

# 03/17 steeldoc

Ouvrages d'exception



## Un cocon pour la musique

### Maître de l'ouvrage

Ville de Hambourg

### Architectes

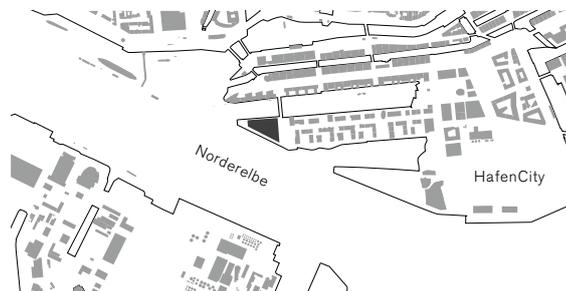
Herzog & de Meuron, Bâle

### Ingénieurs

Schnetzer Puskas International, Bâle

### Achèvement

2017



Plan de situation, échelle 1:50 000

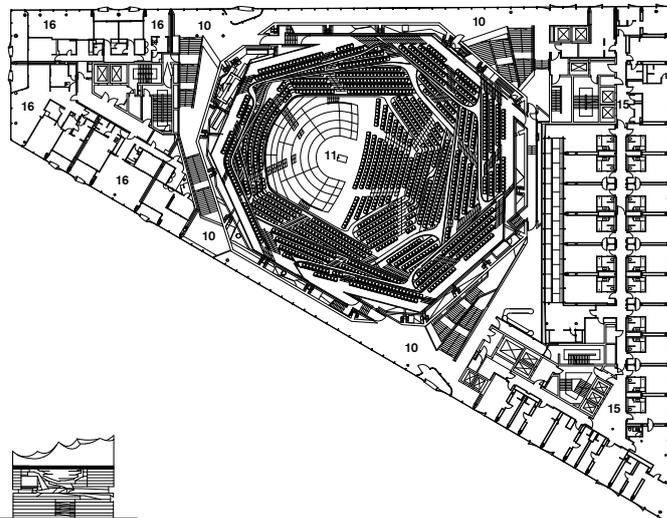
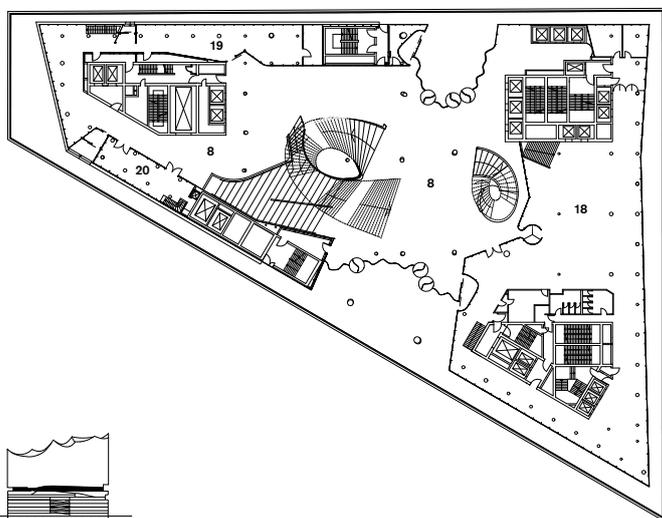
**L'Elbphilharmonie - la Philharmonie de l'Elbe - à Hambourg, officiellement inaugurée en janvier 2017, est l'œuvre spectaculaire des architectes Herzog & de Meuron. Le parti de surélever un ancien entrepôt portuaire en a fait par ailleurs un ouvrage technique hors pair. La grande salle de concert, cocon cuirassé au cœur du bâtiment, est parfaitement isolée acoustiquement : la salle, de forme ovoïde, est constituée de deux boîtes indépendantes, l'une en béton, l'autre en acier.**

L'idée était séduisante : couronner un imposant ancien entrepôt en briques d'un volume en verre, y intégrer une salle de concerts et attirer ainsi les visiteurs venus de loin jusque vers les lieux phares du nouveau quartier de la HafenCity à Hambourg. Et l'idée fonctionne ! Avec l'Elbphilharmonie, Hambourg s'est dotée non seulement des salles de concerts les plus spectaculaires qui soient, mais aussi d'un vaisseau amiral, devenu l'emblème de la ville.

### Vagues et transparence

Les 19 étages rapportés au-dessus de l'entrepôt A du port de Hambourg - un bâtiment de 1963 de sept niveaux conçu par l'architecte Werner Kallmorgen - forment comme une couronne de verre, détachée de son socle en briques. En bas, une construction mas-

sive en briques, au-dessus, une construction à ossature béton intégrant des éléments de structures en acier. La nature des matériaux n'est pas la seule chose qui distingue la partie neuve de l'ancienne : un « vide », occupant toute la hauteur d'un étage, marque également l'interface et crée une coupure entre l'existant et la surélévation ; celle-ci semble ainsi flotter au-dessus de son socle. Les deux volumes n'en sont pas moins étroitement liés : ils se superposent parfaitement, reprenant le même plan, en forme de trapèze. Derrière la façade en briques, aussi tout est également neuf. Quant à la nouvelle structure porteuse, elle procède de ce qui reste de l'existante, c'est-à-dire les fondations - complétées par d'autres pieux - et la façade porteuse.





### Un volume à la hauteur du programme

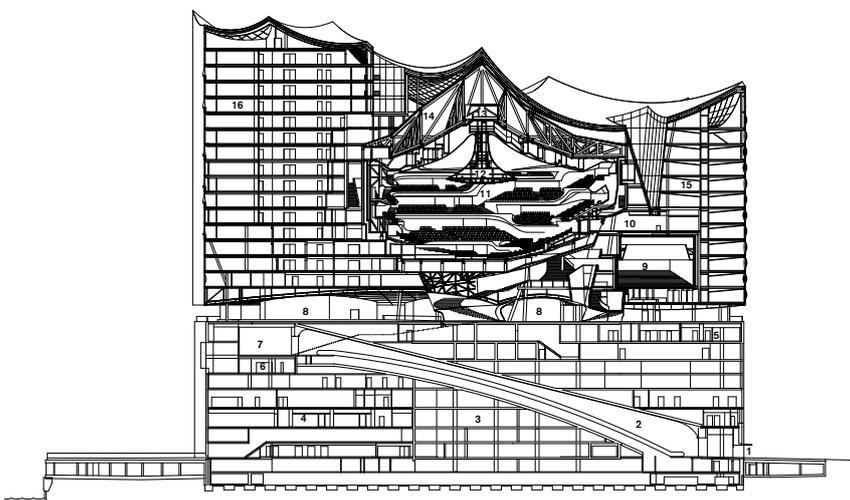
L'Elbphilharmonie comporte une grande et une petite salles de concert, un auditorium, un hôtel, des logements – qui vont jusqu'à se glisser au-dessus de la grande salle –, des parkings, les coulisses, une salle de conférence, des restaurants et un espace de remise en forme. Ces usages extrêmement diversifiés supposaient une organisation spatiale et une structure porteuse soigneusement pensées, l'une conditionnant l'autre, mais avec une grande marge de manœuvre.

Ainsi, depuis les fondations, une ossature en béton armé, avec trois noyaux, s'élève à l'intérieur du socle et se poursuit jusque dans le nouveau couronnement. Seuls quelques éléments porteurs de cette ossature, plus fortement sollicités, sont en acier.

### La grande salle : une enceinte en acier

La présence de la grande salle de concert, de plan ovale, au cœur de cette construction, fait exploser la trame de l'ossature, avec des portées de 50, voire 55 m.

L'Elbphilharmonie superpose un « cristal » de 19 niveaux, couronnement conçu par Herzog & de Meuron, sur un entrepôt de 1963 de sept étages. A l'interface, à la hauteur de la coupure ménagée entre le socle et le couronnement, se situe la Plaza, accessible au public.



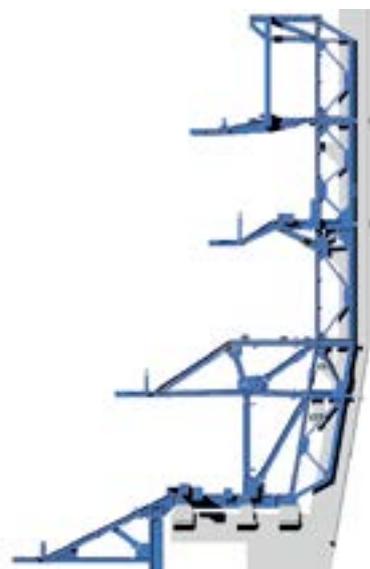
L'Elbphilharmonie a un plan trapézoïdal, proche du triangle. L'entrée des visiteurs se situe côté est. De gauche à droite : plan 9<sup>e</sup> étage, plan 17<sup>e</sup> étage, et coupe ; échelle 1:250

- 1 Entrée principale
- 2 Escaliers mécaniques
- 3 Parking
- 4 Studios
- 5 Espace conférence
- 6 Restaurant

- 7 Fenêtre panoramique
- 8 Plaza
- 9 Petite salle de concert
- 10 Foyer
- 11 Grande salle de concert
- 12 Réflecteur
- 13 Amenée d'air neuf
- 14 Espace technique
- 15 Hôtel
- 16 Logements
- 17 Orgue
- 18 Hall d'accueil de l'hôtel
- 19 Boutique
- 20 Café



Coque extérieure de la grande salle de concert, creuset géant en béton, pendant les travaux, en 2009. La structure métallique de la boîte intérieure et des balcons, étagés comme les terrasses d'un vignoble, est en cours d'installation.



Les poutres à treillis verticales, et les consoles des balcons s'appuient sur les nervures en béton de la coque extérieure par l'intermédiaire de sept (au total il y en a 342) boîtes à ressorts, pour assurer le découplage acoustique à chaque point d'appui.



En hauteur, la salle s'étend du 11<sup>e</sup> au 22<sup>e</sup> étage. Elle est entourée de l'hôtel à l'est et des logements à l'ouest, et occupe, selon le niveau, un tiers environ de la surface de ce dernier. De ce fait, les ingénieurs du bureau d'études Schnetzer Puskas, de Bâle, ont conçu cette grande salle comme un ouvrage statiquement indépendant, qui ne s'appuie que ponctuellement sur la trame porteuse principale.

Huit grandes pièces en acier reprennent les efforts et les transfèrent à des poteaux inclinés, qui les transmettent à leur tour à l'ossature en béton armé. Les points d'appui de la salle, qui est en soi stable, sont relativement peu nombreux. Ceci a permis de garder les circulations et certaines parties de la Plaza sous la salle presque entièrement dégagées, sans poteaux intermédiaires. Ceci a également permis de laisser le foyer s'enrouler et remonter en paliers le long du corps central de la grande salle. Seul un petit nombre de poteaux inclinés transpercent plafonds et escaliers (voir figure au bas de la page 8).

#### **Une boîte dans la boîte**

La statique de la grande salle de concert, de forme ovoïde, n'est pas seule à expliquer sa complexité. L'acoustique y a également sa part : pour isoler la salle des bruits de la ville et du port, l'acousticien japonais Yasuhisa Toyota a imposé le principe de la boîte dans la boîte, avec une coquille intérieure indépendante de la coque extérieure.

La boîte extérieure, un « creuset » en béton armé surmonté d'un plafond mixte acier-béton, est solidaire de la structure porteuse du bâtiment. L'anneau des murs, d'une épaisseur de 20 à 40 cm, ainsi que le plancher sont en béton armé et comportent des nervures en saillie. Au niveau du plancher, les nervures perpendiculaires aux façades longitudinales – et aux murs correspondants – se greffent sur une nervure principale située dans l'axe du trapèze, à la manière des membrures d'un navire s'assemblant sur une quille. Les nervures des murs est et ouest, elles, convergent en éventail vers chacune des extrémités de cette « quille ». Lorsque, exceptionnellement, elles ne sont pas directement supportées par des poteaux, elles sont suspendues à l'anneau de béton, de 6 à 10 m de hauteur, dans lequel sont noyés des éléments en acier. Dans cette boîte extérieure se loge une boîte intérieure. La structure en acier de cette dernière est constituée de poutres à treillis qui, par l'intermédiaire de 342 boîtes à ressorts, reposent sur les nervures en béton de la coque extérieure ou sont suspendues aux poutres du plafond (voir figures de la page précédente et ci-dessous). De cette manière, ni les bruits à basse fréquence des bateaux, transmis par l'eau, ni le bruit de la Plaza ouverte au public ne pénètrent dans la salle de concert; pas plus, d'ailleurs, que la musique jouée dans la salle ne parvient à l'extérieur et ne vient perturber, par exemple, les clients de l'hôtel.

#### Chapeau à rebord

Au-dessus des derniers niveaux de balcons, la coque extérieure se referme. Le plafond est constitué d'une structure spatiale en acier et d'un voile en béton. Cet ensemble repose sur l'anneau en béton du « creuset » et se prolonge en porte-à-faux jusqu'aux façades, permettant aux plafonds des circulations du foyer de s'y accrocher. La structure spatiale est constituée en fait de 21 à poutres treillis planes disposées de la même manière que les 21 nervures en béton du « creuset », avec une poutre longitudinale au centre du plafond (voir figure au milieu de la page 8). Vu en coupe transversale, le plafond tout d'abord plat, remonte ensuite légèrement, puis plus fortement, à la manière d'un chapeau pointu à rebord.

En dépit du feu vert du bureau de contrôle Dr.-Ing. Rainer Grzeschkowitz, la conception de la structure, particulièrement délicate, a fait l'objet de discussions avec Hochtief Solutions, l'entreprise générale, et des professeurs allemands réputés. Certains estimaient que le comportement n'était pas parfaitement conforme aux normes DIN. Il peut en fait être comparé à celui d'une roue à rayons : les poutres à treillis (rayons), pratiquement radiales, sont maintenues par une « jante », en l'occurrence la poutre à treillis verticale périphérique et l'anneau en béton tendu

constituant le rebord du « chapeau ». La partie pointue de ce dernier, avec ses facettes, sert uniquement à stabiliser les membrures supérieures comprimées des poutres à treillis. Le rebord est fortement sollicité à la fois à la traction, en raison des efforts radiaux, et à la flexion, en raison du plan ovale de la salle, d'où la forme de tronc de cône aplati que lui ont donnée les ingénieurs.

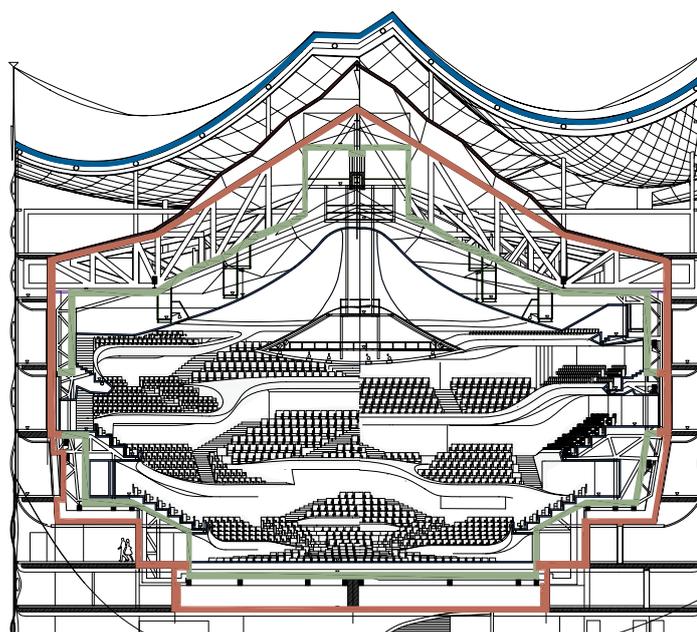
#### Des vagues en toiture

Le plafond de la salle s'élève jusqu'au-dessous de la toiture du bâtiment, qui vient d'ailleurs s'appuyer sur celui-ci. Si les conditions de la statique font de la toiture un ouvrage moins complexe, il n'en est pas de même, et de loin, de sa géométrie : huit portions de sphères s'assemblent en forme de vagues dont les crêtes, à l'exception de celle de la grande salle de concert, au beau milieu de la toiture, se trouvent toutes sur le pourtour du bâtiment. La charpente métallique de la toiture est constituée d'un millier de poutrelles et de poutres-caissons incurvées, toutes différentes, sur lesquelles sont fixées des tôles profilées. Le contreventement est réalisé par trois noyaux dans lesquels sont regroupées les circulations verticales. Les efforts verticaux sont repris par des poteaux intérieurs disposés selon un plan irrégulier, et de poteaux périphériques, dans le plan des façades, espacés régulièrement (de 4,50 m à 5,00 m).

#### La coupure – façade et poteaux en retrait

L'ensemble de la structure porteuse, sans laquelle le bâtiment ne serait pas ce qu'il est, n'est aujourd'hui plus visible, masquée par les façades et les diffé-

La grande salle de concert est située directement sous la toiture (bleu). Elle est conçue selon le principe de la « boîte dans la boîte » : la boîte extérieure (rouge) est constituée d'un « creuset » en béton nervuré surmonté d'un plafond mixte acier-béton ; la boîte intérieure (vert) est constituée d'une structure en treillis complétée par un plafond en béton suspendu au plafond de la salle au moyen de boîtes à ressorts.

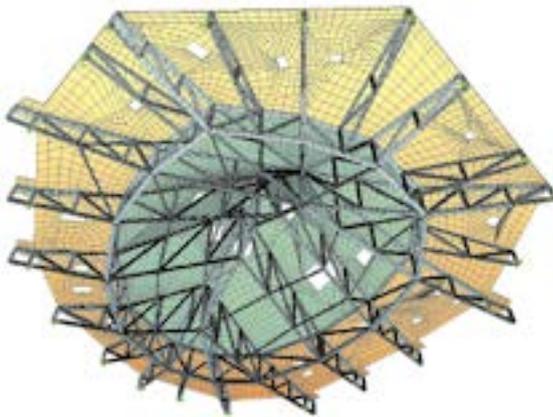




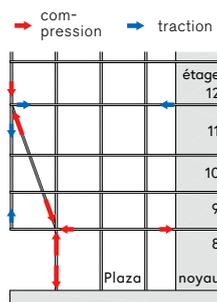
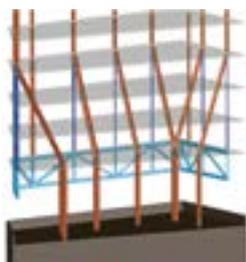
Haut : le vitrage ondulant entre Plaza et terrasse délimite l'espace intérieur avec une saisissante élégance, conjugaison de l'esthétique et de la statique : les courbures donnent au vitrage la stabilité nécessaire pour résister au vent (valeur de calcul type des pressions dues au vent :

façade sud :  $\pm 1,22 \text{ kN/m}^2$   
 façade est :  $\pm 1,54 \text{ kN/m}^2$   
 façade nord :  $\pm 1,75 \text{ kN/m}^2$ ).

Centre : le plafond de la salle vu du dessous se présente comme un chapeau à rebord en forme de tronc de cône. La structure spatiale est constituée de 21 fermes qui se prolongent en porte-à-faux et d'une poutre à treillis annulaire. La construction mixte acier-béton suit la forme de la toiture du bâtiment, qui vient s'appuyer sur la pointe du plafond.



Bas : au niveau de la Plaza, la structure porteuse est en retrait. Géométrie et descentes de charges dans les poteaux des façades longitudinales et les poteaux inclinés (à gauche); géométrie de la poutre treillis de la façade ouest à laquelle sont suspendus les étages, avec ses diagonales prétendues (à droite).



rentes parois. Là justement où la façade s'entrouvre, présentant comme une fente entre le socle ancien et le couronnement nouveau, là où la structure aurait donc pu se montrer, celle-ci, au contraire, se met en retrait. La première file de poteaux est supprimée et, trois niveaux au-dessus de la Plaza, les descentes de charges de la façade sont reportées sur la deuxième file par des poteaux inclinés, tandis que les deux niveaux situés au-dessous sont suspendus, les poteaux faisant office de tirants (cf. figure page 8). La géométrie aux angles de la façade ouest, la plus étroite, y rendait cette disposition impraticable. La solution a consisté alors à utiliser une poutre treillis en sous-face de plancher. Celle-ci se retourne sur les deux côtés et reprend les efforts des poteaux d'angle en les répartissant dans les tirants.

Pour ce bâtiment de 110 m de haut, les appuis indirects se traduisent par des déformations accrues, variables en fonction des charges supportées. Les éléments de façade, qui devaient être fixés le plus tôt possible de manière à pouvoir commencer le second-œuvre dans les niveaux inférieurs tout en poursuivant les travaux de gros-œuvre au-dessus, étaient soumis à des efforts croissants au fur et mesure que le bâtiment s'élevait. Or la façade en verre spéciale était conçue pour supporter les sollicitations à l'état final, avec de faibles déformations des planchers, et le verre aurait éclaté s'il avait subi les déformations de la phase



Structure intérieure de la grande salle de concert – 21 poutres treillis se dirigent vers le centre où elles viennent se greffer sur une nervure médiane.

de gros-œuvre. Les ingénieurs ont dû par conséquent maîtriser ces déformations complexes : à mesure de la progression des travaux, il a fallu ajuster la longueur de certaines diagonales du treillis au moyen de vérins, avant de les souder à leur longueur définitive. De cette manière, la poutre à treillis était progressivement mise en tension et les déformations graduellement neutralisées.

#### Césure dans le chef d'œuvre

Cette manière ingénieuse de reprendre les efforts montre le niveau de performance exceptionnel auquel les ingénieurs sont parvenus ici. Que le couronnement du socle relève aujourd'hui de l'évidence, qu'il domine la ville et rayonne comme il le fait, relève de la prouesse technique et créative. Bien que la structure porteuse ne soit aujourd'hui quasiment plus lisible, on l'imagine toutefois encore, dans la grande salle de concert, ce cocon, le saint des saints.

Tandis que le vaste espace se remplit des notes de l'orchestre sur la scène centrale, d'aucuns imagineront sans doute quels efforts doivent être ici à l'œuvre, quel rôle porteur la structure en acier montée directement sous les sièges doit jouer. En dépit des dimensions extraordinaires et des charges respectables en jeu, la structure métallique est une construction légère, une condition incontournable pour pouvoir reporter les charges supplémentaires sur l'existant.

**Lieu** Hambourg

**Maître de l'ouvrage** Freie und Hansestadt Hamburg

**Maître d'œuvre** ARGE Generalplaner Elbphilharmonie (Herzog & de Meuron, Bâle ; Höhler + Partner Architekten und Ingenieure, Aix-la-Chapelle)

**Architectes** ARGE Planung Elbphilharmonie (Herzog & de Meuron, Bâle ; H + P Planungsgesellschaft, Aix-la-Chapelle ; Hochtief Solutions, Essen)

**Etude de la structure porteuse** Schnetzer Puskas International, Bâle

**Dossier de permis de construire structure** Schnetzer Puskas International, Bâle ; sous-traitant : Rohwer Ingenieure, Handewitt

**Dossier d'exécution structure** Hochtief Solutions, Essen ; sous-traitant : Spannverbund, Berlin (proposition pour la toiture du bâtiment, études d'exécution de la structure métallique du plafond de la grande salle, de la structure intérieure et du réflecteur)

**Bureau de contrôle** WK Consult, Dr.-Ing. Rainer Grzeschkowitz, Hambourg

**Etude de la façade porteuse en brique** Jäger Ingenieure, Radebeul

**Etude des installations électriques** ARGE Generalplaner Elbphilharmonie (Winter Ingenieure, Hambourg ; General Contractor Adamanta – Hochtief Solutions) ; Hochtief Solutions, Essen

**Etudes CVCS** Knott & Partner Ingenieure, Berlin ; Müller + Partner, Braunschweig ; C.A.T.S. Computer and Technology Service, Darmstadt ; ARGE Generalplaner Elbphilharmonie (Winter Ingenieure, Hambourg ; General Contractor Adamanta – Hochtief Solutions) ; Hochtief Solutions, Essen

**Signalétique** Herzog & de Meuron, Bâle, avec Integral Ruedi Baur, Zurich ; Hochtief Solutions, Essen

**Physique du bâtiment** MF Dr. Flohrer Beratende Ingenieure, Berlin ; Taubert und Ruhe, Halstenbek ; Jäger Ingenieure, Radebeul ; TU Dresden, Dresde ; GWT, Dresde ; ARGE Generalplaner Elbphilharmonie, Hambourg ; General Contractor Adamanta – Hochtief Consult, Essen ; Hochtief Solutions, Essen

**Acoustique** Nagata Acoustics, Yasuhisa Toyota, Los Angeles et Tokyo

**Etude des panneaux acoustiques** One to One, Benjamin Koren, Francfort et New York

**Réalisation des panneaux acoustiques** Peuckert, Mehring

**Entreprise de construction métallique** Spannverbund Gesellschaft für Verbundträger mbH, Berlin ; Haslinger Stahlbau GmbH, Feldkirchen (AT)

**Principe de construction** Bâtiment : acier et béton ; boîte intérieure de la grande salle de concert : poutres à treillis

**Nuances d'acier** S235J0 / S355J2

**Surface brute** 125 512 m<sup>2</sup>

**Dimensions** Longueur : 125 m, largeur : 85 m, hauteur : 110 m

**Volume** 475 873 m<sup>3</sup>

**Usages** Salles de concert, espace public, parking, restaurants, hôtel, logements

**Durée des travaux** 2007–2017

**Achèvement** Janvier 2017

# Impressum

steeldoc 03/17, septembre 2017

Ouvrages d'exception

Editeur :

SZS Centre suisse de la construction métallique, Zurich  
Patric Fischli-Boson

Rédaction et textes :

espazium – Les éditions pour la culture du bâti, Zurich  
Judith Solt

Franziska Quandt

Clementine Hegner-van Rooden, p. 4–9

Jacques Perret, p. 10–15

Clementine Hegner-van Rooden, p. 16–21

Clementine Hegner-van Rooden et

Franziska Quandt, p. 22–26

Christof Rostert, secrétaire de rédaction

Traduction allemand–français :

Chantal Pradines, Michel Crisinel

Traduction français–allemand :

Anna Friedrich

Textes basés sur les informations des concepteurs.

Les informations et les plans ont été fournis par  
les bureaux d'études.

Mise en page :

espazium – Les éditions pour la culture du bâti, Zurich  
Claudia Hodel, Anna-Lena Walther

Photos :

Titre : Michael Zimmermann

Editorial : Oliver Heissner

p. 5 Iwan Baan

p. 6, 8 Oliver Heissner

p. 11–15 Ingeni, Genève

p. 17, 20 Christoffer Reglid

p. 18 Dr. Lüchinger & Meyer

p. 23, 24 Jo Pesendorfer

p. 25 Dietmar Feichtinger Architectes,

Thomas Jouanneau

Graphique p. 26 Projet du Mont Saint-Michel

Conception graphique :

Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zurich

Impression :

Stämpfli SA, Berne

ISSN 0255-3104

Abonnement annuel CHF 60.– / étranger CHF 90.–

Numéros isolés CHF 18.– / numéros doubles CHF 30.–

Sous réserve de changement de prix.

A commander sur [www.szs.ch/steeldoc/](http://www.szs.ch/steeldoc/)

Construire en acier/steeldoc® est la documentation d'architecture du Centre suisse de la construction métallique et paraît quatre fois par an en allemand et en français. Les membres du SZS reçoivent l'abonnement ainsi que les renseignements techniques du SZS gratuitement.

Toute publication des ouvrages implique l'accord des architectes, le droit d'auteur des photos est réservé aux photographes. La reproduction et la traduction, même partielles, de cette édition ne sont possibles qu'avec l'autorisation écrite de l'éditeur et l'indication de la source.

**Abonnement annuel à steeldoc pour CHF 60.–  
(gratuit pour les étudiants) sur [www.szs.ch/steeldoc/](http://www.szs.ch/steeldoc/)**