



HAL
open science

Conception des structures architecturales dans un contexte de ressources limitées

Romain Mesnil, Olivier Baverel, Cyril Douthe

► To cite this version:

Romain Mesnil, Olivier Baverel, Cyril Douthe. Conception des structures architecturales dans un contexte de ressources limitées. *Transitions. Les nouvelles Annales des Ponts et Chaussées*, 2022, 2, pp.108-115. hal-04212410

HAL Id: hal-04212410

<https://cnrs.hal.science/hal-04212410>

Submitted on 27 Sep 2023

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.

Conception des structures architecturales dans un contexte de ressources limitées

D'un ouvrage à l'autre, à programme équivalent, les impacts environnementaux des structures de bâtiment peuvent varier jusqu'à un facteur 10. Cela est essentiellement dû aux choix de conception effectués, dont l'influence est d'autant plus grande qu'ils sont précoces dans le processus général. Les choix de la forme et de la typologie structurelle sont ainsi déterminants, mais ils ne sont pas indépendants du choix du matériau ou de la technologie constructive. Pour tendre vers une conception économe, il est nécessaire de connaître la nature des paramètres et de leurs interactions, afin de trouver des compromis et permettre créativité et innovation structurelle. Cette vision intégrée, de la conception paramétrique aux technologies de fabrication, est au cœur des recherches du laboratoire Navier. Des méthodes originales, illustrées brièvement ici, ont ainsi été élaborées pour générer des formes dont les propriétés constructives spécifiques allient simplicité, technologie, efficacité mécanique et impacts limités.

From one structure to another, with an equivalent program, we observe a factor of change of up to 10 for environmental impact. The main source of difference here is design choices, which have a greater influence the earlier they are made in the general process. Choices of shape and structural typology are thus decisive, but they are not separate to the choice of material or construction technology. To move towards efficient design, it is therefore necessary to know the nature of parameters and their interactions in order to find compromises and allow creativity and structural innovation. This integrated vision, from parametric design to manufacturing technologies, is at the heart of research at Navier Laboratory. Original methods, briefly illustrated here, have been developed to generate shapes with specific construction properties combining technical simplicity, mechanical efficiency and limited impact.



Olivier Baverel

Professeur, École nationale supérieure d'architecture de Grenoble, Chercheur, Laboratoire Navier, École des Ponts ParisTech

Enseignant-chercheur, ses recherches portent sur les systèmes constructifs innovants limitant l'impact environnemental. C'est dans ce cadre qu'Olivier Baverel a contribué à des avancées majeures dans la conception (calculs et recherche de formes) des *gridshells* et *nexorades*. Coauteur de 10 brevets et de nombreuses publications scientifiques, il est également coéditeur de l'*International Journal of Space Structures* et membre de l'Executive Council de l'International Association for Shell and Spatial Structures.



Cyril Douthe

Ingénieur-chercheur, Laboratoire Navier, université Gustave Eiffel

Diplômé de l'École des Ponts ParisTech et titulaire d'un doctorat en Matériaux et structures, Cyril

Douthe intègre l'IFSTTAR en 2010, où il travaille d'abord sur la plateforme d'essai des structures. En 2015, il rejoint l'équipe Matériaux et structures architecturés du laboratoire Navier. Enseignant à l'ENPC, il est responsable du cours de conception des structures : partie projet, ainsi que de nombreux *design-build workshops*. Ses recherches portent notamment sur la géométrie constructive ou l'étude de la géométrie des courbes et des surfaces pour l'optimisation des méthodes de conception et constructions des structures ; le calcul des structures en grands déplacements avec des applications à la mise en forme des matériaux, aux filets pare-blocs et à la stabilité des structures ; les structures légères : recherche de forme, analyse et optimisation de coques minces, *gridshells*, *nexorades*, membranes, etc. Il est également responsable du site web www.thinkshell.fr.



Romain Mesnil

Chef de projet, Co-Innovation Lab, École des Ponts ParisTech

Romain Mesnil est ingénieur et docteur de l'École des Ponts ParisTech et titulaire d'un master du MIT. Son travail de thèse sur la rationalisation constructive de structures courbes a été récompensé par le prix Hangai décerné par l'International Association for Shell and Spatial Structures. Depuis 2017, il est responsable du développement du Co-Innovation Lab et de Build'In, sa plateforme technologique dédiée à la construction numérique. Les travaux de recherche qu'il encadre portent, notamment, sur la construction robotisée et l'impression 3D béton et en terre. Il est coauteur d'une trentaine de publications internationales et de deux brevets.

La responsabilité environnementale du concepteur

La réglementation environnementale, RE2020, impose aujourd'hui de réaliser la comptabilité des émissions de gaz à effet de serre d'une construction de sa conception à sa déconstruction (cf. Thiery, Deslot, *supra*). Les ingénieurs structures et architectes ont un rôle prépondérant dans l'utilisation finale de matière, et donc, dans l'empreinte environnementale des structures architecturales. En témoigne l'analyse de De Wolf *et al.* (2014) sur la masse structurale de différents stades aux dimensions comparables (cf. figure 1). Le célèbre « Nid d'oiseau » de Pékin nécessite ainsi près de vingt fois plus de béton que le Millenium Stadium de Cardiff, pour un nombre de places équivalent. Cette différence ne tient pas à un manque d'optimisation du Nid d'oiseau, mais bien au choix du système structurel opéré dès l'esquisse, à savoir, la volonté marquée d'effacer toute hiérarchie structurelle et tout alignement de la structure le long des chemins de moindre effort.

Material quantities (kg/seat)

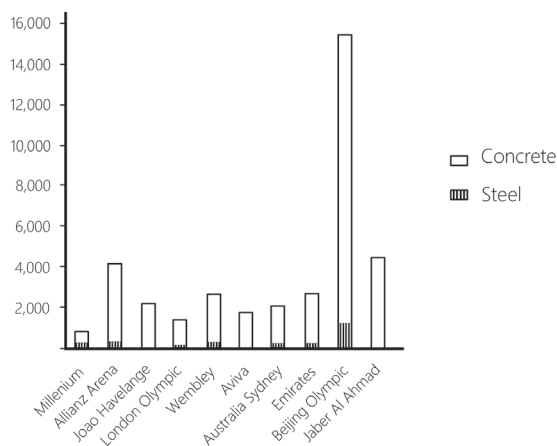


Figure 1. Consommation de matière dans plusieurs grands stades (source : modifié d'après Catherine De Wolf, Julia Hogroian, John Ochsendorf, *ibid.*).

Cet exemple révèle que les choix faits en phase amont, dont certains deviennent irrévocables avec le temps, ont un impact bien supérieur à ceux réalisés en phase aval. De même, au cours du processus de construction, plus la connaissance de l'objet à construire augmente grâce aux outils de conception assistée par ordinateur (cf. figure 2), moins elle est susceptible d'être mise à profit.

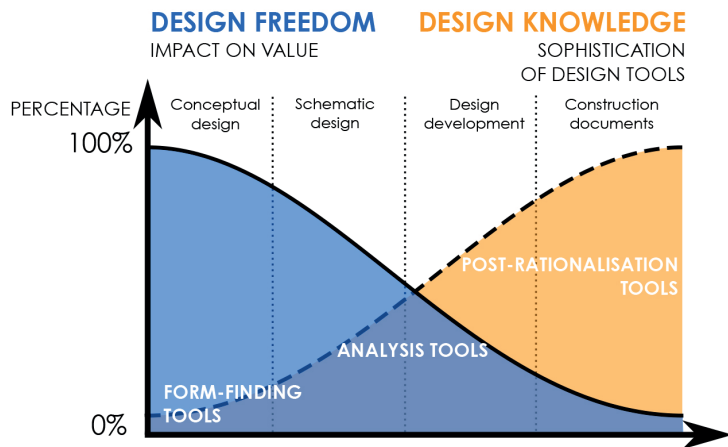


Figure 2. Impact des décisions de conception sur la valeur d'un projet © Romain Mesnil, 2017.

1. Ce projet a été partiellement financé par la chaire Science des matériaux pour la construction durable, soutenue par Holcim, Urban Canopee, Würth France et Xometry.

Les concepteurs restent donc mal outillés pour aborder la question de la conception des structures dans toute sa complexité. Si des logiciels de calcul de plus en plus sophistiqués permettent d'analyser et d'optimiser les structures, les phases d'esquisse se font souvent sans l'aide de la puissance calculatoire de l'ordinateur. Depuis une quinzaine d'années, le laboratoire Navier mène des recherches exploratoires sur cette zone blanche des outils de conception numérique. Elles visent à doter les architectes et ingénieurs d'outils de représentation intégrant des contraintes mécaniques ou constructives dès les premières phases du projet.

Il ne s'agit pas de substituer l'outil informatique au raisonnement de l'ingénieur. Le célèbre ingénieur britannique, Ove Arup, disait à ce propos qu'un calcul informatique est inutile si son résultat est déjà connu. L'objectif est bien de guider l'exploration des possibles grâce à l'intuition et la créativité du concepteur, la force de calcul brute de l'ordinateur et un travail rigoureux d'identification des paramètres de conception.

Pourquoi construire courbe ?

Pour être utilisée efficacement, il est nécessaire que toute la matière soit sollicitée. Tel est le cas lorsque les efforts subis par un élément de structure sont dans l'axe de l'élément. On parle alors de structures funiculaires. *A contrario*, pour les structures en flexion, les charges sont orthogo-

nales à l'axe de l'élément structurel. Dans le cas des poutres, par exemple, seuls les bords de l'élément sont sollicités, tandis que la partie centrale ne l'est que peu, d'où son appellation d'axe neutre. En conception structurelle, les structures funiculaires et celles avec de la courbure sont donc privilégiées. L'architecture vernaculaire africaine offre de nombreux exemples dans lesquels la courbure a été intelligemment exploitée pour des raisons structurelles, de quantité de matière et d'énergie disponible. La figure 3 illustre le potentiel de la courbure pour une utilisation rationalisée des matériaux. Il s'agit d'un projet réalisé à l'École des Ponts ParisTech, dans le cadre d'un travail de fin d'études du master Digital Building Design, encadré par la plateforme Build'In et le laboratoire Navier. La coque ne fait que 15 mm d'épaisseur (moins que l'enrobage dans le béton armé) pour une portée de 3,5 m. L'élanement, c'est-à-dire, le rapport entre épaisseur et portée, est encore plus faible que celui d'une coquille d'œuf¹.



Figure 3. La courbure permet à cette coque mince en béton de porter une charge accidentelle équivalente à son poids avec un élanement proche de 1/250 © Stefano Borghi/École des Ponts ParisTech.

La géométrie au service de la constructibilité

L'utilisation à bon escient de la courbure semble une piste incontournable vers plus de sobriété dans l'utilisation de matériau. Pour autant, la matérialisation concrète de ces surfaces courbes reste un défi pour les concepteurs et constructeurs. Pour mieux comprendre les enjeux de

conception, il est nécessaire de prendre un peu de recul et d'identifier les véritables leviers de conception dont disposent les ingénieurs et architectes. Marine Bagneris *et al.* (2008) en ont identifié cinq principaux :

- la structure, qui correspond à l'organisation de la matière et ses éventuelles hiérarchies ;
- le matériau ;
- la forme ;
- la technologie ;
- la force, notion englobant les efforts dans les éléments structurels.

Ces cinq leviers sont interdépendants, rendant le processus de décision d'autant plus ardu. Par exemple, il est bien connu que la typologie constructive des structures en maçonnerie diffère grandement de celle des structures métalliques. Bagneris *et al.* (*ibid.*) ont identifié trois grandes approches de génération de forme :

- l'approche géométriquement contrainte, qui consiste à dériver la forme de contraintes technologiques de fabrication ;
- l'approche mécaniquement contrainte, qui consiste à dériver la forme de contraintes mécaniques (par exemple, une arche en compression pure) ;
- l'approche flexible, qui consiste à dériver la forme d'autres considérations (par exemple, formelles).

D'un point de vue historique, l'approche géométriquement contrainte est largement prépondérante, les ressources technologiques disponibles ayant longtemps fait défaut. Partout, les bâtisseurs ont, des siècles durant, déployé des trésors d'inventivité dans la génération des formes, allant des dômes persans aux arcs gothiques, en passant par les voûtes nubienues. À partir des années 1950, l'approche mécaniquement contrainte se formalise, notamment, avec les structures de Frei Otto. Devant composer avec le manque de matériaux de construction dans l'Allemagne d'après-guerre, il pousse à l'extrême les principes de légèreté structurelle. L'approche flexible, quant à elle, est rendue possible à la fin des années 1990, grâce à la démocratisation de moyens informatiques de représentation de géométrie complexe issus de

l'industrie automobile (les *Non-rational Uniform B-Splines* — NURBS) et de technologies de fabrication de l'industrie manufacturière (notamment, les technologies d'usinage). Elle constitue une rupture dans la façon de penser la forme architecturale, conçue, dans un premier temps, indépendamment des forces de gravité et des technologies de fabrication. L'ingénieur doit alors faire preuve d'une grande créativité pour construire l'inconstructible. Bien que ces projets soient souvent salués comme de véritables tours de force, certaines structures à forme libre accusent de lourds dépassements de budget (*cf.* figure 1).

Cela tient en partie au fait que, depuis les trente dernières années, les concepteurs ont à disposition des outils de conception largement destinés à d'autres industries, et donc, pensés pour d'autres contraintes constructives. L'industrie automobile, par exemple, travaille plutôt sur des surfaces continues, alors que la construction reste un travail d'assemblage d'éléments plus ou moins standardisés, appelant à une représentation plus discrète de l'objet construit. Aussi, revenir à une approche de conception géométriquement contrainte serait finalement un retour à la normale, mais la conception d'un outil numérique compatible avec cette approche reste un sujet de recherche actif.

Quelques réalisations récentes

Le laboratoire Navier a développé plusieurs outils de conception permettant de générer des formes complexes naturellement constructibles, remettant l'approche géométriquement contrainte au cœur du processus de conception. L'un des exemples les plus représentatifs est illustré en figure 4. Il s'agit d'une coque discrète en bois, construite en 2017 par les robots de la plateforme Build'In de l'École des Ponts ParisTech, en collaboration avec plusieurs partenaires industriels². Elle s'inspire des systèmes structurels autobloquants, appelés « nexorades » (Baverel, 2000) et résulte d'un assemblage simple grâce à des liaisons « en T » entre les éléments.

². ABB, HAL Robotics, Simonin SA, Würth France.

3. Labex Modélisation et Expérimentation Multi-Échelle des Matériaux pour la Construction Durable. Voir : <http://mmcd.univ-paris-est.fr/>



Figure 4. Nexorade contreventée par des panneaux plans
4a. Usinage robotisé au sein de Build'In ; 4b. Pavillon
© Tristan Gobin/HAL Robotics Ltd.

Si la configuration géométrique des nexorades pour des polyèdres réguliers est connue depuis le début des années 2000, celle de nexorades à forme libre restait un problème ouvert. Un algorithme de génération de forme, basé sur des transformations d'un maillage par translation des arêtes, a permis de formaliser ce problème de recherche de configuration comme un problème d'optimisation quadratique sous contraintes linéaires, se prêtant fort bien à des méthodes d'optimisation très classiques (Mesnil, Douthe, Baverel *et al.*, 2018).

La forme de base a été générée à partir de la méthode marionnette (Mesnil, Douthe, Baverel *et al.*, 2017). En réinterprétant des exercices de géométrie descriptive du début du XIX^e siècle, elle permet de dessiner des maillages à quadrangles plans en quelques millisecondes. La forme est alors générée quasi-instantanément, ce qui permet d'explorer un espace de conception riche. De là, il est possible de résoudre les problèmes de fabrication dans une chaîne numérique intégrée, allant jusqu'à la simulation des trajectoires des robots industriels. La planéité des panneaux a été mise à profit pour contreventer la structure et créer une véritable coque discrète en bois. La structure a une portée de plus de 7 m et couvre 50 m², pour une épaisseur structurelle de 14 cm. Les éléments ont été

usinés par deux robots travaillant en collaboration, avec une précision d'environ un demi-millimètre (cf. Caron, Mesnil, *infra*).

Plus récemment, plusieurs thèses, financées par le labex MMCD³ et co-dirigées par Olivier Baverel (Navier) et Laurent Hauswirth (UGE, LAMA), proposent une relecture de résultats connus de géométrie différentielle continue et discrète. Elles portent, notamment, sur les surfaces de courbure moyenne constante et les surfaces à lignes de courbure planes. Celles-ci ont des propriétés constructives remarquables : couverture par panneaux quadrangulaires plans, maillage par des courbes planes, possibilité de donner une épaisseur aux éléments (nœuds, arêtes ou faces) (Tellier, Douthe, Hauswirth *et al.*, 2019 ; Mesnil, Douthe, Baverel *et al.*, 2018). La compréhension fine de leurs méthodes de génération facilite un transfert de connaissances du géomètre vers l'ingénieur et une application aux structures en bois. C'est l'objet de la thèse de Koliann Mam (CIFRE Elioth/ENPC, 2021), qui explore la part des assemblages dans l'analyse de cycle de vie de structures de type *grid-shell*. Pour cela, il compare différentes solutions techniques traditionnelles, sur plusieurs familles de surface à double courbure. Ce travail a abouti à des recommandations générales pour l'écoconception de structures en bois.

Conclusion

Les concepteurs de structures architecturales ont une responsabilité sociétale vis-à-vis de la sécurité de leurs ouvrages, mais aussi, de leur impact environnemental et de la valeur culturelle du bâti. Pour faire face à ces trois responsabilités, il est nécessaire d'avoir une vision globale, de la conception à la fabrication, et de se doter d'outils et de méthodes de conception adaptés. Dans ce cadre, la connaissance de la géométrie et des systèmes constructifs est centrale et il devient alors possible de laisser libre cours à une certaine créativité architecturale, d'explorer différentes solutions, d'analyser leurs performances, ou encore, de développer des solutions constructives innovantes.

5a.

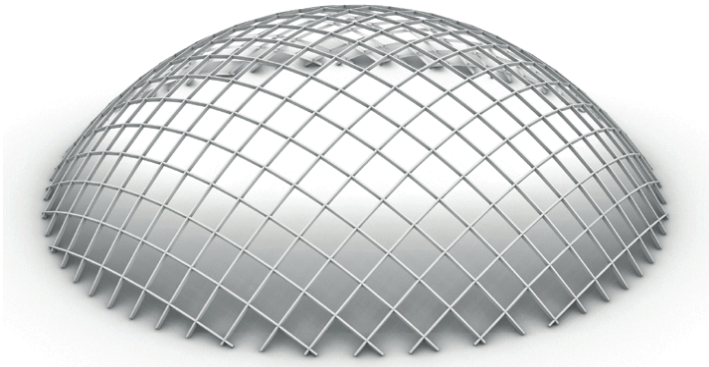


Figure 5a. Gridshell en bois, construit sur une surface à lignes de courbure planes, utilisé pour l'exploration structurelle et environnementale des ouvrages en bois de grande portée

Figure 5 sq. Impact des techniques d'assemblage sur les indicateurs :

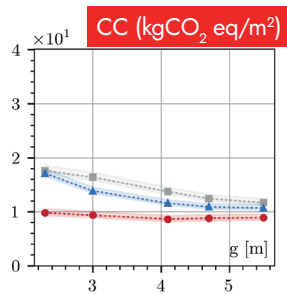
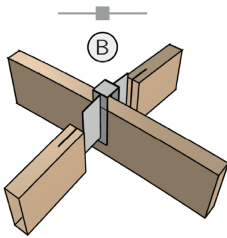
5b. de changement climatique (CC) ;

5c. de toxicité humaine (HTC) ;

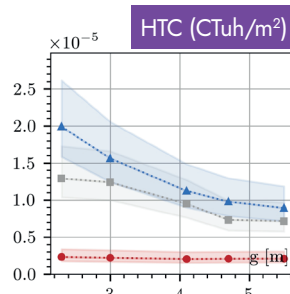
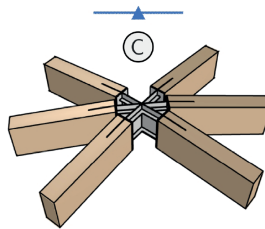
5d. de particules moyennes et fines (PMF) en fonction de la densité de la grille

© Koliann Mam, 2021.

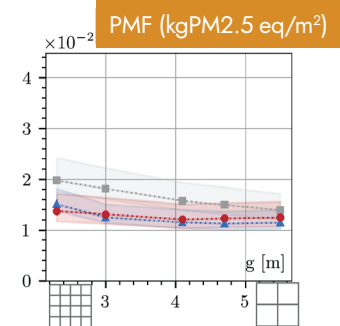
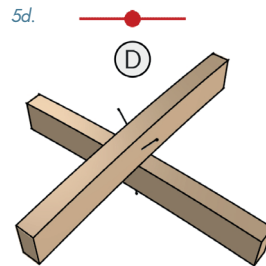
5b.



5c.



5d.



Bibliographie

BAGNERIS, Marine, MOTRO, René, MAURIN, Bernard *et al.*, 2008. Structural morphology issues in conceptual design of double curved systems. *International Journal of Space Structures*, vol. 23, n° 2, pp. 79-87.

BAVEREL, Olivier, 2000. *Nexorades: a family of interwoven space structures*. Thèse de doctorat. University of Surrey (United Kingdom).

MAM, Koliann, 2021. *Exploration structurelle et environnementale des ouvrages en bois de grande portée*. Thèse de doctorat : Structures et Matériaux. Champs-sur-Marne : École des Ponts ParisTech.

MESNIL, Romain, 2017. *Structural explorations of fabrication-aware design spaces for non-standard architecture*. Thèse de doctorat : Structures et Matériaux. Champs-sur-Marne : université Paris-Est.

MESNIL, Romain, DOUTHE, Cyril, BAVEREL, Olivier *et al.*, 2018. Morphogenesis of surfaces with planar lines of curvature and application to architectural design. *Automation in Construction*, novembre 2018, vol. 95, pp. 129-141.

MESNIL, Romain, DOUTHE, Cyril, BAVEREL, Olivier *et al.*, 2018. Form finding of nexorades using the translations method. *Automation in Construction*, novembre 2018, vol. 95, pp. 142-154.

MESNIL, Romain, DOUTHE, Cyril, BAVEREL, Olivier *et al.*, 2017. Marionette Meshes: modelling free-form architecture with planar facets. *International Journal of Space Structures*, juin-décembre 2017, vol. 32, Issue 3-4 : Special Issue. Advance geometry for structural engineering, pp. 184-198.

TELLIER, Xavier, DOUTHE, Cyril, HAUSWIRTH, Laurent *et al.*, 2019. Surfaces with planar curvature lines: Discretization, generation and application to the rationalization of curved architectural envelopes. *Automation in Construction*, octobre 2019, vol. 106, 102880.

WOLF (De), Catherine, HOGROIAN, Julia et OCHSENDORF, 2014. Comparing material quantities and embodied carbon in stadia. In : INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES (IASS). *Proceedings of IASS Annual Symposia*, pp. 1-8.