

Une nouvelle toiture pour le Musée Olympique à Lausanne

A new roof for the Olympic Museum at Lausanne

Aurelio Muttoni

Introduction

Dans le cadre de l'agrandissement du Musée Olympique à Lausanne (Suisse), une nouvelle toiture a été construite sur l'ancien bâtiment réalisé en 1990. La structure de cette toiture, fonctionnant aussi comme brise-soleil sur sa partie sud, est une grille de poutres en béton fibré à ultra-hautes performances. Une comparaison avec d'autres options (bois lamellé-collé, aluminium extrudé) a démontré que ce matériau peut être intéressant si tous les aspects sont considérés (économie, durabilité, facilité d'exécution, aspect architectural, poids et délais d'exécution). Des éléments de grandes dimensions (longueurs jusqu'à 21 m) ont pu être réalisés en assemblant éléments plus courts par la technique des joints conjugués et de la précontrainte par post-tension. En outre, le BFUHP permet de réaliser des éléments durables malgré leurs faibles dimensions et leur élancement.

Le Musée Olympique et sa nouvelle toiture

Le Musée Olympique, réalisé en 1990 sur la rive du Lac Léman à Lausanne, est devenu avec le temps le musée le plus fréquenté de la ville. La fréquentation accrue ainsi que des nouvelles exigences muséales ont rendu nécessaire un agrandissement et la réalisation d'une nouvelle toiture sur l'ancienne terrasse afin d'abriter un nouveau restaurant et une nouvelle salle de banquets. Sur la partie sud, la nouvelle couverture fonctionne aussi comme brise-soleil. La nouvelle structure couvre toute la partie du bâtiment orientée vers le lac sur un front de 71,25 m et une largeur de 21,00 m (Fig. 1). Les travaux ont eu lieu entre janvier 2012 et septembre 2013.

Introduction

As part of upgrading and extending the Olympic museum in Lausanne a new roof was built to cover the existing building (finished in 1990). The new roof also acts as an unusual canopy, shading natural light in the south part of the building. It consists of a grid of beams cast in ultra-high performance fibre-reinforced concrete (UHPFRC). A comparison with other options (timber and aluminium members) showed the UHPFRC solution to be the most competitive when considering all requirements of the structure (economy, durability, ease of construction, architectural expression, weight and construction details). The long lengths of the beams (up to 21 meters) were obtained by assembling shorter members using the match casting technique in combination with post-tensioning. In addition, the use of UHPFRC allowed the manufacture of durable elements, despite the limited thickness used and the pronounced slenderness of the beams.

The Olympic Museum and its new roof

The Olympic Museum was built in 1990 at the shores of Lake Geneva and today it is already the most frequently visited museum in Lausanne. It was decided to upgrade and extend the museum due to the large number of visits per year and at the same time to implement a number of new requirements for museums. An important part of the project was to build a new roof over the existing terrace to accommodate a new restaurant. On its south part, the new roof also acts as a canopy, shading natural light. The new structure covers the part of the building facing the lake with a total length of 71.25 m and a

Système porteur

La structure est une grille de poutres à trame régulière. 96 sommiers transversaux de 18 à 21 m de longueur, une hauteur de 1,00 m et un espacement de 0,75 m sont suspendus à des poutres métalliques longitudinales couvrant les 71,25 m de longueur (Fig. 2a). Ces dernières sont appuyées sur des murs en béton et sur des colonnes métalliques. Sur la partie sud orientée vers le lac, les sommiers transversaux sont en porte-à-faux sur une longueur de 4,50 m jusqu'à 9,00 m (Fig. 2b). La partie nord sur le restaurant et une partie au sud de la façade vitrée sont couvertes par une tôle à profil trapézoïdal qui assure le contreventement horizontal. A l'extrémité sud fonctionnant comme brise-soleil, la tôle est remplacée par des poutres longitudinales espacées de 0,75 m et de 0,55 m de hauteur appuyées sur les porte-à-faux fonctionnant comme raidisseurs et s'opposant ainsi au déversement des sommiers transversaux. Les sections de tous les éléments sont trapézoïdales avec largeurs variables entre 80 et 100 mm. Puisque la partie en porte-à-faux des sommiers transversaux se situe à l'extérieur, un joint en proximité de la façade Sud a dû être disposé pour les séparer thermiquement de la partie à l'intérieur. Ce joint thermique est conçu pour reprendre l'effort tranchant et le moment de flexion qui sont maximaux à cet endroit. Certains sommiers transversaux entièrement à l'extérieur ont une longueur ininterrompue de 21 m. Les autres, interrompus par le joint thermique, ont une portée variable entre 9,00 et 13,50 m à laquelle s'ajoute le porte-à-faux au-delà du joint (Fig. 2b).

Lors de la phase initiale du projet, plusieurs options ont été étudiées pour ce qui concerne la matérieli-

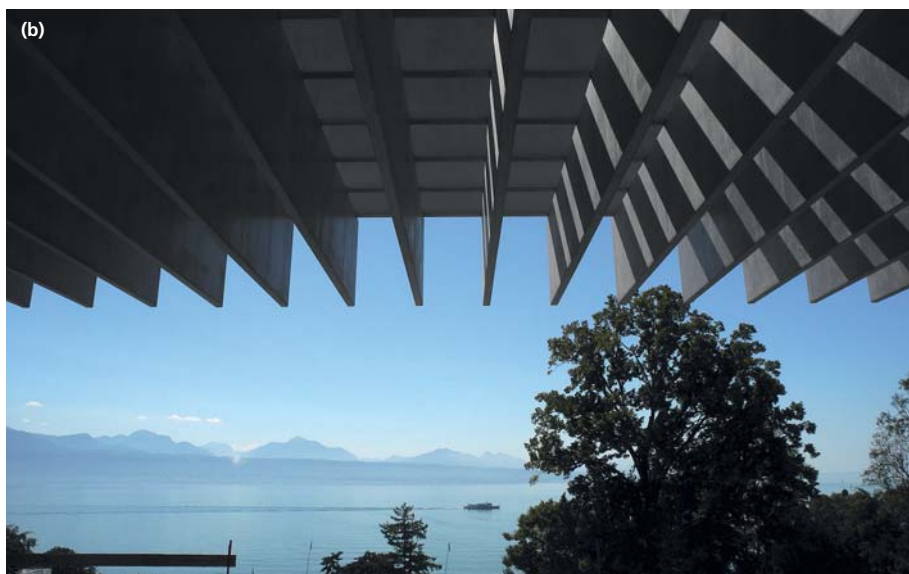
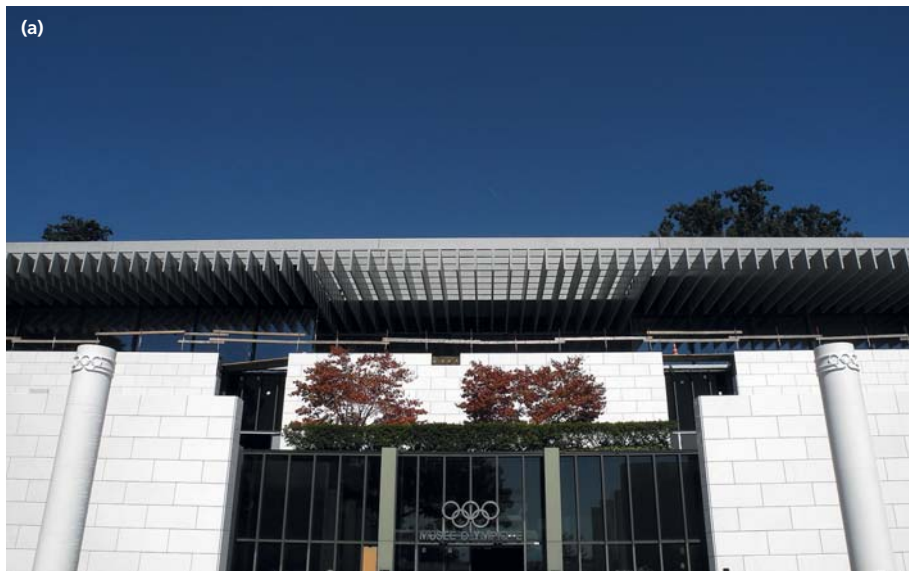


Fig. 1

a) Façade sud du Musée Olympique et nouvelle toiture pendant les travaux,
b) vue vers le lac depuis l'intérieur et c) vue de la partie fonctionnant comme
brise-soleil.

a) South facade of the Olympic Museum and new roof during construction,
b) view towards the lake, and c) view of the canopy.

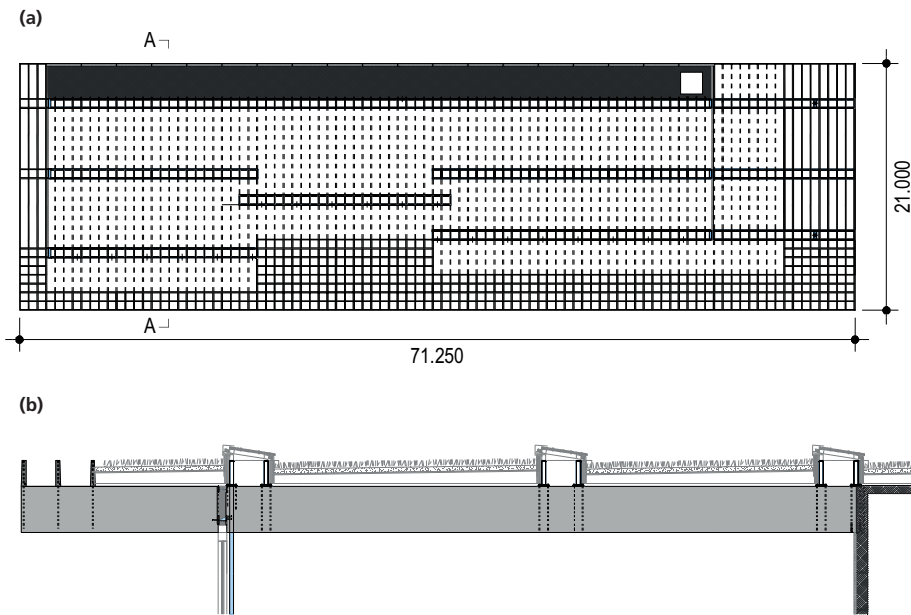


Fig. 2

a) vue en plan et b) schéma d'une poutre transversale avec portée de 13,50 m et porte-à-faux de 4,50 m (coupe A-A dans la vue en plan).

a) plan view and b) view of a transverse beam with a span of 13.50 m and a cantilever of 4.50 m (cross section A-A in plan view).

sation (BFUHP, bois lamellé collé, aluminium extrudé). En considérant tous les aspects économiques (coûts de production et d'entretien), techniques (complexité des détails constructifs), exécutifs (facilité de montage et possibilité d'assurer les délais), de durabilité et architecturaux, l'option en BFUHP a été retenue.

Préfabrication, montage et détails constructifs

Les éléments en BFUHP ont été préfabriqués dans une usine située à environ 80 km du chantier. Pour faciliter le décoffrage des moules métalliques (Fig. 4a), les sections des sommiers et des raidisseurs sont trapézoïdales avec épaisseurs variables entre 80 et 100 mm. A cause de l'élanement des éléments, pour faciliter le transport et le montage, les sommiers de 21 m de longueur ont été fabriqués et transportés en deux pièces de 10,50 m (Fig. 3b) et assemblées sur place au droit de joints conjugués précontraints par deux câbles mono-torons post-tendus (Fig. 3c). Pour les autres sommiers, le joint thermique a fait office de joint conjugué (Fig. 4c). Ce joint

width of 21.00 m (Fig. 1). The work was started in January 2012 and finished in September 2013.

Structural system

The structure of the roof consists of a regular grid of beams. In the transverse direction, the beams have a length varying between 18 and 21 m. They are 1.00 m in height and are spaced at 0.75 m. These beams are suspended from steel girders covering the 71.25 m length of the roof (Fig. 2a). The steel girders are supported on concrete walls and steel columns. In the south part, facing the lake, the transverse beams have cantilevers ranging from 4.50 m to 9.00 m (Fig. 2b). To ensure lateral stability, the north part (over the restaurant) and some regions of the south part are covered by a steel sheet of trapezoidal shape. This steel sheet is replaced in the outermost south regions by longitudinal stiffeners, spaced at 0.75 m and with a height of 0.535 m, supported on the cantilevers and acting as diaphragms (to resist lateral instability of the transverse beams). All sections were trapezoidal-shaped with a thickness

est composé de deux tubes en acier inoxydable dans lesquels trouvent place les deux torons dans la partie supérieure tendue. Ces tubes, avec les gaines des câbles de précontrainte, ont été injectés par coulis de ciment après mise en tension des câbles sur le chantier. Dans la partie inférieure des sommiers, la force de compression est reprise par des plaques en acier inoxydable soudé.

La fixation des raidisseurs sur les sommiers transversaux a été faite par le biais de plaques en acier inoxydable fixées aux raidisseurs par des tiges lors du bétonnage (Fig. 4a et 4b). Lors du montage, les plaques ont été boulonnées sur les sommiers inférieurs par le biais d'écrous vissés sur des tiges filetées en attente (Fig. 3d). Le même détail a été utilisé pour suspendre les sommiers transversaux aux poutres métalliques longitudinales (Fig. 4c).

La résistance à la flexion des sommiers transversaux est assurée essentiellement par les torons post-tendus. Afin de permettre la fixation des gaines vides lors du bétonnage, des barres de montage dans le sens transversal et longi-

varying between 80 and 100 mm. Taking into account the fact that the cantilevers are exposed to environmental conditions in the south part, a joint was provided close to the south façade for thermal insulation purposes. This joint transfers the shear and bending moments, which are highest at this region, of the transverse beams. Some of the transverse beams have a length of 21 meters without joints. The others are not continuous (with the thermally insulating joint), have inner spans ranging from 9.00 to 13.50 m (Fig. 2) and are followed by the cantilever region.

During the design of the structure, several options regarding the material to be used for the roof were investigated (UHPFRC, timber, extruded aluminium). Taking into account economic aspects

tudinal ont été utilisées. A ces armatures s'ajoutent les tiges verticales nécessaires pour les fixations des éléments et la suspension des sommiers (Fig. 4a et 4b).

Les raidisseurs longitudinaux ont la même largeur (80–100 mm) mais sont de moindre hauteur (535 mm) et leur longueur varie entre 3,00 et 12,00 m. Ils ont été coulés de la même façon et la résistance à la flexion des éléments dépassant une certaine longueur est assurée par deux torons prétendus en usine (méthode des fils adhérents).

Caractéristiques du BFUHP et dimensionnement

Le « béton spécial industriel » (BSI® avec 200 kg/m³ de fibres métalliques, $l_f = 20$ mm, $\phi_f = 0,3$ mm) a été utilisé pour tous les éléments en BFUHP. Aucun traitement ther-

(both production and maintenance), technical aspects (complexity of construction details), construction technique (ease of construction and limited construction time), durability issues and/or architectural needs, UHPFRC was finally selected.

Precasting, erection and detailing

The UHPFRC members were precast in a specialized factory located 80 km from the construction site. In order to enhance the ease of demoulding (Fig. 3a), the cross-sections of the beams were trapezoidal with varying thicknesses between 80 and 100 mm. Due to the slenderness of the members, and to improve transportation and erection of the beams, the beams with a total length of 21 meters were fabricated as two pieces of



Fig. 3

a) préparation du coffrage métallique, b) manutention en usine des éléments de 10,50 m de longueur, c) joint conjugué des sommiers de 21 m et d) montage des raidisseurs longitudinaux sur les sommiers transversaux.

a) arrangement of steel formwork, b) handling of the 10.50 m elements, c) match-casted joint for the 21 m beams and d) erection of longitudinal stiffeners over the transversal beams.

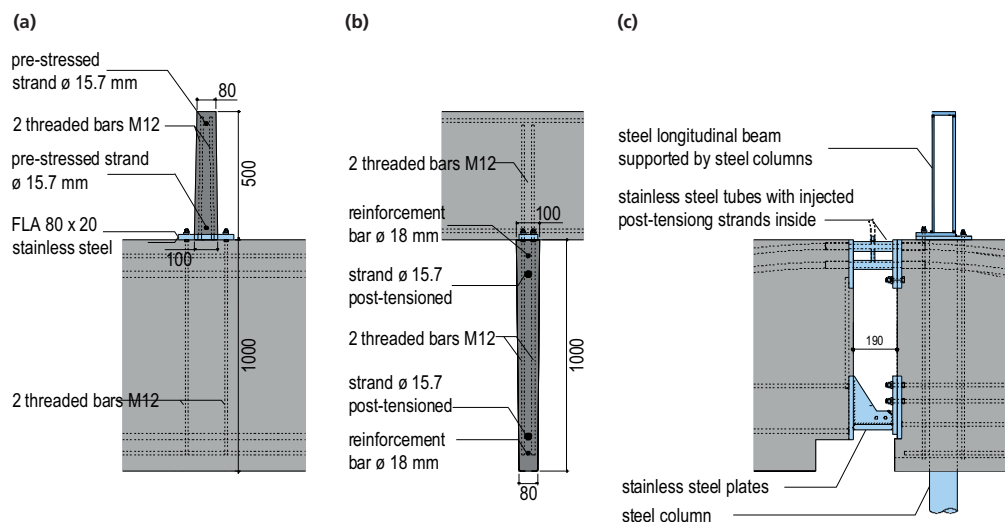


Fig. 4

a) et b) détail de la fixation des raidisseurs supérieurs sur les sommiers transversaux en dessous et
 c) détail du joint thermique et de la suspension des sommiers transversaux sur les sommiers métalliques longitudinaux.

a) and b) detail of joint between longitudinal and lower transversal beams and c) detail of thermally insulating joint and of the suspension of transverse beams from the steel beams.

mique n'a été appliqué lors du bétonnage. La conformité du béton a été contrôlée par des essais de compression sur cubes coulés (100x100x100 mm), par des essais de traction sur carottes ($\phi = 50$ mm, $l = 200$ mm) prélevées d'un sommier d'essai et par essais de flexion sur prismes (90x90x400 mm) découpés du même élément (4 prismes dans le sens vertical et 4 dans le sens longitudinal) ou coulés sur place.

Les essais ont montré une variabilité relativement faible pour ce qui concerne la résistance à la compression après 28 jours (valeur moyenne = 188 MPa, écart type = 9,8 MPa à 28 jours) et la résistance à la traction de la matrice cimentaire (entre 8 et 12 MPa). Le comportement après fissuration est par contre relativement variable. Ceci est dû essentiellement à la distribution des fibres et à leur orientation peu homogène dues à la présence des armatures (barres de montage et tiges de fixation) ainsi que des gaines des câbles de précontrainte dans les sommiers transversaux et des torons prétendus dans les raidisseurs longitudinaux.

Pour cette raison, les armatures passives et prétendues ont été

10.50 m each (Fig. 3b). These pieces were later assembled at the construction site by means of the match-casted joints and post-tensioning (monostrand) tendons (Fig. 3c). For the other beams, the thermally insulating joint was used as a match-casted joint (Fig. 4c). This joint consisted of two tubes in stainless steel, where the two monostrand tendons were located (in the tension side of the member). These tubes, together with the ducts, were grouted with mortar after post-tensioning the strands. In the bottom side, the compression forces are transferred by means of welded stainless steel plates.

Assembling the transversal beams and longitudinal stiffeners was carried out using stainless steel plates fixed to the longitudinal members prior to concreting (Fig. 4a and 4b). During erection, the plates were bolted to the transverse stiffeners (by means of nuts screwed to bolts partly cast outside the concrete of the transverse beams, Fig. 3d). In the same way the transverse beams were suspended from the longitudinal steel girders (Fig. 4c).

The flexural strength of the transverse beams is ensured by the

dimensionnées selon les règles classiques pour reprendre la totalité des efforts de traction à l'état limite ultime dus à la flexion, à l'effort tranchant et à la diffusion dans le plan due aux forces concentrées (forces d'ancrage des câbles post-tendus et forces introduites par les joints thermiques). La résistance assurée par les fibres a par contre été considérée pour

Equipe/Team

Client/Owner

CIO, Comité International Olympique, Lausanne

Architecture

B+W architecture sàrl, Ueli Brauen + Doris Wälchli, Lausanne

Conception de la structure et ingénierie/Structural design and engineering

Muttoni et Fernández, Ingénieurs Conseils SA, Ecublens (Lausanne)

Eléments préfabriqués/ Precast elements

MFP Préfabrication SA, Marin-Epagnier, et Dénériaz SA, Lausanne

Fourniture de matériaux et assistance technique/Material supply and technical assistance

EIFFAGE TP – Département BSI®, F-Neuilly sur Marne

Construction métallique/ Steel elements and erection

Stephan SA, Fribourg

Précontrainte/Prestressing

Freyssinet SA, Moudon

post-tensioning strands. Transverse and longitudinal bars were also installed to ensure correct placing of the duct. In addition to this reinforcement, vertical bars were also arranged to fix or to suspend the beams (Fig. 4a and b). The longitudinal stiffeners have the same thickness (80–100 mm) but have a lower height (535 mm) and their length varies between 3.00 and 12.00 m. They were cast in the same way. The bending strength of the longest members was ensured by means of two strands prestressed in the factory before pouring the concrete.

UHPFRC properties and design criteria

The “béton spécial industriel” (BSI® with 200 kg/m³ metallic fibres, $l_f = 20$ mm, $\phi_f = 0.3$ mm) was used for all members with UHPFRC. No thermal treatment was applied after concreting. The quality of the concrete was checked by compression tests on 100x100x100 mm cubic specimens, by tension tests on drilled cores from one specimen ($\phi = 50$ mm, $l = 200$ mm) and 4-point-bending tests on prisms (90 x 90 x 400 mm) sawn from the same element. The tests exhibited a relatively low scatter with respect to the concrete compressive strength at 28 days (average value equal to 188 MPa, standard deviation equal to 9.8 MPa at 28 days) and the tensile strength of the cement matrix (between 8 and 12 MPa). The behaviour after cracking however was more variable. This is essentially due to the relatively inhomogeneous distribution and orientation of fibres because of the presence of linking threaded rods, post-tensioning ducts (with their support bars during pouring) and pre-tensioning strands. For this reason, the ordinary and prestressed reinforcement have been designed according to the classical design methods so that they ensure resistance to all the tension forces at the ultimate state due to bending, shear and in-plane spreading of concentrated forces (anchorage forces of post-tensioning tendons and for-

reprendre les forces d'adhérence des torons prétendus et assurer la diffusion hors du plan des forces concentrées. La résistance élevée à la compression a été indispensable afin d'assurer des épaisseurs réduites malgré l'introduction d'effort concentrés importants (ancrage des câbles et joints thermiques, voir Fig. 4c).

Afin d'empêcher le déversement des sommiers minces, tous les appuis sont disposés en dessous des poutres longitudinales métalliques (sommiers en BFUHP suspendus) et les tiges de fixation aux éléments longitudinaux (raideurs et poutres métalliques) ont été dimensionnées pour reprendre les efforts de second ordre qui pourraient en dériver.

Conclusions

Une étude de variantes a permis de comparer la solution en BFUHP à deux options en bois lamellé-collé et en aluminium extrudé. D'autres options avaient été écartées dans une phase préliminaire pour différentes raisons. Cette étude a démontré que le BFUHP est un matériau intéressant pour la réalisation d'une toiture avec des exigences accrues. En outre, le BFUHP permet de réaliser des éléments durables malgré leurs faibles dimensions et leur élancement. Cependant, il est encore à vérifier si le taux de fibres ne pourrait pas être réduit en considérant le fait que de toute façon, dans des éléments d'une certaine dimension, des armatures ordinaires passives ou actives sont indispensables pour reprendre les efforts plus importants.

ces in the structural elements at the expansion joints). The contribution of fibres enhances (and was considered) in the bond properties of concrete and to ensure the strength of the out-of-plane spreading of the concentrated forces. The very high compressive strength was required in order to keep the dimensions very limited despite the significant concentrated forces (anchorage of tendons and thermic joints, see Fig. 4c).

In order to avoid lateral instability of the thin and slender beams, all supports were arranged on bottom of the longitudinal steel beams and the rods used to fix them to the longitudinal elements were designed accounting for the potential second order effects.

Conclusions

A detailed study of structural solutions for the new roof of the Olympic Museum allowed a comparison between a solution in ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) and others in timber and extruded aluminium. The timber and aluminium solutions were finally not selected for a number of reasons. This study has shown UHPFRC to be an interesting material for building roofs under demanding conditions. In addition, the UHPFRC allows producing durable elements despite thin dimensions and high slenderness. Nevertheless, it is still to be checked if the amount of fibres can be reduced accounting for the fact that for members with quite significant dimensions, the placing of ordinary or prestressed reinforcement is unavoidable to ensure sufficient strength to withstand the internal forces.

Auteur/Author

Aurelio Muttoni
Prof. Dr ès techn. ing. dipl. EPFZ
Muttoni et Fernández,
Ingénieurs Conseils SA
CH-1024 Ecublens
aurelio,muttoni@mfic.ch