

Canopée en béton armé à la « Maison de l'Écriture » à Montricher

Concrete Canopy of "Maison de l'Écriture" in Montricher

Aurelio Muttoni, Miguel Fernández Ruiz

Introduction

Cet article présente une canopée en béton armé bâtie à la maison de l'Écriture à Montricher. Cette canopée est appuyée sur des colonnes préfabriquées en béton armé centrifugé avec des hauteurs allant jusqu'à 18 mètres. La forme de la canopée a été déterminée sur la base du champ de cisaillement d'un plancher dalle avec la même trame de colonnes. Les principes utilisés pour la conception et le dimensionnement de la canopée sont expliqués dans cet article, de même que les aspects principaux concernant les technologies utilisées pour sa construction.

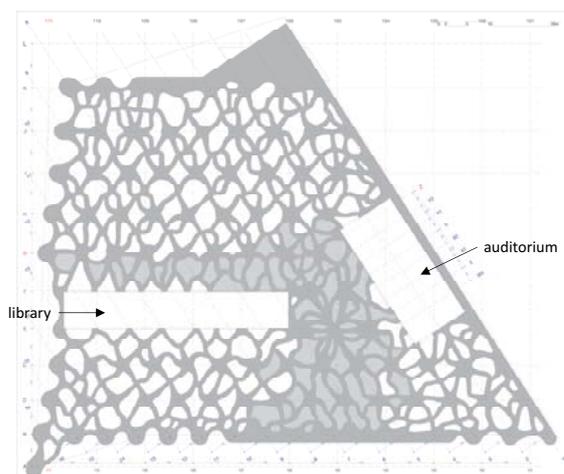


Fig. 1
Vue de la canopée de la Maison de l'Écriture
Top view of the canopy of the MdE.

La Maison de l'Écriture et sa canopée

La Maison de l'Écriture (MdE) est un centre dédié à la promotion de la littérature. Le projet est composé de deux bâtiments (une bibliothèque et un auditorium) de même que de plusieurs cabanes suspendues (actuellement en construction). La canopée de la MdE est l'un de ses symboles. Elle occupe environ 4500 m² et a une épaisseur de 400 mm. Elle s'appuie sur des colonnes très élancées en béton centrifugé avec des

Introduction

An innovative concrete canopy has been designed and constructed for the Maison de l'Écriture in Montricher. This canopy is supported by slender prefabricated columns up to 18 metres high and was designed according to the shear field of an ideal flat slab. In this paper, the principles used for the shear field design are presented as well as the main aspects concerning the various technologies used for its construction.

hauteurs variant entre 9 et 18 mètres. La canopée connecte les différentes parties de la MdE (Fig. 1) et offre aux cabanes suspendues des points pour leur accrochage (Fig. 2).

Conception de la canopée

Dans la forêt, une canopée n'est ni un ensemble de brins, ni une masse continue. De la même façon, la canopée de la Maison de l'Écriture n'est ni une grille de poutres, ni une dalle plate, mais



Fig. 2
Photos de la canopée avec ses colonnes préfabriquées.
Photos of the canopy of the MdE with its slender precast columns.

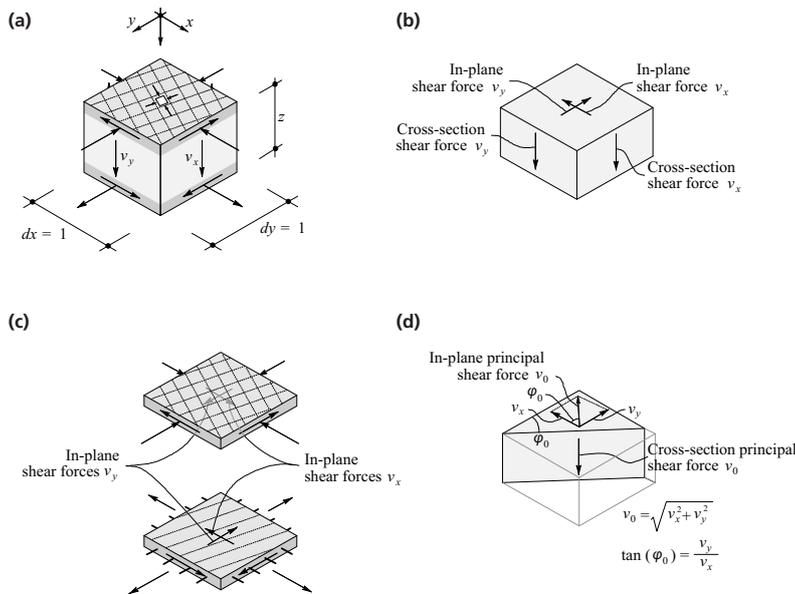


Fig. 3
 Concept de champ de cisaillement et modèle sandwich : a) vue d'un élément; b) forces agissant dans le noyau; c) forces agissant dans les panneaux; et d) direction et intensité de l'effort tranchant principal.
 The concept of shear field. Sandwich model of a reinforced concrete slab element: a) general view of the element; b) forces acting on the core; c) forces acting on the panels; and d) magnitude and direction of the principal shear force.

The "Maison de l'Écriture" and its canopy

The "Maison de l'Écriture" (MdE) is a centre dedicated to literature, with the aim to preserve and to promote it. It consists of two buildings (a library and an auditorium), and a number of suspended residences (currently under construction). The canopy of the MdE is one of its symbols. This 400 mm thick structure covering 4,500 m² is supported on slender centrifuged concrete columns with heights varying between 9 and 18 m. It links the different parts of the MdE (Fig. 1), and offers the anchorage points for suspending the residences (Fig. 2).

Conceptual design

In a forest, a canopy is not an assembly of branches, neither a continuum mass. In the same manner, the canopy of the MdE is neither a flat slab nor an assembly of beams. Its shape expresses the theoretical location and shape where the shear forces are transmitted inside a slab towards the supports (its shear field). Thus the regions near the columns

quelque chose d'intermédiaire. Sa forme transcrit la position idéale des membrures qui devraient être noyées à l'intérieur d'une dalle continue pour transmettre des charges gravitaires sur les colonnes et les murs qui la supportent. La position théorique des «brins» de cette forme complexe a été déduite à partir d'un calcul numérique, selon un modèle élastique linéaire des champs de cisaillement: le béton marque l'espace qui définit les directions principales de l'effort tranchant d'une dalle qui couvrirait l'ensemble de la Maison de l'Écriture.

Le concept du champ de cisaillement d'une dalle

Le champ de cisaillement est un champ vectoriel qui représente la direction (φ_0) et l'intensité (v_0) de la direction principale de l'effort tranchant unitaire d'une dalle. Pour des dalles en béton armé, un modèle sandwich est particulièrement adapté afin d'expliquer la signification physique de ces paramètres. Il considère la dalle divisée en trois régions (Fig. 3a): un noyau transmettant l'effort

(where shear forces are larger) become continuous. However, at a certain distance from the columns the shear forces are moderate, resulting into linear members.

The concept of the shear field of a slab

The shear field is a vector field representing the direction (φ_0) and magnitude (v_0) of the principal shear force per unit length in a slab. With respect to reinforced concrete slabs, a sandwich model is particularly useful to explain the physical meaning of such parameters. It considers a slab divided into three regions (Fig. 3a): a core carrying shear forces (Fig. 3b) and two outer panels (Fig. 3c) carrying in-plane shear and normal forces (thus equilibrating internal bending and torsional moments). With respect to the core, the shear forces per unit length acting in the cross-section (v_x and v_y) are in equilibrium with the in-plane shear forces developed in the upper and in the lower faces of the core, see Figure 3b. Such in-plane shear forces are in

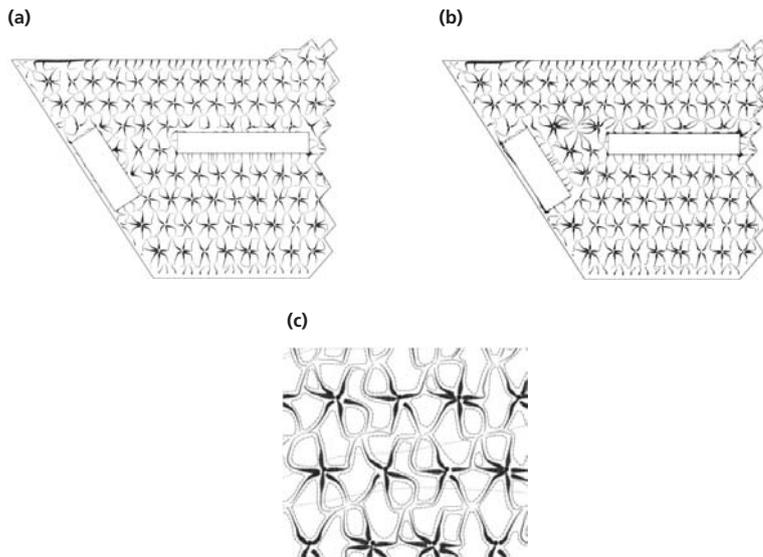


Fig. 4
 Analyse du champ de cisaillement de la canopée: a) trame régulière; b) trame sans colonne entre la bibliothèque et l'auditoire; et c) détermination de la géométrie à partir du champ de cisaillement.
 Shear field analysis of the canopy: a) regular column spacing; b) one column eliminated between library and auditorium; and c) obtaining the canopy geometry.

tranchant et deux panneaux extérieurs (Fig. 3c), qui équilibrent la torsion et les moments de flexion. Au sein du noyau, les deux composantes de l'effort tranchant unitaire (v_x et v_y) sont en équilibre avec les efforts rasants développés dans les panneaux supérieur et inférieur (Fig. 3b).

Les composantes unitaires de l'effort tranchant (v_x et v_y) sont ainsi les composantes de l'effort tranchant unitaire agissant, qui peut également être défini par son intensité (v_0) et sa direction (φ_0), voir Figure 3d. Une manière graphique compacte de l'exprimer consiste à dessiner l'enveloppe des directions principales d'effort tranchant avec une épaisseur du trait proportionnelle à son intensité. Un tel dessin s'avère très pratique afin de comprendre le comportement statique de la structure.

Recherche de la forme pour la canopée de la MdE

Afin de trouver la forme de la canopée de la MdE, le champ de cisaillement d'une dalle plate appuyée sur la même trame de

turn in equilibrium with the force-increments acting in the panels as shown in Figure 3c. The in-plane shear forces (v_x and v_y) are two vectors whose resultant is the principal shear force, defined by its magnitude (v_0) and by its in-plane direction (φ_0), see Figure 3d.

It can be noted that the in-plane principal shear force is in equilibrium with the cross-section principal shear force in the core of the sandwich, which has the same magnitude (v_0) and develops in a plane perpendicular to the direction φ_0 (Fig. 3c,d). The shear field can be represented by a set of lines with direction φ_0 at each point and whose thickness is proportional to its magnitude (v_0). Such plots help understanding the shear forces developing in a slab and thus how the forces are transmitted to the supports of the slab.

Form-finding in the canopy of the MdE

In order to determine the shape of the canopy of the MdE the shear field of a flat slab support-

colonnes et des bâtiments était calculé. Cette analyse a permis d'adapter la forme de la canopée aux conditions de bord réels et de raffiner sa forme pour l'adapter aux besoins de l'architecture.

Après plusieurs essais, la forme de la Figure 4 était retenue comme satisfaisante des points de vue de l'architecture et du comportement statique. Une colonne entre la bibliothèque et l'auditoire était finalement enlevée afin d'améliorer la qualité de l'espace dans cette zone. Comme la Figure 4b le montre, la géométrie du champ de cisaillement était alors adaptée à cette circonstance. Une fois

Equipe/Team
Client/Owner
 Fondation Jan Michalski, Montricher
Entreprise totale/Total contractor
 Losinger-Marazzi SA, Bussigny
Architecture
 Mangeat Wahlen, architects associés, Nyon
Conception de la structure et ingénierie/Structural design and engineering
 Muttoni et Fernández, Ingénieurs Conseils SA, Ecublens (Lausanne)

ed on the existing buildings and columns was computed. This allowed tailoring the canopy to the boundary conditions as well as refining its shape to adapt it to the architectural needs.

After a number of preliminary designs, the shape of Figure 4a was selected as satisfactory from an engineering and architectural point of view. A column between the library and auditorium was eventually removed to enhance the space in the place between them (Figure 4b), and the resulting shear field thus adapted to this situation.

Once the shear field was selected, only the required material for carrying shear was kept (refer to Fig. 4c). The moment field (bending and torsion moments) of the resulting structure was thus modified with respect to that of the continuous slab (as the top and bottom layers of the sandwich model are no longer present everywhere). However, the shear field of the continuous slab and of the canopy is still the same, as the forces in the canopy are transmitted to the supports by following the direction of the beams (thus justifying the selected procedure to find the shape of the structure).

Buildings

Besides the canopy, two conventional buildings were introduced as part of the construction, a library and an auditorium. The buildings have continuous walls of 12 m height above the soil level. Thus, the canopy also turned out to be a continuous slab at their interface (Fig. 2).

Columns

A forest canopy is supported by slender trunks in the same manner as the canopy of the MdE is also supported on a number of slender columns. These columns have variable height varying between 18 and 9 meters and with diameters varying between 450 and 350 mm. They were prefabricated in centrifuged concrete. The mechanical slenderness of the columns was kept approxima-

que le champ de cisaillement était déterminé, seulement la matière nécessaire afin de transmettre l'effort tranchant était retenue (voir Fig. 4c). Le champ des moments (moments de flexion et moment de torsion) de la structure était ainsi modifié par rapport à celui d'une dalle plate (les nappes supérieures et inférieures du sandwich n'étant plus continues partout). Cependant, le champ de cisaillement de la dalle continue et celui de la canopée restent identiques car les forces de la canopée sont amenées jusqu'aux supports suivant la direction des brins (ainsi justifiant la démarche suivie pour trouver la forme de la canopée).

Bâtiments

Outre la canopée, deux bâtiments conventionnels ont été bâtis, une bibliothèque et un auditoire. Les bâtiments ont des murs de 12 mètres de hauteur sur le niveau du sol, ce qui imposait à la canopée de devenir une surface continue à leur engagement.

Colonnes

Une canopée forestière est appuyée sur des troncs élancés de la même façon que la canopée de la MdE est appuyée sur des colonnes en béton élancées. Ces colonnes ont une hauteur variable entre 9 et 18 mètres et avec des diamètres variant entre 450 et 350 mm. Les colonnes sont préfabriqués en béton centrifugé et ont un élanement mécanique à peu près constant ($L_{cr}/\varnothing \approx 30$). Ce dernier critère permettait d'optimiser le comportement statique tout en respectant l'expression architecturale de l'ensemble (Fig. 2). Pour ce but, certaines colonnes étaient encastées dans leur fondation tandis que d'autres étaient simplement appuyées (afin de simplifier la construction et la pose des éléments).

Dimensionnement

Une fois la géométrie de la structure définie, la canopée a été calculée à l'aide d'un modèle 3D de la structure (tenant compte des régions en forme de dalle et des

tely constant ($L_{cr}/\varnothing \approx 30$). This optimized the mechanical behaviour of the members and was in agreement with the architectural expression (refer to Fig. 2). To do so, some columns required to be clamped in the foundations while others were simply supported on the foundations (to enhanced ease of construction of the prefabricated members).

Detailed design

Once the final geometry was established, the canopy was designed by using a 3-D model of the structure (accounting for the plane and linear regions). This allowed determining the internal forces in the structure, as its structural behaviour depends on the actual placing of the members and on their linkage. On that basis, the reinforcement was designed.

The reinforcement was adapted to the various regions of the structure. For typical spans of approx. 7 m, concrete was reinforced by using ordinary reinforcement and steel fibres (20 kg/m³, Fig. 5a). The fibres allowed reducing the required minimum reinforcement amount and helped in zones where ordinary reinforcement was difficult to place due to complex geometries. Non-prestressed strands were also used (1/4" diameter, $f_{p0.1k} = 1,770$ MPa) to suitably reinforce the member and to provide continuous reinforcement in the nodal regions.

In the linear members, reinforcement followed the shape of the members and was composed of groups of up to 4 bars of diameter 10 mm bent "in situ". In order to resist shear, torsion and deviation forces, transverse pins were arranged on the sides of the members. This reinforcement was developed in the nodal (continuous) regions, with a classical orthogonal reinforcement layout (see Fig. 5a).

Steel heads were placed over the columns (Fig. 5b). These elements were specifically designed to provide sufficient punching shear strength and anchorages required for suspending the residences. The shear heads were composed

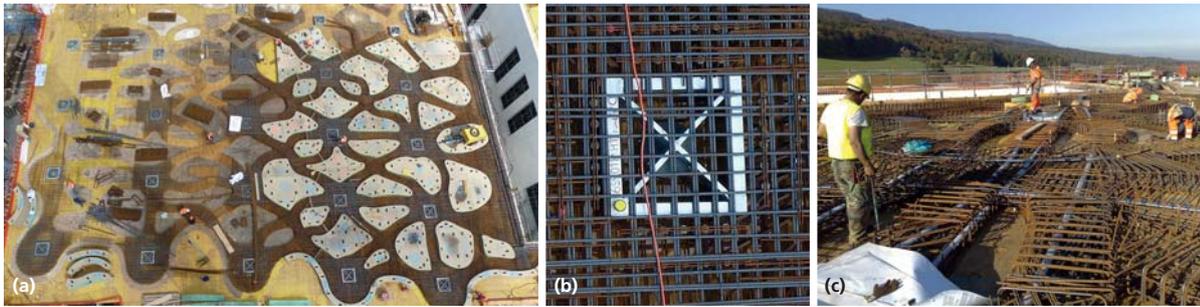


Fig. 5

Construction: a) armature ordinaire et torons non-précontraints; b) têtes métalliques; et c) gâines de précontrainte.
 Construction: a) placing of ordinary reinforcement and non-prestressed strands; b) steel heads; and c) post-tensioning tendons.

brins). Sur la base de ce modèle, les efforts de réduction étaient déterminés et l'armature finalement dimensionnée. L'armature a été adaptée aux différentes régions de la structure. Pour des portées typiques de 7 mètres, le béton était renforcé avec des barres d'armature ainsi que 20 kg/m³ de fibres (voir Fig. 5a). Les fibres ont permis de réduire l'armature minimale et ont aidé dans les zones difficiles à armer. En outre, des torons non-précontraints étaient également disposés (1/4" de diamètre, $f_{p0.1k} = 1770$ MPa) afin d'armer correctement l'élément et d'avoir une armature continue sur les zones nodales. Dans les brins, l'armature suivait la forme des membres et était composée par des groupes de 4 barres de diamètre 10 mm pliées sur place. Afin de résister à l'effort tranchant, la torsion et les forces de déviation, des épingles transversales étaient disposées de chaque côté de l'élément. Cette armature était ancrée dans les zones nodales (sur les colonnes) où l'armature était disposée suivant une trame orthogonale classique (Fig. 5a).

Sur les colonnes, des têtes métalliques étaient disposées (Fig. 5b). Ces éléments étaient conçus spécifiquement afin d'offrir une résistance suffisante au poinçonnement ainsi que pour permettre l'ancrage des cabanes suspendues. Les têtes métalliques avaient quatre profils prismatiques avec des trous filetés à l'intérieur permettant de visser les pièces d'ancrage

of four prismatic members with threaded holes (for screwing the anchorage pieces of the residences). These prismatic members also served to weld the lateral profiles as well as the main plates (35 mm thick).

A special zone was the region between the library and auditorium, where a column was removed (Fig. 4b). In this zone, therefore, the span length was thus doubled and deflections were significantly larger than in the rest of the canopy. As a consequence, post-tensioning tendons were also placed (Fig. 5c), which allowed suitably balancing a considerable fraction of the permanent loads leading to deflections similar to those for the rest of the structure.

des cabanes. Ces éléments prismatiques permettaient en outre la soudure des profils latéraux et des tôles de la tête (de 35 mm d'épaisseur).

Une zone particulière se trouve dans l'engagement entre la bibliothèque et l'auditorium, où une colonne avait été enlevée (Fig. 4b). Dans cette zone, la portée correspond au double de la portée typique et les flèches étaient très importantes par rapport au reste de la canopée. En conséquence, des câbles de post-tension furent disposés (Fig. 5c) permettant de balancer une fraction adéquate des charges permanentes et menant ainsi à des flèches comparables au reste de la structure.

Auteurs/Authors

Aurelio Muttoni

Prof. Dr ès techn. ing. dipl. EPFZ
 aurelio.muttoni@mfic.ch

Miguel Fernández Ruiz

Dr ing. dipl. UPM
 miguel.fernandezruiz@mfic.ch

Muttoni et Fernández,
 Ingénieurs Conseils SA
 CH-1024 Ecublens