10

1) à 80 dans la seconde version (fig. 10 2). Ces modifications discrétisent davantage la forme comme nous l'observons sur les simulations numériques et sur les prototypes créés.

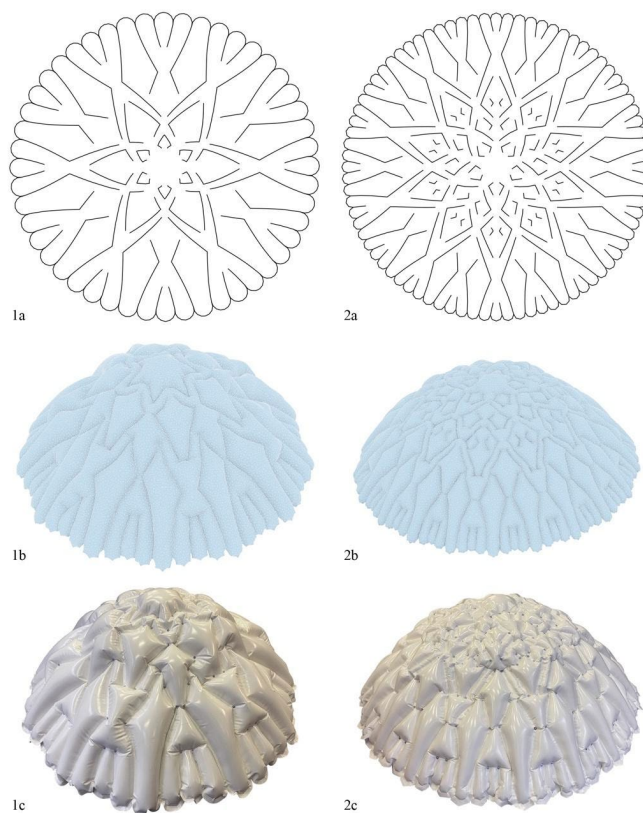


Fig. 10. Modifications du motif du pattern 2c (fig. 8).

4 Fabrication d'un coffrage gonflable et mise en œuvre d'une coque mince

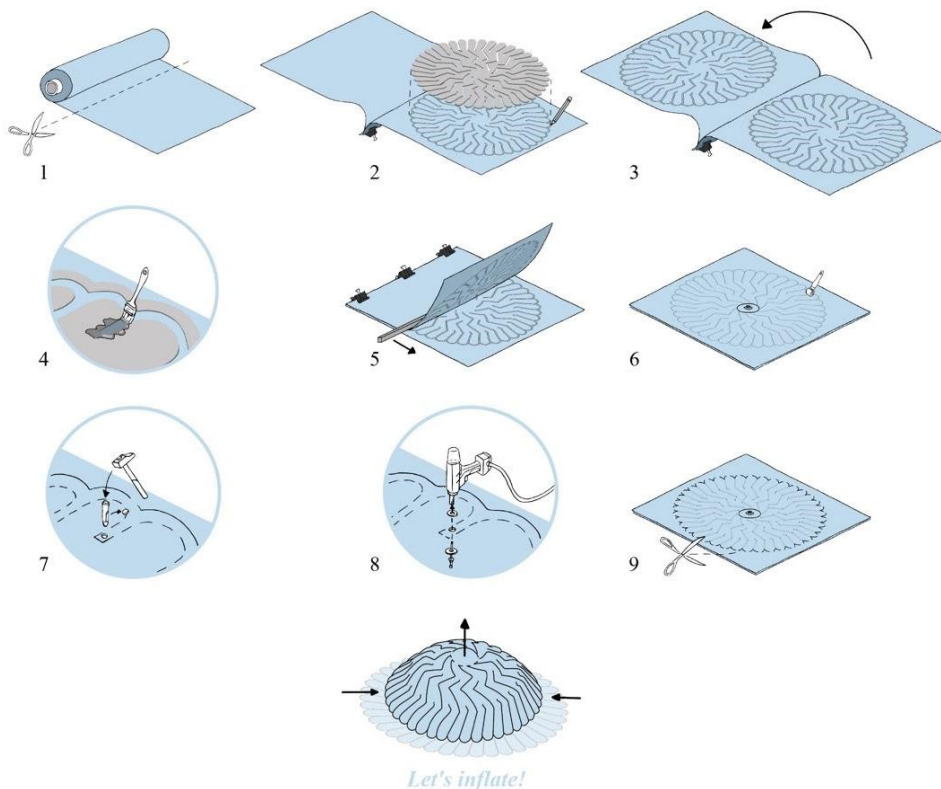


Fig. 11. Protocole de fabrication d'un coffrage gonflable en 10 étapes.

1. Découper deux morceaux de membrane et fixer un bord. 2. Tracer le motif à l'aide d'un pochoir précis découpé au laser. 3. Reporter le motif sur l'autre membrane. 4. Appliquer à l'aide du même pochoir la colle sur les deux membranes. 5. Une fois la colle sèche, mettre en contact les deux membranes. 6. Maroufler pour assurer le collage et évacuer les bulles d'air. 7. Percer la toile à l'aide d'un emporte-pièce. 8. Riveter avec une rondelle de chaque côté de la toile pour répartir la pression et assurer l'étanchéité. 9. Découper l'excès de membrane. 10. Gonflez !

Les membranes utilisées pour construire les prototypes, de 1 à 3 mètres de diamètre, sont inextensibles pour contrôler la déformation. Nous utilisons une membrane composite composée d'une toile de polyester précontrainte et enduite de PVC des deux côtés.³

Traditionnellement, ces membranes composites sont assemblées par soudure à haute fréquence. Cette technologie onéreuse fonctionne avec des électrodes standards droites et sont déclinées en peu de modèles. Nos motifs à souder étant composés de courbes, il serait nécessaire de discrétiser les courbes en segments droits comme cela a été fait sur le prototype (fig. 7 1), et dans certains cas de fabriquer des électrodes sur mesure.

³ Toiles Serge Ferrari avec la technologie Précontraint, modèle 629 (noire, prototypes d'1,35m de diamètre) et 705 (blanche, prototypes de 2,70m de diamètre).

Pour ces raisons, nous utilisons de la colle, une solution économique qui permet de créer des assemblages de toutes les formes. Nous avons testé la résistance de la colle spécifique utilisée⁴ grâce à un essai en traction sur des éprouvettes collées et d'autres soudées pour comparer. Pour chaque essai en traction, la membrane s'est rompue en partie courante et non l'assemblage sur les éprouvettes collées et soudées. Ces essais prouvent que les assemblages, collés ou soudés, sont plus résistants que la membrane elle-même. L'assemblage par collage est donc choisi pour ses résistances mécaniques, sa facilité d'application et l'économie qu'il représente.

La tension dans la membrane induite par la pression interne doit être suffisante pour résister aux charges appliquées. Puisque les assemblages sont sollicités à l'arrachement, leur résistance est faible par rapport aux assemblages classiques en recouvrement, travaillant en cisaillement. Ces assemblages doivent donc être robustes et renforcés avec des rivets. Un prototype en toile a été réalisé, assemblé par des lignes concentriques collées selon différentes épaisseurs (0,5cm, 1cm, 1,5cm et 2cm) (fig. 12). Chaque épaisseur de collage est testée deux fois, une fois avec 1 seul rivet posé au milieu de la ligne collée, et une seconde fois avec un deuxième rivet posé à la fin. Cet essai a permis de déterminer la largeur optimale de collage, 1cm, et a montré la nécessité de poser des rivets aux extrémités des lignes collées, puisque les 4 assemblages collés non rivetés en limite ont pelé jusqu'au rivet du milieu. Les rivets sont posés avec des rondelles pour répartir la pression et assurer l'étanchéité du gonflable. Ce prototype a aussi permis de déterminer de quel côté positionner les rondelles qui présentent une face coupante due à leur mode de fabrication (découpage par pressage). Lorsque la face coupante était positionnée contre la membrane, elle découpait la membrane (fig. 12), menant à la ruine le gonflable. Les rondelles de part et d'autre de la toile seront positionnées du côté non coupant.

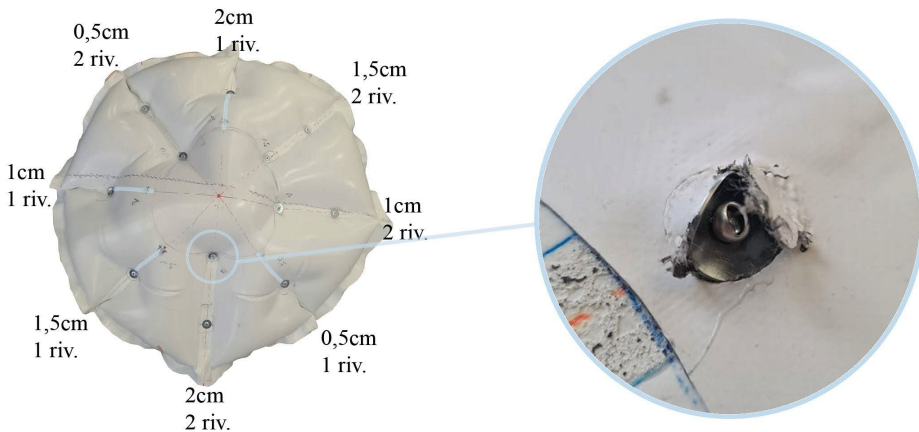


Fig. 12. Prototype en toile collé selon plusieurs épaisseurs (0,5cm, 1cm, 1,5cm et 2cm), avec 1 ou 2 rivets.

⁴ Colle polyuréthane bi-composante Bostik PU 520



Fig. 13. Le coffrage gonflable avec son support (1). La membrane après décoffrage réutilisable.

Après des essais de confection, nous avons établi un protocole de fabrication (fig.11) pour assurer la qualité, la précision et gagner en rapidité. Cette méthode a été utilisée pour réaliser une douzaine de prototypes d'1,35m de diamètre et trois de 2,70m de diamètre (dégonflés). Cette série de prototype a permis d'évaluer les motifs collés à l'échelle de fabrication, pour vérifier la discrétisation de la forme et déterminer la largeur minimale entre deux assemblages pour assurer une bonne circulation de l'air.



Fig. 14. Une coque en béton coulée sur le gonflable en forme, gonflé.

Quelques coques ont été coulées sur des petits coffrages. Un support en médium est mis en place comme anneau de traction à la base du coffrage gonflable (fig. 13 1), ajusté grâce à la géométrie de la simulation numérique du gonflable. Le support est fixé au gonflable à l'aide de ruban adhésif afin de ne pas endommager la membrane et pouvoir la réutiliser. Quelques vis sont en attente sur la partie supérieure du support pour créer une connexion mécanique avec la coque en béton. Un joint silicone assure la continuité entre gonflable et support. Du silicone est aussi appliqué sur les rivets pour éviter qu'ils ne soient scellés dans le béton.

Le mélange du béton est composé à 45% de sable, 45% de ciment blanc et 10% d'eau. Des fibres de verre, environ 1% du volume total, sont ajoutées pour prévenir d'éventuelle fissures lors du retrait durant la prise du béton. La pression de l'air dans le gonflable est maintenue à 40kN/m² soit 0,4 bar lors de la mise en œuvre du béton.

Une première couche de barbotine (un mélange liquide de ciment et d'eau) est appliquée pour remplir correctement les creux du gonflable. Après séchage, une couche plus épaisse d'1,5cm environ de béton est coulée. Le béton prend en 2 heures, ensuite le gonflable est dégonflé pour décoffrer la coque (fig. 13). Le coffrage gonflable est intact et parfaitement réutilisable, l'un a été utilisé pour fabriquer 3 coques et est toujours en parfait état.

Une seconde méthode de mise en œuvre est testée, en coulant le mortier à plat sur la membrane dégonflée. Elle permet une meilleure finition extérieure, une épaisseur quasi uniforme et plus fine de la coque, allégeant de manière conséquente son poids. Le socle est divisé en plusieurs éléments. Une fois le mortier coulé, le gonflable est gonflé et les différentes parties du socle sont rapprochées et assemblées à l'aide d'un câble cerclant le socle. La coque réalisée avec la première méthode (fig 13) pesait 65kg alors que celle fabriquée selon la seconde méthode pesait 25kg.



Fig. 15. Une coque en béton coulée à plat, puis mise en forme par le gonflage de la membrane.

5 Une méthode de coffrage économique et prometteuse

Cette nouvelle méthode de coffrage répond de manière économique aux enjeux actuels visant à réduire l'impact environnemental de l'industrie AEC. Les structures gonflables sont déjà présentes sur les chantiers de construction comme le système Resair®, pour faire des réservations dans les éléments de structures en béton en utilisant des modules gonflés. Contrairement aux autres coffrages gonflables à simple peau, cette méthode peut créer des éléments de formes complexes et être automatisée. N'ayant pas recours au patronage, il est envisageable d'utiliser un bras robotisé pour souder précisément les membranes à plat selon un motif. La prochaine étape de cette recherche est la réalisation d'une coque plus grande, avec les coffrages de 2,7 mètres, en béton projeté.

Nous souhaiterions par la suite fabriquer un coffrage gonflable pour des coques dont la surface est à double courbure inverse, possible grâce au système de superposition de deux toiles qui permet d'obtenir des géométries très diverses. Pour le moment, la taille limite des coffrages gonflables confectionnés correspond à la largeur des rouleaux de membrane (2,70m), mais nous pouvons assembler les lés entre eux pour fabriquer des gonflables plus grands. La limite serait celle du gabarit routier auquel seraient contraintes les coques réalisées afin de les transporter de la zone de fabrication au chantier. Il est envisageable d'utiliser des étais standards pour aider la peau gonflée à franchir 18 mètres, et de la renforcer localement avec des stratégies à venir.

Nous remercions les étudiants de l'École Nationale Supérieure d'Architecture de la Ville et des Territoires, du master Matière à Penser : Doriane Antoine, Guillaume Brezak, Pierre Kraft, Nathan Laglace, Emelyne Matilde et Benjamin Ortega pour leur excellent travail sur ce sujet durant le semestre dernier. Nous remercions aussi les enseignants du séminaire : Marc Mimram, Jean-Aimé Shu, Margaux Gillet, Camille Boutemy et Julien Glath.

Références

1. M. Weilandt, K. Grohmann, M. Bollinger et M. Wagner. ROLEX LEARNING CENTER in Lausanne: From Conceptual design to execution, IASS 2009 Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structure, Domingo and Lazaro (eds.), (2009)
2. G. Tang, An Overview of Historical and Contemporary Concrete Shells, Their Construction and Factors in Their General Disappearance, IJSS, **30**. 1-12. (2015)
3. R. Lab, Think Formwork - Reduce Costs, Struct. Mag., **no. April**, pp. 14–16 (2007).
4. B. G. De Soto, I. Agust -juan, J. Hunhevicz, G. Habert, and B. Adey, The Potential of Digital Fabrication to Improve Productivity in Construction: Cost and Time Analysis of a Robotically Fabricated Concrete Wall, Autom. Constr., **no. 2018** (2018)
5. A. Pugnale et A. Bologna, Dante Bini's Form-Resistant Binishells, Nexus Netw, **J 19**, 681–699 (2017)
6. B. Kromoser et P. Huber, Pneumatic Formwork Systems in Structural Engineering, Advances in Materials Science and Engineering, **vol. 2016**, (2016)
7. J. Ou, M. Skouras, N. Vlavianos, F. Heibeck, C-Y. Cheng, J. Peters et H. Ishii, aeroMorph - Heat-sealing Inflatable Shape-change Materials for Interaction Design, UIST '16, Tokyo (2016)
8. E. Siefert, E. Reyssat, J. Bico et B. Roman, Programming stiff inflatable shells from planar patterned fabrics, Soft Matter (2020)
9. T. Iori, S. Poretti et P.L. Nervi: His Construction System for Shell and Spatial Structures, **vol. 54**, IASS (2013)