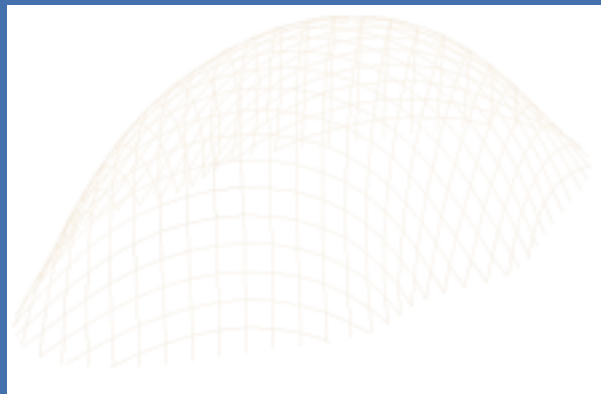


# LAMI

Laboratoire d'analyse  
des matériaux  
et identification  
Institut Navier  
(ENPC - LCPC)

## Des structures innovantes en matériaux composites Premiers prototypes de *grid shell*

Les composites sont déjà largement utilisés dans le génie civil, essentiellement dans le domaine de la réparation et du renforcement de structures existantes, assez peu dans des structures nouvelles. Des normes et recommandations sont désormais disponibles. Quelques petits ouvrages existent en Europe et aux Etats-Unis, mais ils restent expérimentaux et très souvent calqués sur des solutions structurelles qui ont été durant des décennies optimisées pour l'acier. Afin de tirer profit de chacune des caractéristiques mécaniques de ces matériaux, de nouvelles typologies de structures doivent donc être inventées.



## ▶ Objectifs

L'équipe " structure " du LAMI développe actuellement une passerelle en *bow-string* ultra légère et un *grid shell*. Sur ce bâtiment expérimental de la taille d'une habitation courante, une thèse, réalisée par C. Douthe sous la direction de J.-F. Caron et O. Baverel, est en cours. Quatre grands principes ont guidé la phase de conception :

- > utilisation optimale des propriétés mécaniques des fibres,
- > simplicité des connections entre les différents éléments,
- > optimisation de la forme de la structure vis-à-vis de son chargement,
- > faible coût de construction via l'utilisation de composants industriels standard.

## ▶ Les *grid shells* : un procédé constructif original

Sous le nom de *grid shell*, on entend le plus souvent une structure qui a la forme et la rigidité d'une coque à double courbure mais qui est constituée d'une grille et non d'une surface continue. Ces structures peuvent franchir de grandes portées tout en utilisant peu de matière. Elles peuvent être faites de n'importe quel matériau : acier, aluminium, bois ou même carton... Généralement, les structures métalliques sont composées d'éléments rectilignes qui définissent des facettes sur la surface de la grille. La complexité de la géométrie obtenue requiert le développement d'un grand nombre de pièces d'assemblages tant complexes que coûteuses. Pour pallier ce désavantage, un procédé de construction original a été développé. De longues poutres continues sont assemblées sur le sol et articulées entre elles, ce qui confère à la grille une absence totale de rigidité en cisaillement et permettra par la suite de grandes déformations. La grille est ensuite déformée élastiquement par flexion jusqu'à ce que la forme désirée soit atteinte. Elle est enfin rigidifiée à l'aide d'une troisième direction de barres ou de câbles de contreventement de façon à supprimer le degré de liberté en cisaillement et à rendre toute sa rigidité à la coque. Dans le monde, seulement trois *grid shells* ont été construits en utilisant cette méthode, parmi eux le *Mannheim Bundesgartenschau* de Frei Otto (1975).

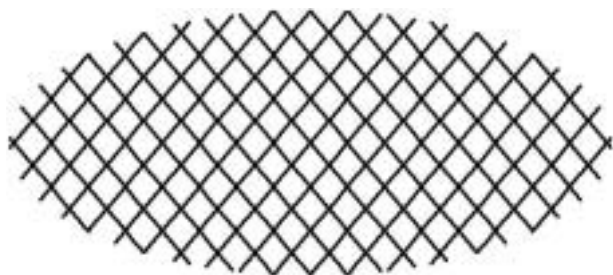
## ▶ Les avantages des composites

Dans les *grid shells* existants, le bois a été choisi en raison de sa faible densité et de sa déformation à rupture élevée (environ 2%) et non de sa résistance (30 MPa au mieux). Les polymères renforcés de fibres de verre (GFRP) ont une résistance à rupture d'environ de 350 MPa et une déformation limite d'environ 1,5% pour seulement 1,9 kg/m<sup>3</sup>. Ces matériaux ont donc des rigidités beaucoup plus élevées (de 20 GPa à 40 GPa) que le bois (autour de 10 GPa), de sorte que, pour une géométrie donnée de *grid shell*, la charge de ruine d'un *grid shell* en composite sera plus haute que pour un *grid shell* en bois.

Comme les efforts dans les barres sont presque exclusivement des efforts axiaux, des fibres ne sont requises que dans la direction principale de la barre. De tels profilés unidirectionnels peuvent être obtenus à l'aide du procédé industriel de pultrusion, une méthode très économique de production continue. Cela permet également la fabrication de tubes de grande longueur et évite le problème du raboutage des tasseaux de bois. Par ailleurs, avec des diamètres de tube standard, des pièces d'échafaudage orientables standard déjà disponibles dans l'industrie ont pu être employées pour la réalisation des liaisons entre les tubes et, par là, les coûts matériels réduits. L'ensemble de ces solutions techniques semblent appropriées pour la construction de *grid shells* et pouvoir contribuer au développement de ce type de structures .

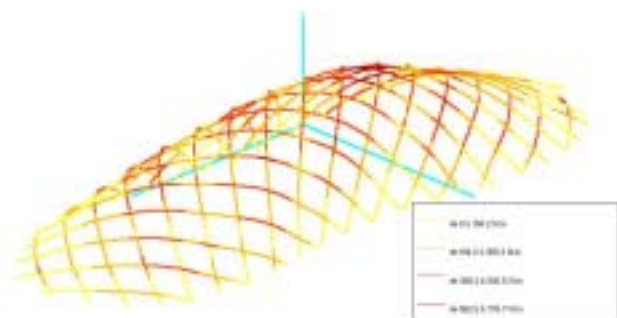
## ▶ Simulation avec l'algorithme de relaxation dynamique

La recherche de formes stables et esthétiques, l'évaluation des contraintes et l'optimisation de leur distribution dans les divers éléments nécessitent de pouvoir modéliser de fortes non linéarités géométriques difficiles à prendre en charge par des méthodes d'éléments finis classiques.



► [figure 1]  
Vue en plan de la grille de départ

Le LAMI a donc développé un outil numérique utilisant l'algorithme de relaxation dynamique. Dans cette méthode numérique alternative apparue à la fin des années soixante, l'équilibre statique est considéré comme la position d'équilibre limite d'un processus dynamique amorti. D'abord utilisée pour le calcul de réseaux de câbles et de structures textiles, cette méthode a été étendue aux structures fléchies et aux *grid shells*. Le programme développé au LAMI prend également en compte les excentricités entre les éléments au niveau des liaisons, ce qui permettra d'étudier leur influence sur la stabilité générale de la structure. L'implémentation a été faite dans le logiciel scientifique libre Scilab™, développé en commun par l'Ecole des ponts et l'INRIA. La première phase de validation a confirmé les bonnes performances de l'algorithme.



► [figure 2]  
Moments fléchissants dans la structure finale du *grid shell*

## ► Un prototype à l'École des ponts

► Un *grid shell* expérimental a été construit avec des tubes pultrudés faits de résine vinylester renforcée de fibres de verre d'un diamètre de 42 mm et d'une épaisseur de 3,5 mm. Le périmètre de départ de la grille est une ellipse (fig.1). La forme théorique finale (fig.2) est obtenue en simulant la déformation de la grille soumise à une charge uniforme vers le haut, les extrémités des barres glissant librement sur le plan initial de la grille. La structure finale mesure 3,7 m de haut, 22 m de long et 8 m de large. La surface couverte est d'approximativement de 160 m<sup>2</sup>.



► [figure 3]  
Vue du montage au moyen d'étais remontés à la main

Les coordonnées cibles des extrémités des barres sont reportées sur le sol avec précision par des spécialistes de l'Ecole nationale des sciences géographiques (ENSG). La grille réelle est alors déformée (fig.3) pour que les extrémités des barres atteignent les cibles. Cette phase de montage ne requiert que 8 heures de travail pour 3 hommes sans moyen de levage particulier ! Le *grid shell* est ensuite contreventé avec une troisième direction des barres (fig.4). Cette étape de rigidification est essentielle : une augmentation de 30 % de la masse de la structure due à ces contreventements entraîne une multiplication par six de la charge maximale que la structure peut reprendre !



► **[figure 4]**  
Intérieur de la structure contreventée

La géométrie de la structure est mesurée avec des tachéomètres et comparée aux résultats numériques de la recherche de forme (fig. 6). On constate que pour chaque coordonnée le décalage moyen est de l'ordre de grandeur du rayon des tubes. Les résultats de l'expérience peuvent être ainsi considérés comme très honorables et l'algorithme de relaxation dynamique comme d'une grande précision pour la recherche de forme des *grid shells*. Des essais sous charges symétriques et antisymétriques sont en cours (fig.6). Les déplacements de la structure sont mesurés et comparés aux résultats numériques. L'analyse non linéaire de la structure est également exécutée avec l'algorithme de relaxation dynamique.



► **[figure 5]**  
Vue d'ensemble de la structure



► **[figure 6]**  
Mesures de la structure par les étudiants de l'ENSG

## ► Perspectives

Le prototype construit à l'Ecole des ponts démontre la faisabilité d'un *grid shell* en matériaux composites. Le système de couverture, les problèmes liés aux ouvertures ainsi que ceux liés au passage à une échelle de structure plus importante restent à étudier, mais des industriels semblent d'ores et déjà intéressés. Ce type de structure fournirait donc une solution performante et économique pour la construction d'abris provisoires ou permanents.

## ► Le LAMI

Unité mixte de l'Ecole des ponts et du Laboratoire central des ponts et chaussées, le LAMI compte 45 personnes dont 20 chercheurs et 19 doctorants. Son activité de recherche concerne la mécanique des matériaux et des structures avec des finalités dans le domaine du génie civil et des transports. Elle s'appuie sur la modélisation et le calcul numérique mais aussi sur l'expérimentation qui permet l'identification des paramètres et la validation des modèles.

ENPC - LAMI  
6-8, avenue Blaise Pascal  
Cité Descartes, Champs-sur-Marne  
77455 Marne-la-Vallée cedex 2

### Contact :

Jean-François Caron    [caron@lami.enpc.fr](mailto:caron@lami.enpc.fr)