

# 02/05 steeldoc

Topographie construite  
Centre Paul Klee



## Un hangar pour l'Art

### **Maître d'ouvrage**

Fondation Maurice E. et Martha Müller, Berne

### **Architectes**

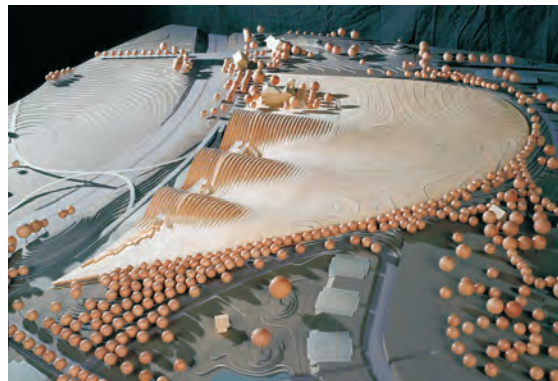
RPBW Renzo Piano Building Workshop, Paris  
ARB Arbeitsgruppe, Berne

### **Ingénieurs**

Ove Arup & Partners International Ltd, Londres  
B+S Ingenieure AG, Berne

### **Année de construction**

2005



**Le terrain ondulé semble flotter comme un tapis de pelouse, mais sous la couche de gazon s'ouvre un espace destiné à l'art et à la réflexion. 1200 tonnes d'acier et plus de 40 kilomètres de soudure manuelle constituent la structure porteuse d'un projet généreux de l'architecte Renzo Piano. Le Centre Paul Klee récemment terminé est un prolongement du paysage et un hommage à l'artiste bernois.**

Après trois années de travaux, le Centre Paul Klee a ouvert ses portes le 20 juin 2005. Ce nouvel édifice, érigé à la périphérie de Berne, offre à l'importante collection de la fondation Paul Klee – exposée jusqu'à présent au Musée des Beaux-arts à Berne – une surface d'exposition qui lui soit propre. Un espace qui se veut être plus qu'un musée. L'artiste (1879–1940), né à Berne, n'était pas seulement peintre mais aussi musicien, pédagogue et poète. Consacré entièrement aux diverses activités créatrices de Klee, le Centre réunit plusieurs fonctions et offre également un cadre à la recherche et à des séminaires. Des trois volumes du bâtiment, seul celui du milieu est destiné aux expositions. Dans la « colline » du nord, on trouve une salle polyvalente, un auditorium de 300 places et un musée pour les enfants. La « colline » du sud est réservée à la recherche et à l'administration.

Le terme officiel « colline » renvoie à l'essence de l'ouvrage car il ne s'agit pas, ici, d'un bâtiment au sens habituel du terme, mais d'une parcelle de topographie construite ou, selon les termes de l'architecte : d'articulations du terrain. Impressionné par la douce ondulation du terrain naturel, avec les arêtes vives du massif des Alpes à l'arrière-plan, Piano voulait réaliser un ouvrage qui se fonde dans ce paysage. Il en est résulté une succession de trois volumes de taille différente, qui offrent un contour précis du côté ouest mais s'effacent graduellement des autres côtés. Les premières études révélaient la conception selon laquelle le paysage doit être vu comme un tapis dont les bords ne sont pas plats mais accusent des déformations laissant

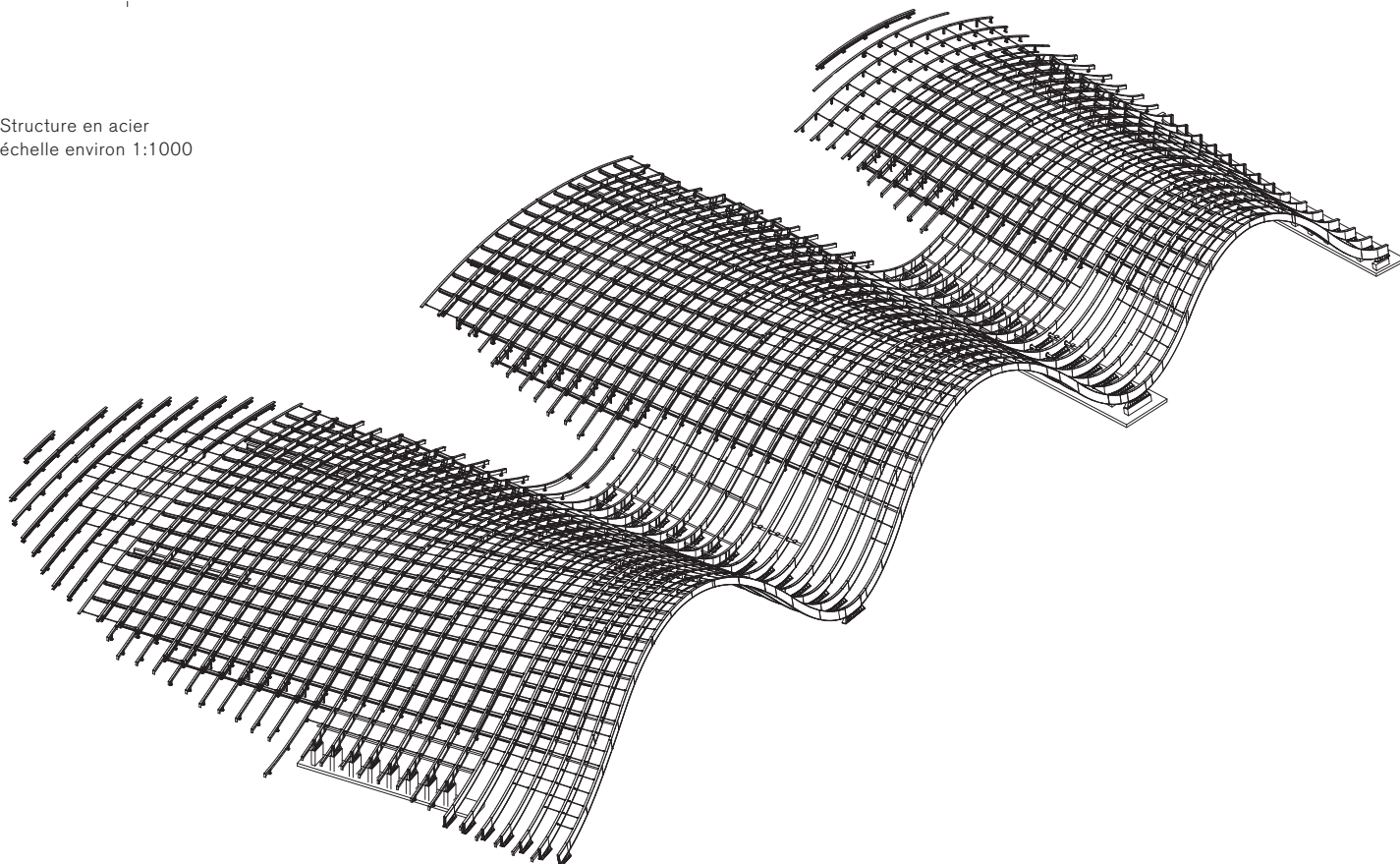
deviner que quelque chose se cache dessous. Toutefois, l'ouvrage réalisé est différent. La continuité entre le terrain naturel et la topographie construite n'est pas obtenue par une surface unie – le toit est recouvert de tôle – mais résulte d'une interpénétration. En premier lieu, on peut mentionner les nervures apparentes de la structure porteuse lesquelles, indépendamment de toute nécessité structurale, pénètrent de plusieurs mètres dans le terrain en talus. Des treillis et des bacs en tôle remplis de terre, appendus entre les nervures, contribuent à dissimuler la transition entre les différents matériaux. A dessein, les contours sont flous, selon les meilleures règles de l'art du camouflage. Après un instant d'irritation, il paraît logique que, à l'approche de la façade, la couverture du toit s'éclaircisse et ne suive plus les arcs jusqu'au sol.

### **Une forme descriptible par des équations**

Pour cerner la forme des collines de taille différente, dans une première approximation, l'architecte s'est servi d'une méthode déjà employée par Jørn Utzon pour l'opéra de Sydney (1957–1972). Toutes les coques sont découpées d'un même volume : d'une sphère chez Utzon, d'un cône tronqué chez Piano. Bien que de taille différente et découpés sous un angle différent, les enveloppes du cône ont la même courbure. Légèrement bridés dans leur expressivité, l'élan des traits du crayon ou l'inflexion du morceau de bois deviennent ainsi descriptibles par des formules mathématiques. Chaque point de l'enveloppe peut ainsi être défini avec précision dans l'espace à trois dimensions. Ceci n'est, après tout, qu'une aide à la conception, sans changer le fait que chaque arc a une forme différente – indépendamment du fait que par la suite on s'écartera même de la forme idéale du cône. En effet, les arcs ne sont pas disposés perpendiculairement à la voûte mais – à part les premiers six arcs – verticalement. De surcroît, dans le plan, les arcs suivent la

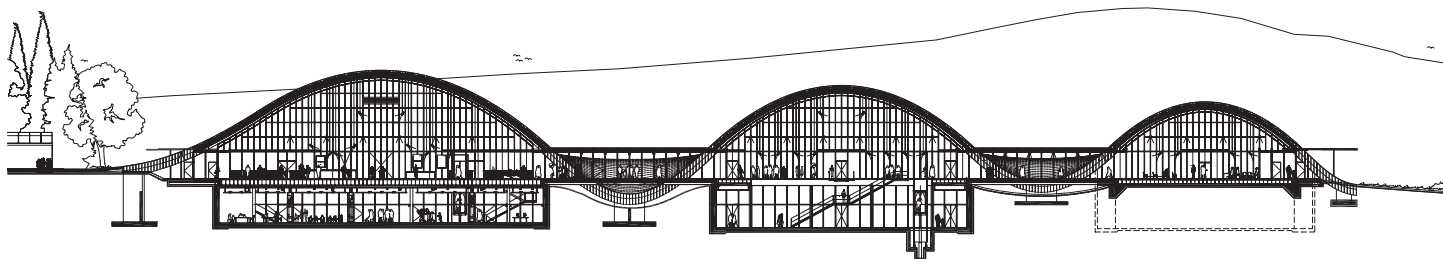


Structure en acier  
échelle environ 1:1000



ligne de l'autoroute qui borde le terrain du côté ouest. Le rayon de courbure de la rue du Musée qui relie les trois collines est de 500 m.

Naturellement, les ingénieurs d'Ove Arup ont d'abord pensé à une structure porteuse en voile; les images des coques d'un Heinz Isler suggéraient une membrane en béton. Toutefois, la voûte aplatie à l'endroit le plus bas des collines s'y opposait: il serait difficile de lui faire porter la charge de la toiture avec ses bacs remplis de terre. Finalement, le choix s'est porté sur une série d'arcs parallèles – la décision concernant le matériau n'étant intervenue que plus tard. Une solution en béton avec des nervures a été examinée, tout comme celle d'une structure en bois lamellé-collé. Finalement, l'acier a été préféré car on était en présence de sollicitations très diverses auxquelles il était possible de répondre par la seule variation des épaisseurs de tôle sans autres modifications des sections.



Coupe en long et plan de rez-de-chaussée  
échelle 1:1000



A cela s'ajoutait le fait que, les tôles étant découpées par des machines à contrôle numérique, la non-répétition des pièces, qui allaient de toute façon être assemblées par soudage manuel, ne changeait rien alors qu'une réalisation en béton aurait nécessité des coffrages dont chacun n'aurait pu être utilisés qu'une seule fois.

### Arcs aplatis et arcs élancés

La nature variée des sollicitations tient au fait que la courbure de la toiture diminue avec la profondeur de l'édifice. De même, les conditions d'appui varient également car l'ondulation des arcs n'est continue qu'à l'avant de l'immeuble. Plus en arrière, les arcs ne dépassent guère les volumes utiles de sorte que ce sont les murs extérieurs renforcés par des nervures qui remplissent la fonction des appuis disposés ailleurs dans le creux des vagues. Les nervures en béton armé ne servent pas à résister à la poussée des terres mais

permettent l'encastrement des arcs et la reprise, en collaboration avec les dalles, des énormes forces horizontales. En effet, le terrain environnant n'aurait pas pu résister aux forces horizontales. Le rapport varié entre la flèche des arcs et leur portée a généré des situations très différentes : les arcs aplatis des travées du nord et du milieu ont nécessité deux tirants alors que les arcs de la façade, hauts jusqu'à 18 mètres avec une portée maximale de 63 mètres sont à même de porter la charge de la façade vitrée qui y est suspendue. Toutefois, les charges et les couples importants au pied des arcs – où la courbure de leur axe s'inverse avant même de rencontrer l'appui – ont pour conséquence la transition d'une section en I vers une section fermée et la variation de la hauteur de l'âme passant de 80 cm aux sommets à 120 cm sur les appuis. Le changement de section serait encore plus frappant, si celle-ci n'avait pas de toute façon une hauteur plus grande que statiquement nécessaire. Le surdimension-



Des raidisseurs assurent la stabilité de la structure dans le sens transversal. Les barres inférieures (HEB 140) sont appelées à reprendre, en premier lieu, les forces horizontales générées par les arcs inclinés dans la partie avant de l'ouvrage. Les barres supérieures (tubes de Ø 48 mm) restent apparentes même après la pose de l'isolation thermique et portent en partie des treillis.



Détail de l'encastrement avant et après le bétonnage. On reconnaît clairement l'articulation des tôles entre ailes et raidisseurs.

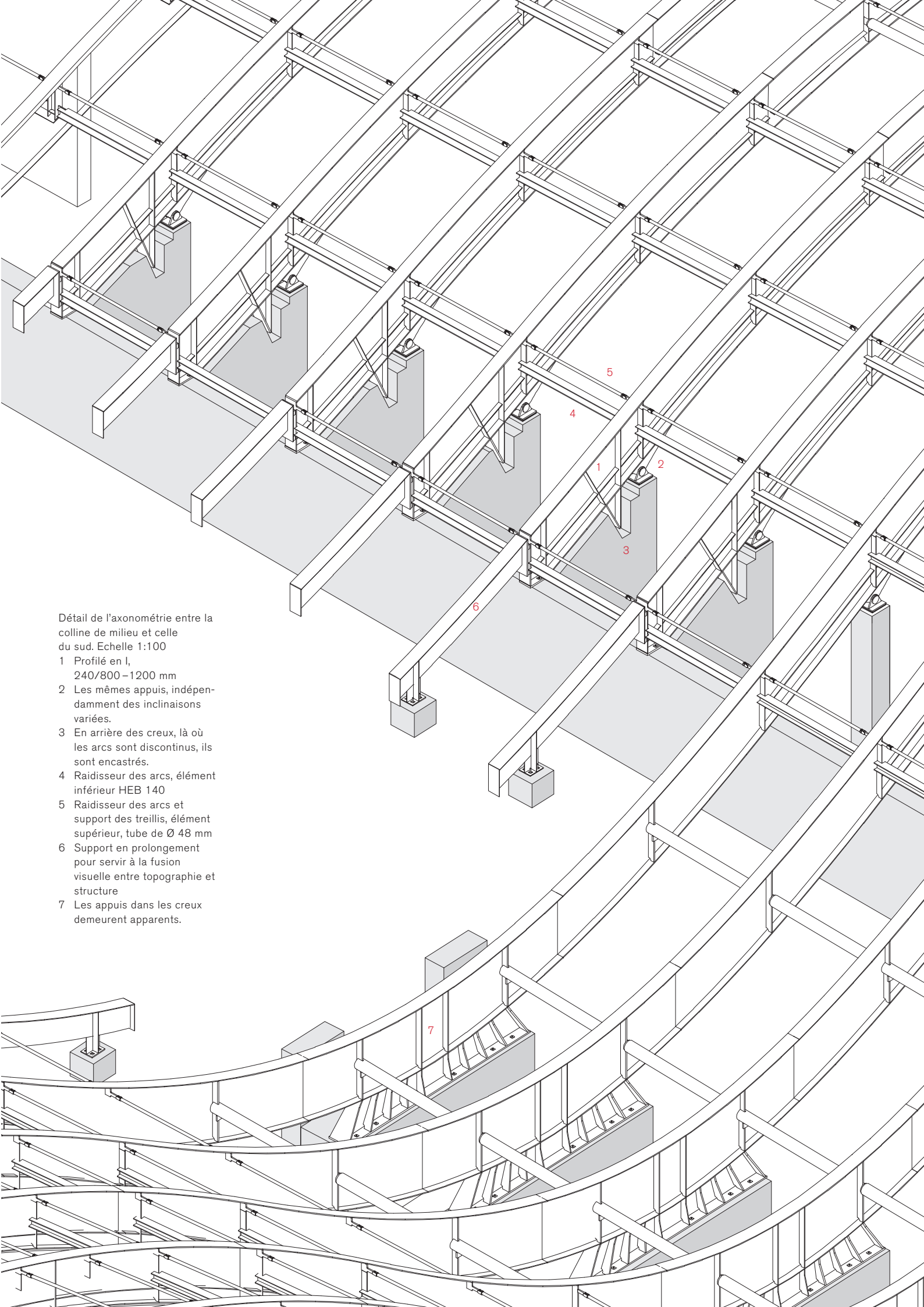
nement est dû au désir de pouvoir montrer la structure porteuse à l'intérieur comme à l'extérieur. Ainsi, la tôle nervurée trapézoïdale supportant une couche d'isolation thermique de 28 cm d'épaisseur et un revêtement en acier chromé, s'appuie non sur l'aile inférieure des sections mais sur des chevrons soudés plus haut.

La distance de 2,50 mètres entre les arcs peut sembler plutôt faible pour une structure primaire mais l'ouvrage terminé montre que le renoncement à une optimisation statique était justifié. La forme des collines s'en est trouvée reproduite avec plus de précision, de même que les particularités, telles les fenêtres du toit entre les arcs, sont intégrées de façon élégante.

#### Formes de présence

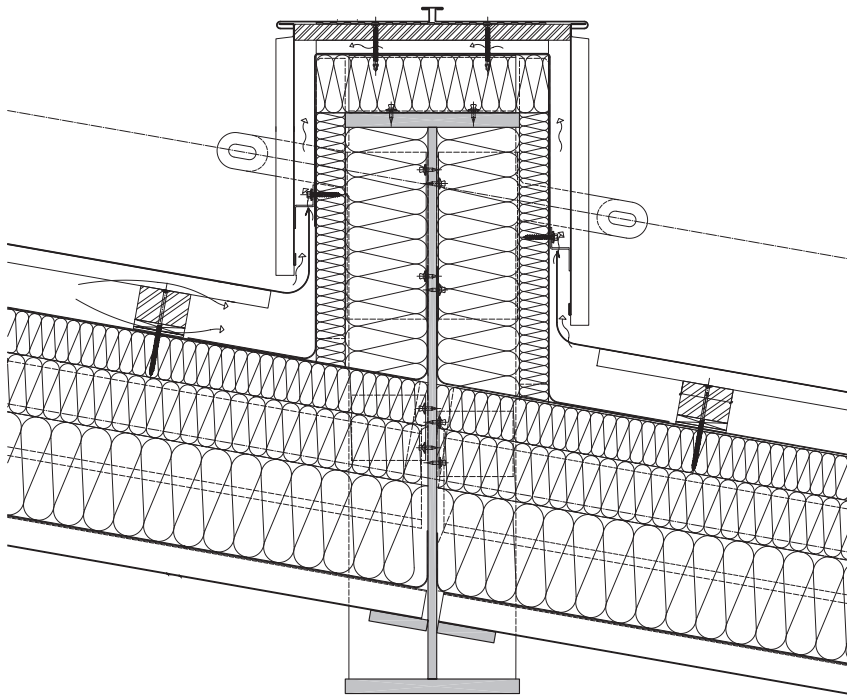
Pour l'œuvre d'un « poète du silence », dixit Renzo Piano, il fallait concevoir un musée de type feutré. On peut néanmoins se demander si la forme et les dimensions retenues peuvent vraiment être associées aux notions de silence ou de calme. Mais une présence plus prononcée est favorable à un contexte hétérogène marqué par l'autoroute toute proche, des habitations, fruits de la spéculation immobilière, et des vestiges de l'agriculture. On peut en penser ce que l'on veut, le Centre Paul Klee dote la périphérie de Berne d'un centre de gravité – et c'est bien ainsi. (ad)



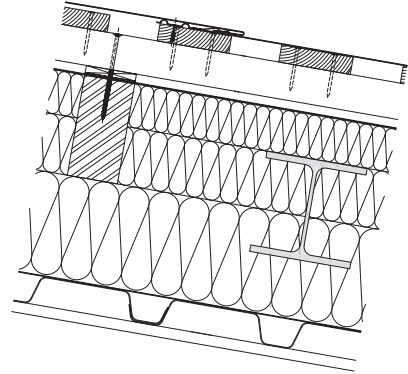


Détail de l'axonomie entre la colline de milieu et celle du sud. Echelle 1:100

- 1 Profilé en I, 240/800-1200 mm
- 2 Les mêmes appuis, indépendamment des inclinaisons variées.
- 3 En arrière des creux, là où les arcs sont discontinus, ils sont encastrés.
- 4 Raidisseur des arcs, élément inférieur HEB 140
- 5 Raidisseur des arcs et support des treillis, élément supérieur, tube de  $\varnothing$  48 mm
- 6 Support en prolongement pour servir à la fusion visuelle entre topographie et structure
- 7 Les appuis dans les creux demeurent apparents.



Structure de la toiture (depuis en haut):  
Tôle inoxydable 0,4 mm  
Coffrage 24/100 mm, intervalles de 70 mm  
Lattis 50/70 mm  
Sous-toiture en plastique soudé  
Isolation thermique à couches multiples 280 mm  
Pare-vapeur  
Tôle trapézoïdale SP 40, 1,25 mm



Coupe à travers un arc  
échelle 1:10

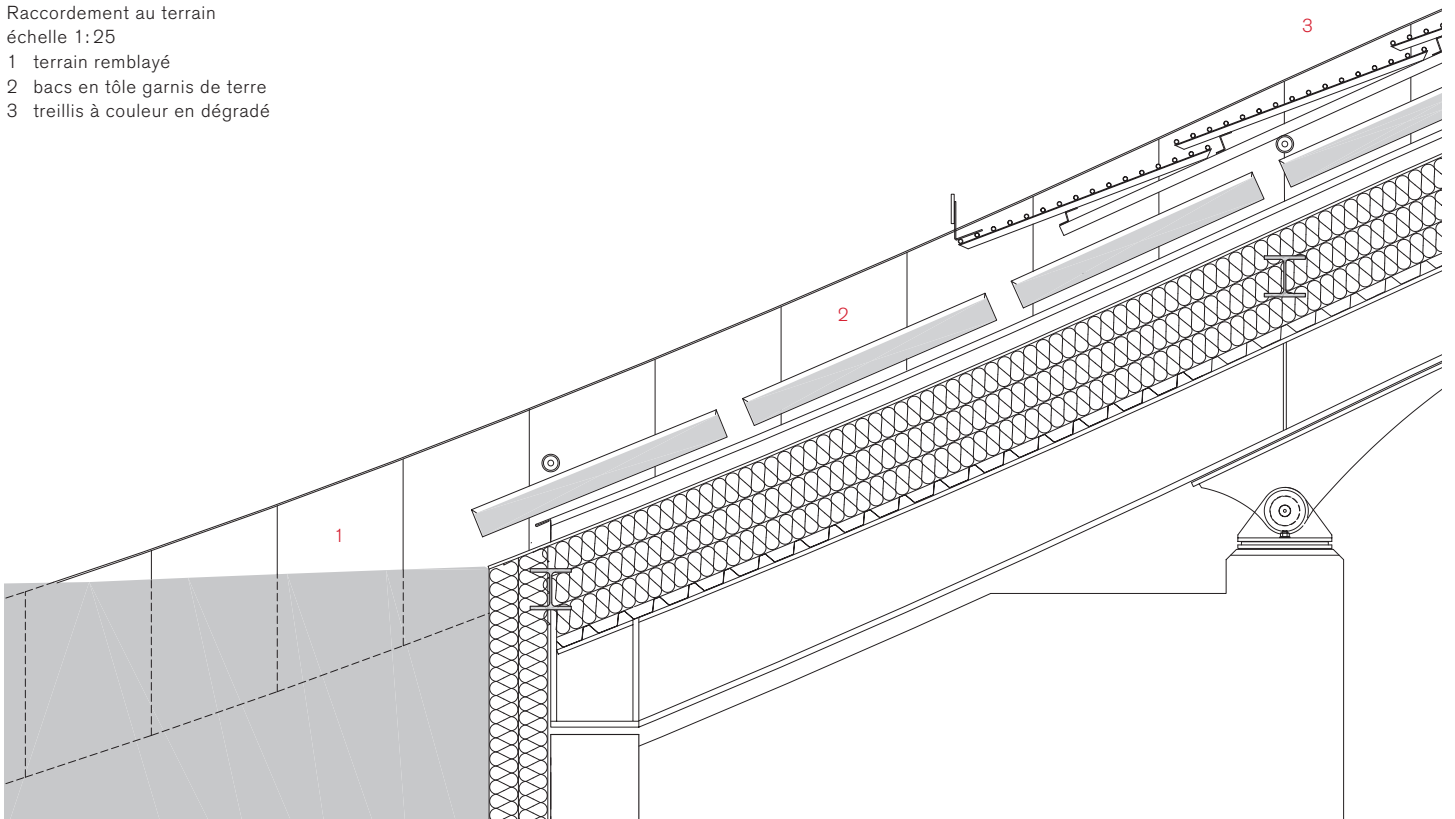






Des raidisseurs assurent la stabilité de la structure dans le sens transversal. Les barres inférieures (HEB 140) sont appelées à reprendre, en premier lieu, les forces horizontales générées par les arcs inclinés dans la partie avant de l'ouvrage. Les barres supérieures (tubes de Ø 48 mm) restent apparentes même après la pose de l'isolation thermique et portent en partie des treillis; associées à des bacs en tôle remplis de terre, elles doivent contribuer à une transition douce entre le terrain naturel et la topographie construite. On parle de différents «degrés de géométrisation du paysage» (Bernard Plattner, RPBW).

- Raccordement au terrain  
 échelle 1:25
- 1 terrain remblayé
  - 2 bacs en tôle garnis de terre
  - 3 treillis à couleur en dégradé



## Fonctionnement de la façade

Les façades, divisées en deux et suspendues au toit par des câbles, méritent une attention particulière. En effet, elles doivent pouvoir absorber l'ensemble des déformations du toit – soit  $\pm 35$  mm dans le sens vertical et  $\pm 20$  mm dans le sens horizontal – dues aux charges d'exploitation et aux variations de température, sans subir, si possible, des contraintes. Les déformations thermiques différenciées sont dues au fait que les arcs en arrière des façades sont abrités alors que ceux qui sont à l'air libre sont restés sans revêtement. Disposés à une distance de 1,60 m environ, les montants des façades, composés de deux bandes d'acier plat, sont nettement détachés de la surface vitrée et positionnés à l'extérieur de cette dernière.

En raison des sollicitations différentes, les façades sont subdivisées en trois systèmes partiels. Le premier porte les charges verticales dues à la partie inférieure de la façade et à l'avant-toit (HEB 160 en flexion, reliées par des raidisseurs pour constituer un voile). L'avant-toit, avec une portée de 6,50 m, s'appuie d'un côté sur

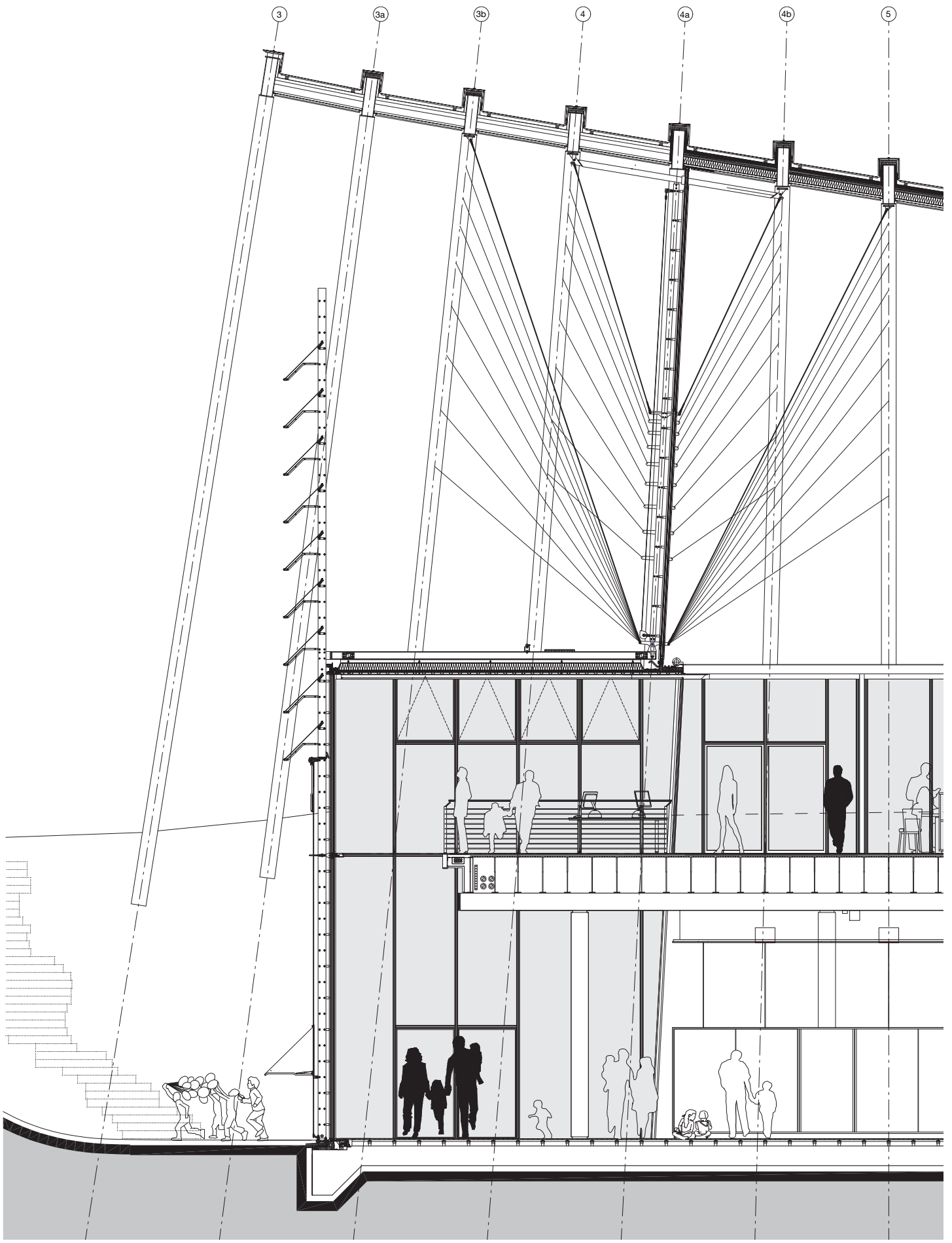
les montants de la partie inférieure de la façade, alors que de l'autre côté, il est suspendu par des câbles au toit, dans les axes 3b et 5. Une petite pièce articulée relie le bout des câbles à l'avant-toit permettant des déplacements horizontaux de ce dernier sans générer des actions indésirables sur les câbles. Le deuxième système porte les charges dues au vent et au poids propre de la partie supérieure de la façade. Les montants de la façade sont soutenus à mi-hauteur par des câbles fixés à la toiture. La charge totale de la façade est mieux répartie par le fait que ces câbles sont suspendus à un autre arc que celui qui porte l'avant-toit. L'avant-toit et la partie supérieure de la façade ne sont reliés que pour reprendre la charge due au vent. Un trou oblong à l'endroit du raccordement empêche l'introduction des charges verticales de l'avant-toit dans les montants de la façade. Contrairement à l'apparence, il n'y a pas de lien entre la façade et l'arc qui la surplombe. Ici, les montants atteignent le « balancier » perpendiculaire à la façade et lié par une articulation aux arcs dans les axes 4 et 4b. Le balancier, les câbles et les montants de la façade constituent le troisième système, ce qui crée une précontrainte et empêche, par là, que les câbles de la partie supérieure de la façade ne soient détendus sous l'effet du vent. Afin de réduire la longueur de flambage des montants supérieurs qui peuvent atteindre 10 m, une barre de traction relie, à mi-hauteur de la façade, les montants courts et rigides des bords aux montants longs du milieu.

La façade présente quelques points de passage dont le balancier a la plus importante section (RHS 120/120/8). On a renoncé à une isolation de ces parties, car l'humidité de l'air dans le bâtiment est contrôlée en permanence et ainsi une condensation n'est pas à craindre.



**Emplacement** Centre Paul Klee, Monument im Fruchtländ 3, Berne  
**Maître d'ouvrage** Fondation Maurice E. et Martha Müller, Berne  
**Architecte** RPBW Renzo Piano Building Workshop, Paris; ARB Arbeitsgruppe, Berne  
**Ingénieurs** Ove Arup & Partners International Ltd, Londres; B+S Ingenieure AG, Berne  
**Réalisation** Itten + Brechbühl, Bâle  
**Construction métallique** Zwahlen & Mayr S.A., Aigle  
**Façades** Tuchschild AG, Frauenfeld  
**Structure en acier** arcs soudés, 1'200 t d'acier, 330 éléments d'arc, 2'900 éléments secondaires, 5'000 boulons  
**Surface de la toiture** 11'500 m<sup>2</sup>  
**Protection contre l'incendie** Conception globale, revêtement  
**Durée des travaux** 2001–2005; montage de la structure en acier: 6 mois

Coupe à travers la façade de la colline nord  
échelle 1:100





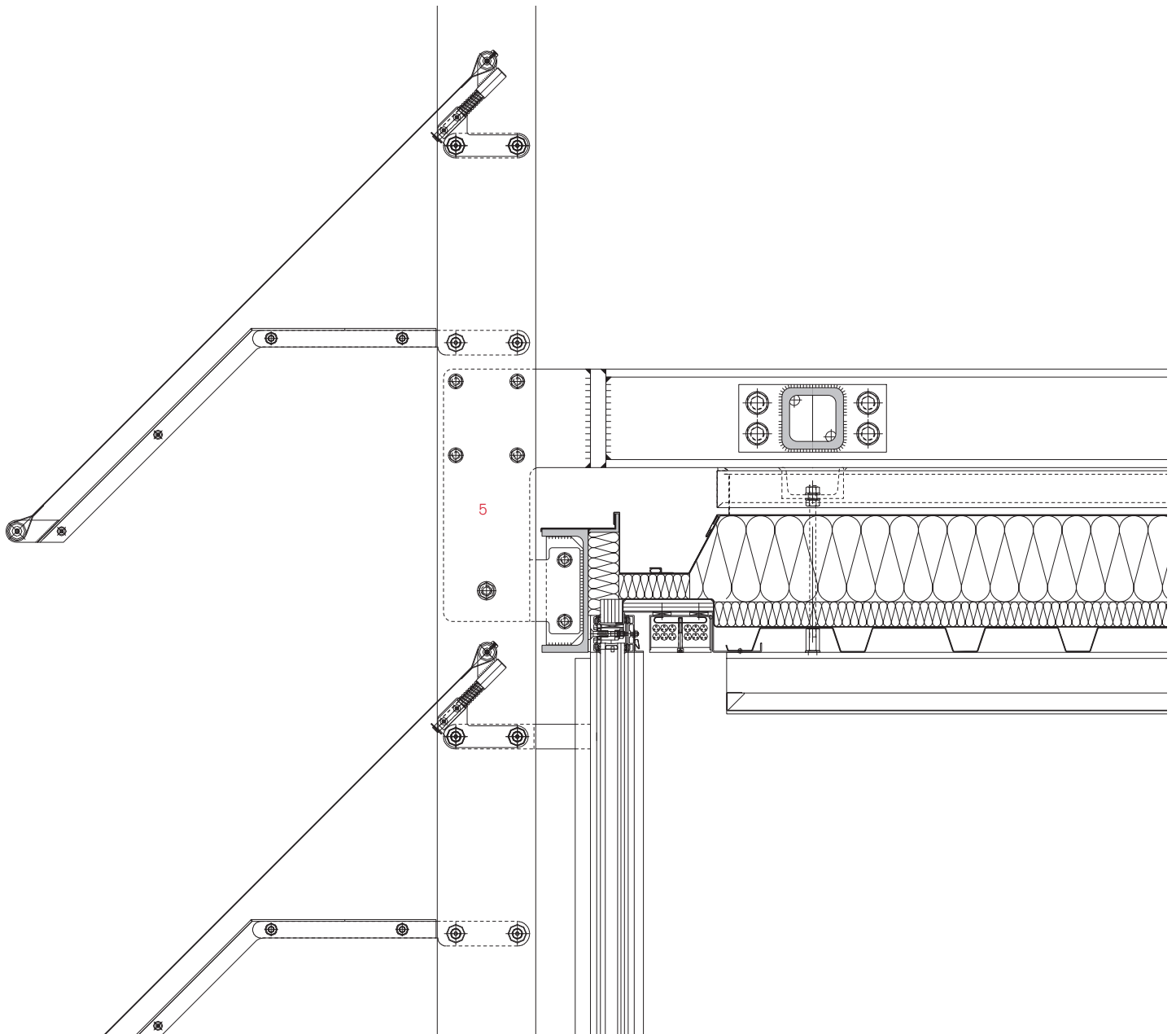
Avant-toit avec raccordement aux  
façades inférieure et supérieure  
échelle 1:10

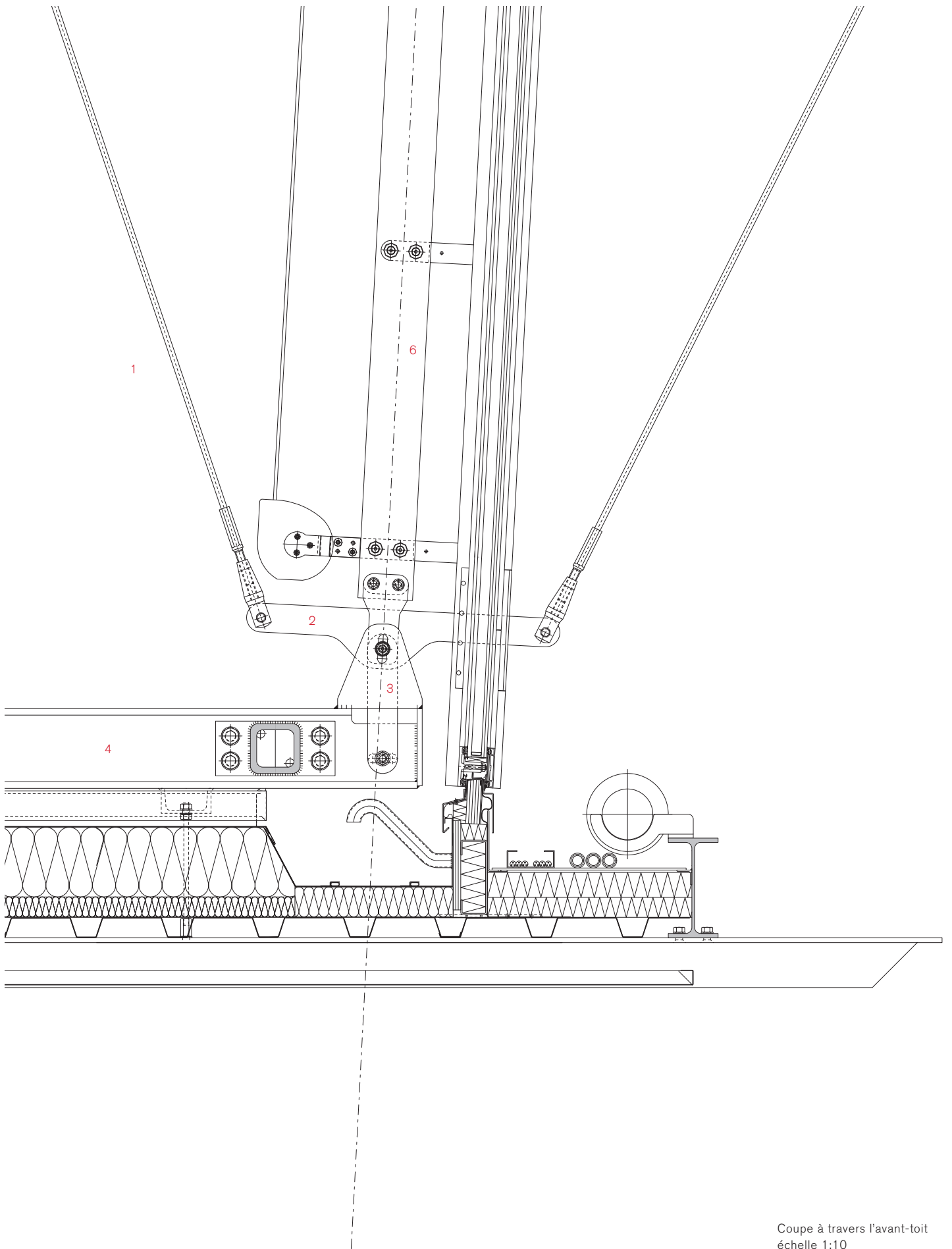
Système No 1

- 1 fixation de l'avant-toit
- 2 bascule
- 3 pendule
- 4 poutre en flexion avec raidisseurs
- 5 montant de la façade inférieure

Système No 2

- 6 montant de la façade supérieure,  
liaison avec la position 4,  
mobile dans le sens vertical





Coupe à travers l'avant-toit  
échelle 1:10

# Impressum

steeldoc 02/05, juin 2005  
Construire en acier  
Documentation du Centre suisse de la construction métallique

Editeur:  
SZS Centre suisse de la construction métallique, Zurich  
Evelyn C. Frisch, Directrice

Conception graphique:  
Gabriele Fackler, Reflexivity AG, Zurich

Rédaction:  
Evelyn C. Frisch, Zurich

Collaboration rédactionnelle, textes et mise en page:  
Alois Diethelm, Zurich (ad)

Traduction française:  
Pierre Boskovitz, Sainte-Croix

Photos:  
Titre: Foto Hans Ege, Lucerne  
Editorial: Renzo Piano Building Workshop  
Article Centre Paul Klee:  
Œuvre réalisée: Foto Hans Ege, Lucerne  
Phase de construction: Renzo Piano Building Workshop  
(p. 4, 8 en haut, 10, 11 à droite); Volker Schmid, Arup (p. 11)  
Essai: 1: Bettmann, Corbis; 2: R. W. Mowday, Corbis;  
3 et 4: Seymour Reit, Masquerade – The amazing camouflage  
deceptions of World War II, London 1979; 5: Werk, No. 7, 1956;  
6: Detail, No. 4, 2005, 7 et 8: Gerda Gollwitzer et Werner Wirsing,  
Dachgärten + Dachterrassen, Munique 1962; 9: François Roche,  
10: Graphis, No. 132, 1967; 11 et 16: Anatxu Zabalbeascoa,  
Houses of the Century, Barcelona, 1998; 12: William J. R. Curtis,  
Denys Lasdun, Londres 1994; 13: Joos & Mathys; 14: Roland  
Halbe; 15: Volker Schmid, Arup; 17: Architecture d'Aujourd'hui,  
Avril 1984; 18 et 19: Ralph Feiner; 20: Abitare, Novembre 1999;  
21: Leonard de Selva, Corbis; 22: François & Associés;  
23 et 24: Regional History Collection, University of Southern  
California, Los Angeles

Plans: p. 6, 9: Zwahlen & Mayr SA (partiellement redessinés  
par SZS); p. 7, 10, 11, 13: Renzo Piano Building Workshop  
(partiellement redessinés par SZS); p. 14, 15: Tuchschnid AG

Administration:  
Andreas Hartmann, SZS

Impression:  
Kalt-Zehnder-Druck AG, Zoug

ISSN 0255-3104

Abonnement annuel CHF 40.–  
Numéros isolés CHF 15.–  
Changement de tarif réservé

Construire en acier/steeldoc® est la documentation d'architecture  
du SZS 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 informations techniques  
du SZS gratuitement.

Toute publication des ouvrages implique l'accord des architectes,  
le droit d'auteur des photos est réservé aux photographes. Une  
reproduction et la traduction même partielle de cette édition n'est  
autorisée qu'avec l'autorisation écrite de l'éditeur et l'indication  
de la source.