



**HAL**  
open science

# Hybrid structural skin : prototype of an elastic gridshell in composite material, braced by a thin fiber-reinforced concrete envelope

Lionel Du Peloux, Pierre Cuvilliers, Cyril Douthe, Robert Le Roy

## ► To cite this version:

Lionel Du Peloux, Pierre Cuvilliers, Cyril Douthe, Robert Le Roy. Hybrid structural skin : prototype of an elastic gridshell in composite material, braced by a thin fiber-reinforced concrete envelope. Journées Nationales sur les Composites 2017, École des Ponts ParisTech (ENPC), Jun 2017, 77455 Champs-sur-Marne, France. <hal-01621544>

**HAL Id: hal-01621544**

**<https://hal.science/hal-01621544v1>**

Submitted on 23 Oct 2017

**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.



HAL Authorization

# **Hybrid structural skin : réalisation d'une structure mixte composée d'un gridshell élastique en matériau composite, contreventé par une fine enveloppe en béton fibré**

## *Hybrid structural skin : prototype of an elastic gridshell in composite material, braced by a thin fiber-reinforced concrete envelope*

Lionel du Peloux<sup>1</sup>, Pierre Cuvilliers<sup>1,2</sup>, Cyril Douthe<sup>1</sup>, Robert Leroy<sup>1</sup>

1 : Matériaux et Structures Architecturées, Laboratoire Navier  
ENPC, IFSTTAR, CNRS, Université Paris-Est  
6/8 avenue Blaise Pascal, 77455 Champs-sur-Marne  
e-mail : lionel.dupeloux@gmail.com et cyril.douthe@ifsttar.fr

2 : Building Technology Program  
Massachusetts Institute of Technology  
Room 5-418, Cambridge, MA, USA  
e-mail : pcuvil@mit.edu

### **Résumé**

Les méthodes de simulation [1, 2, 3] et de construction [4, 5, 6] des gridshells élastiques en matériaux composites peuvent aujourd'hui être considérées comme maîtrisées. Cependant, une fois déformée élastiquement pour former le volume attendu, l'étape de contreventement de la résille demeure fastidieuse et coûteuse en main d'oeuvre. Concernant la matérialité de l'enveloppe extérieure, qui assure le clos-couvert du bâtiment, peu d'alternatives existent à la couverture par membrane textile. Cela constitue un frein notable à la diffusion de cette technologie dont l'utilisation est restée jusqu'à présent cantonnée à des projets emblématiques ou expérimentaux. Le présent article propose de traiter cette double problématique à travers un concept innovant d'enveloppe structurelle hybride, dans lequel l'enveloppe assure à la fois le clos-couvert du bâtiment et le contreventement de la résille en matériau composite. L'idée principale est d'utiliser le gridshell comme cintre pour couler une fine enveloppe en béton fibré par dessus. Une connexion mécanique est assurée entre la résille et le béton pour permettre à l'enveloppe de jouer le rôle de contreventement d'une part; et minimiser l'épaisseur de béton nécessaire d'autre part. Pour démontrer l'intérêt et la faisabilité de ce concept un prototype de 10 m<sup>2</sup> a été réalisé puis testé. Cet article présente les principaux aspects de la conception et de la réalisation de ce prototype.

### **Abstract**

The simulation and construction of elastic gridshells in composite materials is nowadays a technique that one can consider mastered. The bracing of the grid in its final form remains however a time consuming step with a lot of manual work. The lack of alternatives to membrane covering is also an important limitation to the development of such technology. The proposed paper tries to tackle both issues through a novel concept of a hybrid structural skin made of an elastic gridshell braced with a concrete envelope. The idea is to use the gridshell as a formwork for the concrete and to guarantee a mechanical connection between the thin concrete skin and the main grid, so that the concrete ensures the bracing of the grid and that the thickness of the concrete is reduced to a minimum. To demonstrate the feasibility and interest of this structural concept, a 10 m<sup>2</sup> prototype has been built. The main aspects of the design and of the realization of the prototype are presented here (including detailing and mix design).

**Mots Clés :** gridshell, GFRP, architecture, résille, Otto, béton fibré, enveloppe

**Keywords :** gridshell, glass fiber, fiber reinforced concrete, lightweight, architecture

## **1. Introduction**

La paternité des gridshells est couramment attribuée à l'architecte et ingénieur allemand Frei Otto, qui les a intensivement étudiés au XX<sup>ème</sup> siècle. En 1975 il réalise, en collaboration avec l'ingénieur Edmund Happold du bureau Arup, un projet expérimental de grande ampleur : la multi-halle de Mannheim [7, 8]. Cette réalisation emblématique (see Fig. 2a) ancrera durablement les gridshells dans le paysage des typologies structurelles candidates à l'avènement de géométries non-standard,



Fig. 1.: Photo du démonstrateur de 10 m<sup>2</sup> sur son socle en bois.

caractérisées par l'absence d'orthogonalité. Cette capacité à « former la forme » de façon efficace prend tout son sens dans le contexte actuel où, d'une part la forme s'impose comme une composante prédominante de l'architecture moderne (F. Gehry, Z. Hadid, ...), et d'autre part l'enveloppe s'affirme comme le lieu névralgique de la performance environnementale des bâtiments.

### 1.1. Gridshell élastique

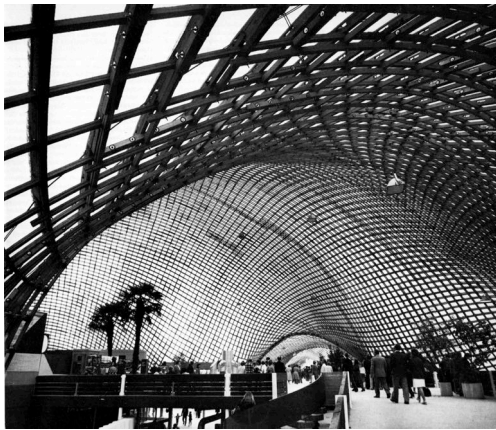
Littéralement, le terme « gridshell » désigne une résille dont le comportement mécanique s'apparente à celui d'une coque ; c'est à dire que les efforts y transitent principalement de manière membranaire. Ces ouvrages peuvent franchir de grandes portées en utilisant un minimum de matière. Cependant, il convient de distinguer les gridshells dit « rigides » des gridshells dit « élastiques » dont il est question dans le présent article. Ces derniers sont obtenus par déformation élastique, à l'aide de moyens de levage appropriés, d'une grille de poutres initialement plane et sans raideur de cisaillement, pour former le volume attendu. La grille est ensuite contreventée pour lui conférer une rigidité de coque et finalement couverte, généralement par une toile.

Depuis une dizaine d'années, le laboratoire Navier revisite ce travail sous le double regard des méthodes numériques et des nouveaux matériaux, principalement les composites à matrice polymère renforcée par fibre de verre (GFRP). Plusieurs prototypes de grande ampleur ont été réalisés, dont le plus emblématique est celui de la cathédrale éphémère de Créteil [6], construite en collaboration avec le bureau d'étude T/E/S/S en 2013 et toujours en service. <sup>1</sup>

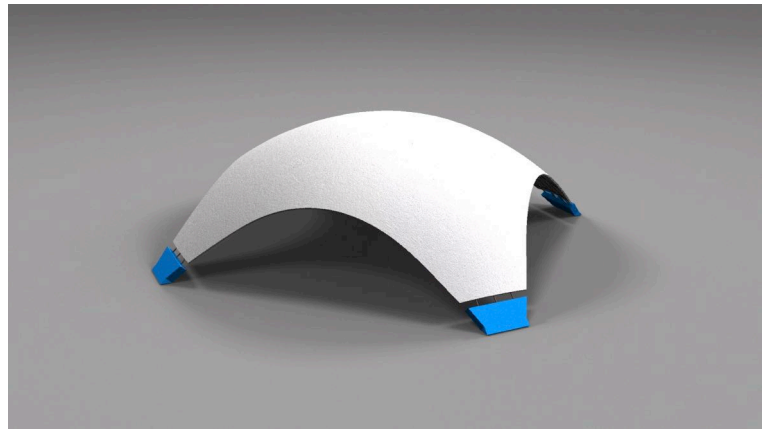
### 1.2. Limitations actuelles

En dépit des progrès accomplis dans la compréhension et la conception de ces structures, **l'étape de contreventement reste couteuse et contraste avec l'efficacité du procédé de déformation de la grille**. Par ailleurs, les structures de ce type construites jusqu'à présent ont été majoritairement couvertes avec des **toiles dont les performances, notamment thermiques et acoustiques, sont bien trop faibles** au regard des exigences que doivent satisfaire des bâtiments implantés de façon permanente. Le manque d'alternatives technologiques à cette solution de couverture par membrane constitue un frein manifeste à la diffusion de cette technique constructive.

1. Des vidéos et des photos du projet sont consultables sur le site : [www.thinkshell.fr](http://www.thinkshell.fr)



(a) Multihalle de Mannheim (1975)



(b) Prototype d'enveloppe structurelle hybrid (2016)

Fig. 2.: Réinventer la vêtire courbe des structures gridshell.

### 1.3. Concept innovant

Le présent article propose un concept innovant d'« enveloppe structurelle hybride » [9] qui répond précisément à ces deux problématiques en combinant un gridshell élastique en GFRP et une peau contreventante en béton fibré (see Fig. 2b). Le gridshell est utilisé pour générer la forme non standard et sert de coffrage pour la mise en place du béton par projection. Une collaboration mécanique est assurée entre la grille composite et la peau béton pour que cette dernière assure son rôle contreventant et que son épaisseur soit réduite au minimum. Pour démontrer la faisabilité et l'intérêt de ce concept un prototype de  $10m^2$  a été réalisé. Les principaux aspects de sa conception et de sa construction sont abordés. Les résultats des relevés géométriques et de essais de chargement menés sur le prototype sont également présentés.

## 2. Techniques de construction des gridshells et des coques en béton

Une fois la grille principale déformée par flexion la structure obtient sa forme d'équilibre « naturelle » sous l'action des contraintes de mise en forme et de son poids propre. Il reste alors à contreventer la résille en bloquant son mécanisme de déformation dans le plan pour lui conférer sa raideur de coque d'une part; et à poser l'enveloppe pour assurer le clos-couvert du bâtiment d'autre part. Ces deux étapes s'avèrent fastidieuses et couteuse en main d'oeuvre. Elles nécessitent un abondant travail en hauteur et ne bénéficient pas du concept initial qui consiste à s'affranchir des difficultés à construire courbe en déformant un objet initialement plan et hautement standardisé.

### 2.1. Méthodes de contreventement existantes

Par le passé, trois méthodes de contreventement ont été utilisées pour conférer à la grille principale une raideur en cisaillement dans le plan de la surface, en empêchant la déformation des mailles via : le blocage des noeuds, l'ajout d'éléments diagonaux ou encore l'ajout de panneaux rigides. Les avantages et inconvénients de ces approches sont décrits ci-après.

La stratégie consistant à bloquer les noeuds en rotation est mentionnée négativement dans [10, 11]. A Mannheim, cette méthode a été mise en place en développant du frottement entre les lattes de bois par le serrage des noeuds. Cependant les essais du système ont mis en évidence sa capacité limitée [8] et les concepteurs du projet l'ont complétée avec des croix de St André. L'inconvénient de cette approche est qu'elle introduit deux objectifs contradictoires pour la conception des noeuds : ils doivent garantir une libre rotation autour de leur axe au moment de la mise en forme ; puis offrir une raideur la

plus grande possible vis à vis de ce même mode de déformation une fois la structure déformée. Cela les rend donc complexes à concevoir et coûteux à produire. Par ailleurs, ce mode de contreventement n'est pas le plus efficace comme chacun sait.

Le contreventement par éléments diagonaux a été mis en oeuvre avec succès à Mannheim [7] et dans le projet de l'orangerie de Chiddingstone [12], à l'aide de câbles. Le principal avantage de cette méthode est sa simplicité. Une patte sur le noeud permet de fixer le câble et d'assurer le transfert des efforts entre le câble et le noeud par friction, après serrage adéquat. Deux directions orthogonales de câbles sont employées car ces derniers ne sont actifs que s'ils sont tendus. C'est d'ailleurs la principale difficulté dans la mise en place d'un tel système : le réseau de câble doit être légèrement précontraint pour être actif et assurer correctement le contreventement de la structure. A contrario, un contreventement par des éléments diagonaux rigides requiert une adaptation plus sérieuse du noeud de connexion, mais comporte certains avantages : une seule direction de diagonales est nécessaire car les éléments sont actifs aussi bien en tension qu'en compression et leur mise en place s'en trouve par ailleurs grandement simplifiée (pas besoin de précontrainte). Ce principe a été employé avec succès dans plusieurs projets [6, 13].

Enfin, le contreventement par panneaux rigides combine avantageusement les rôles de contreventement et d'enveloppe de la coque. Cette solution a été mise en oeuvre avec succès dans le projet de Savill [11] où la structure a été couverte par des panneaux en contreplaqué vissés directement dans les lattes de la grille. Cette stratégie où l'enveloppe et la structure primaire collaborent a permis aux ingénieurs du projet de réaliser une couverture isolante bien finie, épousant parfaitement la géométrie courbe de la structure. Cette application démontre le potentiel prometteur de ce type de technologie pour réduire les temps de fabrication, de pose et les coûts liés à la réalisation des enveloppes de structures gridshells.

## **2.2. Méthodes de couverture existantes**

Pour devenir de véritables bâtiments, les structures gridshells requièrent d'adjoindre à la résille structurelle une couverture pour assurer les fonctions d'étanchéité et d'isolation nécessaires à la vie en service de l'ouvrage. Cette opération nécessite bien souvent le développement d'un système technologique particulièrement complexe et non standard pour s'adapter la forme spatiale de la résille structurelle. Deux grandes familles de solutions existent selon leur capacité à être déformée par flexion : les couvertures « souples » et les couvertures « rigides ». Dans ce paragraphe, nous montrons en quoi les couvertures rigides sont avantageuses mais aussi difficiles à concevoir.

Les projets de la multihalle de Mannheim et de la cathédrale éphémère de Créteil ont été couverts avec des membranes PVC. Le pavillon du Japon a été couvert avec du papier. Ces couvertures ont l'avantage de s'adapter facilement aux surfaces tridimensionnelles. Elle sont souvent patronnées sur-mesure et fixées à la structure en un seul ou plusieurs morceaux, un peu à la manière d'un vêtement. Leur grande légèreté permet de ne pas rapporter de charge significative sur la structure mais les rend peu pérennes. Elles ne peuvent reprendre que des charges additionnelles limitées (isolation, charges d'entretien, ...). Elles restent donc principalement mises en oeuvre dans des structures temporaires.

A contrario, les couvertures rigides offrent une bonne capacité pour transférer des charges additionnelles à la structure primaire. Des méthodes de calepinage existent depuis des siècles pour couvrir par approximation des surfaces courbes avec de petites bandes développables (toitures en zinc de Paris). Parmi les applications intéressantes mises en oeuvre l'ont trouvées : un complexe avec du contreplaqué, un isolant et un écran parpluie en zinc ou bardage bois dans le projet de Savill [11]; un bardage polycarbonate et un parpluie RoofKreete® sans isolation à Downland [10]; une couverture par panneaux de verre triangulaires à Chiddingstone [12]. Cependant, ces solutions sont complexes à mettre en oeuvre et ne bénéficient pas de l'ingéniosité du système de déformation de la grille. Une approche

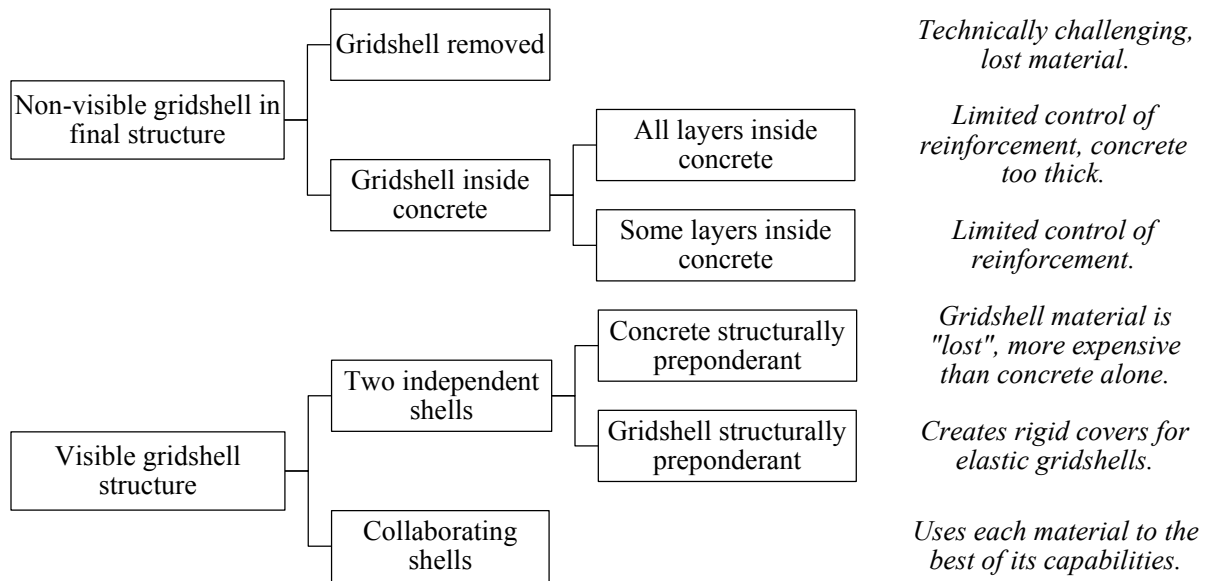


Fig. 3.: Comparaison des différentes façons de combiner la grille et l'enveloppe.

prometteuse consiste à rationaliser la forme du gridshell pour que sa forme naturelle d'équilibre soit la plus proche possible d'un maillage par quadrangles plans, idéalement dans la limite des tolérances géométrique de construction [14]. Pour l'instant, aucune structure semble n'avoir été construite sur ce principe. En dépit de leurs avantages, toutes ces couvertures introduisent une forte complexité dans la conception des noeuds et augmentent significativement l'épaisseur globale du complexe de couverture.

Une piste prometteuse serait donc de développer une couverture qui bénéficie de la résistance et de la durabilité des couvertures rigides, tout en conservant la simplicité de mise en oeuvre des couvertures souples.

### 2.3. Cintres et coques en béton

Des études récentes se sont intéressées à la construction de coques minces en béton, coulé sur des cintres souples réalisés à partir de membranes ou de réseaux de câbles [15, 16, 17]. Ces approches ont montré à petite échelle leur pertinence économique dans la réalisation de cintres courbes complexes. Une fois renforcé par un réseau de câble, un coffrage souple en membrane PVC offre la résistance nécessaire pour s'opposer à la pression du béton frais. De même, l'utilisation d'un gridshell élastique comme coffrage souple pour la réalisation de coques minces en béton sans appui intermédiaire peut s'avérer pertinente. Cette idée a d'ailleurs déjà été expérimentée avec des surfaces à simple courbure [18]. Avantage incontestable : les gridshells élastiques peuvent matérialiser des formes à double courbure positive, ce que ne permettent pas les structures purement en tension comme les membranes et les réseaux de câbles [17]. Cependant, il paraît contreproductif de vouloir démonter le gridshell pour ne garder que la coque en béton. En effet, il est possible de faire collaborer avantageusement les deux structures (gridshell et coque béton) pour en tirer le meilleur parti. C'est idée est à l'origine du concept de structure hybride présentée dans cet article et développée ci-après.

### 2.4. Différentes façons de combiner grille et peau béton

La Figure 3 présente les différentes façon de combiner un gridshell élastique et une peau béton coulée en place à même la grille. Chaque possibilité est discutée en vue de la réalisation d'un prototype dont la forme sera celle d'un dôme, pour lequel les charges dominantes sont celles du poids propre. Dans cette configuration il est alors préférable de résister au chargement principal par un comportement

membranaire. Cet objectif est atteint lorsqu'on s'assure que la forme retenue pour la structure est funiculaire du chargement dominant.

Le premier critère retenu pour la classification est celui de la visibilité du gridshell. Ce critère à priori d'ordre architectural a d'importantes conséquences d'ordre mécanique.

Si l'on choisit de ne pas voir le gridshell. Soit la grille est enlevée après réalisation de la peau en béton ; cette dernière est donc conçue comme une véritable coque d'épaisseur minimale ; le gridshell a pour unique but la constitution d'un cintre économique par sa capacité à former des surfaces courbes complexes. Soit le gridshell est destiné à disparaître dans l'épaisseur de la coque béton ; il participe idéalement au renforcement de la coque. Néanmoins, dans cette seconde hypothèse, les calculs montrent que l'épaisseur structurelle du gridshell nécessaire pour porter la masse de béton frais serait bien plus importante que l'épaisseur structurelle nécessaire pour la coque en béton seule [19, p. 35] and [20, p. 185]. Cette approche nécessiterait donc de soutenir le gridshell avec des étais intermédiaires pendant la phase de coulage.

Si l'on choisit de voir le gridshell. Soit le gridshell et la peau béton sont parfaitement indépendants l'un de l'autre et dans ce cas la matière n'est pas utilisée de façon optimale pour la résistance mécanique. Soit l'on choisit de les faire collaborer ensemble auquel cas deux nouvelles options sont envisageables. Si la peau béton est beaucoup plus raide que le gridshell, la structure mixte se comporte comme une coque en béton à laquelle est suspendue un gridshell. Dans ce cas, le seul intérêt est de ne pas avoir à démonter le gridshell. Ce dernier devient alors moins un élément mécanique qu'architectural. Si le gridshell est beaucoup plus rigide que la peau en béton, celle-ci risque fort de fissurer sous les éventuelles déformations de la grille (vent, neige, entretien, ...).

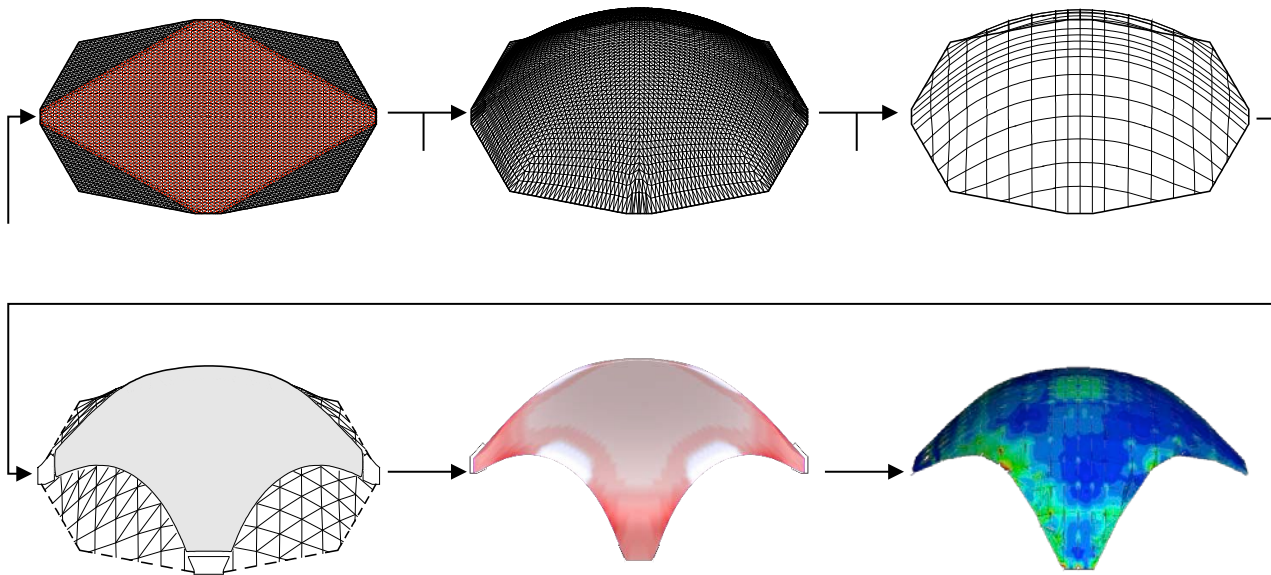
L'option la plus avantageuse semble être de créer une peau béton de raideur compatible avec celle du gridshell – c'est à dire dont le rapport des raideurs soit voisin de 1 – et d'assurer une collaboration entre les structures pour améliorer la capacité structurelle initiale du gridshell, une fois le béton sec. L'effet attendu est que l'enveloppe béton assure le contreventement final de la grille primaire du gridshell par collaboration, améliore la redistribution des efforts dus aux charges concentrées et la résistance au flambement local de la structure composite. La faisabilité de ce concept est démontrée à travers la présentation du prototype ci-après.

### **3. Réalisation du prototype : preuve du concept**

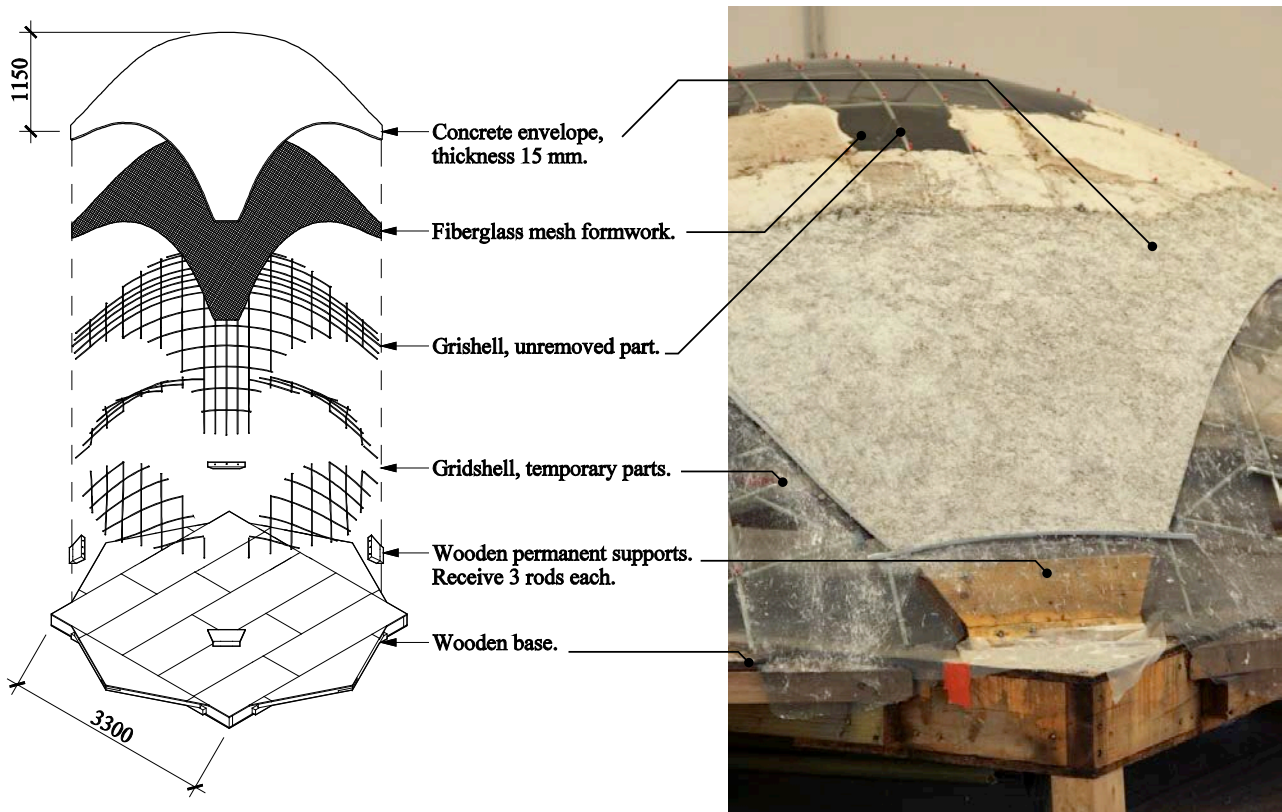
#### **3.1. Processus de conception**

La géométrie du dôme est le résultat d'un processus itératif de recherche de forme sous contraintes géométriques (pour les conditions aux limites du gridshell) et mécaniques (pour obtenir une forme funiculaire du poids propre une fois la dalle en béton coulée). Ce processus a été implémenté dans l'environnement de calcul paramétrique Grasshopper pour Rhinoceros. Il se décompose en six étapes représentées à la Figure 4a :

1. Définir la ligne géométrique d'ancrage du gridshell au sol et l'emplacement approximatif du béton.
2. Générer une forme funiculaire cible pour la charge de béton selon la méthode des densités de force [21, 22].
3. Définir un maillage de Tchébychev sur cette forme à l'aide de la méthode du compas [7, pp.138-155] et [23] puis calculer la forme d'équilibre du gridshell sous poids propre par une méthode de relaxation dynamique [24, 1].
4. Vérifier la stabilité et la résistance de la structure gridshell sous la charge de béton.
5. Éliminer les parties latérales dans le modèle pour minimiser la flexion au niveau des rives.



(a) Les 6 étapes du processus de recherche de forme.



(b) Vue éclatée des couches composant le système structurel.

Fig. 4.: Éléments de conception du prototype de structure hybride.

6. Vérifier les contraintes développées dans la structure hybride sous charges extérieures. Cette étude est menée avec un logiciel de calcul aux éléments finis sans prendre en compte la précontrainte de flexion dans la grille dont l'influence est négligeable [25]. La collaboration entre le béton et la grille est modélisée par une connexion élastique et seuls les effets instantanés sont pris en compte (pas de fluage).

### 3.2. Processus de construction

Les étapes du processus de construction sont illustrées dans les vignettes ci-dessous.



(a) Assemblage de la grille



(b) Pose de la toile de coffrage



(c) Mis en forme du gridshell



(d) Pose d'une primaire d'accroche au ciment prompt



(e) Projection du béton



(f) Démontage des parties temporaires

*Fig. 5.: Etapes clés du processus de construction.*

## 4. Conclusion

### 4.1. Evaluation du prototype

Le présent article a présenté un nouveau type de coque dans lequel un gridshell élastique en matériau composite de type GFRP est associé à une enveloppe contreventante en béton fibré. L'objectif était double : élargir le champ d'application des gridshells élastiques en simplifiant leur contreventement et leur couverture d'une part ; et renouer avec la construction des coques minces en béton par l'utilisation d'un cintre innovant. Des informations additionnelles sont disponibles dans l'article de référence [9].

### 4.2. Changement d'échelle

Le prototype réalisé prouve la faisabilité de cette technique à petite échelle. Les données économiques recueillies et extrapolées (cf. [9]) montrent des potentialités à plus grande échelle. Pour des surface à couvrir de 10 m<sup>2</sup> à 50 m<sup>2</sup> la technique proposée peut directement être adaptée et mise en oeuvre par des artisans locaux. Le diamètre des joncs en composite et des connecteurs devra être augmenté mais la taille de la grille et son poids restera faible. Elle sera facilement manipulable à la main, sans outil de levage spécifique. Aucun patron de découpe n'est nécessaire pour le textile de coffrage ce qui le rend facile à mettre en oeuvre. Idem pour le béton dont la formulation pauvre en eau le rend facile à mixer et à placer sur une surface courbe avec des pentes fortes.

Pour des dômes de plus grande taille, de 15m à 20m de portée, un processus de mis en oeuvre proche de celui employé pour la cathédrale éphémère demeure envisageable. Au delà, des grilles à double nappe telle que celle employée à Mannheim seraient nécessaires. Par ailleurs, il serait fondamental d'optimiser l'épaisseur de la peau béton pour diminuer au maximum la charge morte appliquée au gridshell. Cette technique apporterait un surcroit de complexité non négligeable dans un tel projet. Enfin, il est à noter que si l'épaisseur du béton dans le prototype est d'environ 15mm, à plus grande échelle l'épaisseur avoisinerait plutôt les 30 à 40 millimètres pour porter sur environ 1 mètre et permettre de transférer les charges extérieures (actions climatiques, charges de maintenance, ...) à la structure gridshell. Mais il serait contreproductif d'aller au delà pour des raisons évidentes de poids.

D'autres développements sont attendus sur ce sujet, principalement sur l'amélioration de la connexion entre la structure gridshell et la peau en béton.

### Remerciements

Les auteurs remercient tous ceux qui, par leur aide, ont contribué à la réalisation at au test de ce prototype : M. Bonnet, M. Gillet and H. Orts, J.-F. Caron, S. Gervilliers, V. Loing, P. Margerit, R. Mesnil, O. Perret and F. Tayeb. Les auteurs remercient également l'entreprise Saint-Gobain qui a gracieusement fourni les fibres de fonte amorphe FibraFlex nécessaires au renforcement de la peau béton.

### Références

- [1] C. Douthe, O. Baverel, J.-F. Caron « Formfinding of a grid shell in composite materials », *Journal of the IASS* Vol. 47, pp. 53–62, 2006, ISSN 1028-365X.
- [2] F. Tayeb, B. Lefevre, O. Baverel, J.-F. Caron, L. du Peloux « Design and realisation of composite gridshell structures », *IASS* Vol. 56 n° 1, pp. 49–59, 2015.
- [3] L. du Peloux, F. Tayeb, B. Lefevre, O. Baverel, J.-F. Caron « Formulation of a 4-DoF torsion / bending element for the formfinding of elastic gridshells », in : *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures*, August, Amsterdam, , pp. 1–14, 2015.
- [4] C. Douthe, J.-F. Caron, O. Baverel « Gridshell structures in glass fibre reinforced polymers », *Construction and Building Materials* Vol. 24 n° 9, pp. 1580–1589, 2010, ISSN 09500618.
- [5] O. Baverel, J.-F. Caron, F. Tayeb, L. du Peloux « Gridshells in composite materials : construction of a 300 m2 forum for the solidays' festival in Paris », *Structural Engineering International* Vol. 22 n° 3, pp. 408–414, 2012, ISSN 10168664.

- [6] L. du Peloux, F. Tayeb, O. Baverel, J.-F. Caron « Construction of a large composite gridshell structure : a light-weight structure made with pultruded glass fibre reinforced polymer tubes », *Structural Engineering International* Vol. 26 n° 2, pp. 160–167, 2016, ISSN 10168664.
- [7] F. Otto, E. Schauer, J. Henniecke, T. Hasegawa, IL10 Grid shells, 1974.
- [8] E. Happold, W. I. Liddell « Timber lattice roof for the Mannheim Bundesgartenschau », *The structural engineer* Vol. 53 n° 3, pp. 99–135, 1975.
- [9] P. Cuvilliers, C. Douthe, L. du Peloux, R. Le Roy « Hybrid structural skin : prototype of an elastic gridshell braced by a fibre-reinforced concrete envelope », *Journal of The International Association for Shell and Spatial Structures* , pp. 1–12, 2017.
- [10] R. Harris, J. Romer, O. Kelly, S. Johnson « Design and construction of the Downland Gridshell », *Building research and information* Vol. 31 n° 6, pp. 427–454, 2003, ISSN 0961-3218.
- [11] R. Harris, S. Haskins, J. Roynon « The Savill Garden gridshell : Design and construction », *The Structural Engineer* Vol. 86 n° 17, pp. 27–34, 2008.
- [12] R. Olcayto « Gridshell glazes over the past », *Building Design* Vol. 1776, pp. 14–17, 2007.
- [13] B. D’Amico, A. Kermani, H. Zhang, A. Pugnale, S. Colabella, S. Pone « Timber gridshells : Numerical simulation, design and construction of a full scale structure », *Structures* Vol. 3 n° May 2016, pp. 227–235, 2015, ISSN 2352-0124.
- [14] C. Douthe, R. Mesnil, H. Orts, O. Baverel, P. Paristech, L. Navier, B. P. Champs-sur marne « New shapes for elastic gridshells covered by planar facets », in : Proceedings of the IASS Annual Symposium, October, , pp. 1–9, 2016.
- [15] H. Abdelgader, M. West, J. Górski « State of the art report on fabric formwork », in : Proceedings of the International Conference on Construction and Building Technology, 08, , pp. 93–105, 2008.
- [16] J. Orr, T. Ibell, A. Darby, M. Evernden « Extraordinary possibilities for future concrete structures », in : Proceedings of the Fifth International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, vol. 3260, ISBN 9781138000612, ISSN 19373260, , pp. 37–41, 2013.
- [17] D. Veenendaal, P. Block « Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork », *Engineering Structures* Vol. 75 n° 2014, pp. 39–50, 2014, ISSN 01410296.
- [18] G. Tang, R. Pedreschi « Deployable Gridshells as Formwork for Concrete Shells », in : Proceedings of the International Society Of Flexible Formwork Symposium 2015, Amsterdam, 2015.
- [19] B. Peerdeman « Analysis of thin concrete shells revisited : opportunities due to innovations in materials and analysis methods », Ph.D. thesis, 2008.
- [20] M. Farshad, Design and analysis of shell structures, ISBN 978-90-481-4200-2, 1992.
- [21] B. Maurin, R. Motro « Concrete Shells Form-Finding with Surface Stress Density Method », *Journal of Structural Engineering* n° June, pp. 961–968, 2004.
- [22] B. Maurin, R. Motro « The surface stress density method as a form-finding tool for tensile membranes », *Engineering Structures* Vol. 20 n° 8, pp. 712–719, 1998, ISSN 01410296.
- [23] L. du Peloux, O. Baverel, J.-F. Caron, F. Tayeb « From shape to shell : a design tool to materialize freeform shapes using gridshell structures », in : Design Modelling Symposium, Berlin, Deutschland, 2011.
- [24] M. Barnes « Form Finding and Analysis of Tension Structures by Dynamic Relaxation », *International Journal of Space Structures* Vol. 14 n° 2, pp. 89–104, 1999, ISSN 0266-3511.
- [25] R. Mesnil, J. Ochsendorf, C. Douthe « Stability of Elastic Grid Shells », *International Journal of Space Structures* Vol. 30 n° 1, pp. 27–36, 2015.