

DETAIL – Revue d'Architecture

2008 □ 7/8 · Grandes structures

Résumé français

Traduction:

Xavier Bêlorgey, architecte

E-Mail: xbelorgey@aol.com

Vous trouverez une présentation en image de tous les projets sous:

<http://www.detail.de/Archiv/De/HoleHeft/207/ErgebnisHeft>

Résumé français**Page 734****One World, One Dream? Les constructions récentes de la nouvelle Chine**

Depuis plus de 2000 ans la Grande Muraille est non seulement l'ouvrage le plus grand mais aussi le plus connu de Chine. C'est là que l'on a installé, sur un échafaudage d'acier, à l'échelle du paysage, la devise officielle des Jeux Olympiques 2008 «One World One Dream» en lettres de 15 mètres de haut. Les jeux sont placés sous la devise «Green Games», les bâtiments doivent être de haute qualité environnementale et à la pointe de la technologie. L'enveloppe budgétaire accordée au programme de protection de l'environnement est de 11 milliards d'euros. Pour la première fois les nombreux participants aux concours pour les réalisations des différents sites de Pékin sont confrontés à un grand écart presque insurmontable: créer une image convaincante, à la fois conforme à l'idée olympique et à la mesure du pays d'accueil, sans prendre le risque d'être pervertie en instrument de propagande à la botte d'intérêts nationalistes.

CCTV

En parallèle aux jeux, la télévision d'état China Central Television, CCTV, peut montrer au monde entier, grâce à son nouveau siège, les progrès techniques atteints par les médias chinois et tenter de faire oublier l'emprise du gouvernement et son rôle de censeur de l'information. Les organisations de défense des droits de l'Homme critiquent en retour que tous les terrains et logements du quartier d'affaires Central Business District ont été acquis à coup d'expropriations et contre des indemnisations beaucoup trop basses. Le résultat constitue, du point de vue architectural et par la monumentalité du bâtiment un signal impressionnant, à l'échelle du territoire, qui compte déjà parmi les icônes de l'architecture mondiale.

Terminal 3 de l'aéroport de Pékin

Un seul ouvrage peut concurrencer en ce moment à Pékin, par son importance de pre-

mier rang, le siège de la CCTV: le nouveau Terminal 3 de l'aéroport par Norman Foster. Alors que dans la plupart des aéroports le premier contact avec le pays se fait par d'étroits couloirs, les passagers sont accueillis au Terminal 3 par un grand geste: la grande halle accueille les visiteurs comme une prémonition du fait que l'aéroport est devenu la cathédrale du 21^e siècle.

Le «nid d'oiseau», le «cube d'eau»

Le nouveau stade national aux formes rondes surnommé «Bird's Nest» et le centre aquatique cubique, le «Watercube» sont censés représenter deux antagonistes: le Yin et le Yang. La structure en acier du stade est cependant nettement dominante, ne serait-ce que par sa hauteur de presque 70 mètres, supérieure aux 31 mètres de la piscine. La grande force du Bird's Nest est obtenue par la qualité spatiale de ses promenoirs. De larges escaliers qui suivent les contreforts en diagonale vers le haut donnent accès aux tribunes qui ont pour particularité de ne pas être orientées seulement sur la piste mais d'être aussi ouvertes sur les alentours en permettant au regard de traverser la structure d'acier et en lui offrant un caractère kaléidoscopique.

Alors que le stade se présente comme un espace intérieur clair, enveloppé dans une structure d'acier ouverte et complexe, la piscine est constituée de l'intérieur comme un assemblage complexe et ouvert d'espaces les plus divers et impossibles à appréhender de l'extérieur à travers l'enveloppe et son apparence de bulles de savon. Même la nuit, quand l'effet de profondeur du Bird's Nest est souligné par les éclairages et que les membres de la structure en acier se découpent sur le rouge du cœur du stade le cube d'eau reste opaque de l'extérieur et rayonne seulement comme une lanterne bleue. L'impression est d'autant plus forte quand on pénètre à l'intérieur. La double façade fait disparaître totalement la vie extérieure, les aménagements blancs semblent, devant la membrane, enveloppés de brume. La seule couleur et le seul point fixe pour le regard reste le bleu de l'eau du bassin.

L'«Olympic green», les autres bâtiments olympiques

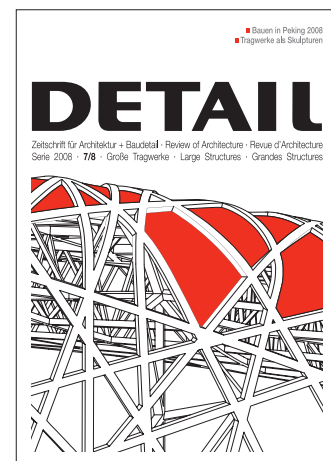
Les autres bâtiments pour les Jeux s'alignent comme les perles d'un collier vers le nord; directement après le Water Cube: le Centre médiatique «Digital Beijing» de Zhu Pei est le projet le plus ambitieux. La halle Olympique «National Indoor Stadium» conçue par l'agence allemande Glöckner Architekten est dans le prolongement direct du Watercube; son toit ondulé est censé représenter la légèreté et le rythme des athlètes; les vitrages continus rendent visibles, de l'extérieur, les différentes halles principales et secondaires.

Le Centre de congrès «National Convention Center» suit, au nord, le «Indoor Stadium» avec des installations temporaires pour l'escrime, le stade de hockey, le champ de tir à l'arc et, à l'extrémité de l'Olympic Green et les courts de tennis dont certains sont couverts d'une plateforme.

L'Olympic Sports Center Stadium est directement au sud du Bird's Nest, au-dessus de l'autoroute urbaine; le centre a déjà été construit pour les Jeux d'Asie de 1990 mais entièrement rénové et complété pour le pentathlon moderne des olympiades. Le reste des 31 équipements de Pékin est réparti au nord de la ville, le long du périphérique.

Page 768**Halle du Toueur à Pouilly-en-Auxois**

Le Centre d'interprétation du Canal de Bourgogne fait partie d'un projet culturel sur l'histoire des canaux du centre de la France. Les deux bâtiments principaux, l'Institut du Canal (voir Detail 7/8-2007) et la Halle du toueur ont été conçus par Shigeru Ban et achevés en 2004. La Halle du toueur, une voûte de 11 m de diamètre et 30 mètres de long est définie par sa structure en tubes de carton, une méthode de construction qui caractérise depuis des années le travail de l'architecte japonais. Pour la première fois, Ban utilise ici des nœuds en fonte d'aluminium. Ils sont assemblés aux tubes de carton à l'aide de chevilles en bois massif sécurisées par des vis.



En dépit de l'excellente résistance de l'assemblage, les forces du vent sont transférées aux deux extrémités de la halle à l'aide de deux poutres treillis cintrées supplémentaires. De la même manière deux arcs croisés et les appuis de la voûte sont réalisés en aluminium plutôt qu'en carton pour une meilleure protection contre l'humidité. C'est ainsi que la structure obtient son caractère d'ensemble hybride. La voûte est recouverte de panneaux de polycarbonate maintenus fixés à des profils en aluminium horizontaux et protège des intempéries la toue en exposition.

Plan
Coupe transversale • Coupe longitudinale
Échelle 1:400

- 1 résille structurelle en tubes de carton
- 2 halle du toueur
- 3 nœuds aluminium
- 4 tubes en carton Ø 120 mm
épaisseur du carton 22 mm
- 5 contre pièce hêtre Ø 75mm

Page 771 Stade national, «Bird's nest» à Pékin

Le stade national est construit sur un site légèrement surélevé au centre du site olympique, au nord de Pékin. Son implantation est imposée par le plan directeur. Notre principal souci était de créer une architecture qui fonctionne au delà des jeux 2008, c'est à dire de créer un nouveau lieu urbain qui puisse attirer et générer la vie publique. De loin le stade est un contenant avec des bords ondulés – cette impression est donnée par la rampe des spectateurs à l'intérieur du stade. La structure est aussi clairement reconnaissable, elle ne se contente pas d'envelopper le volume, elle le transperce aussi. Ce qui semble être de loin une suite de lignes claires se brouille plus on s'approche en se transformant en éléments individuels et puissants qui forment une épaisseur apparemment chaotique de poteaux, poutres et escaliers. Les gens se croisent dans cet espace piranésien et se retrouvent dans les restaurants, les bars, hôtels, boutiques, sur des plateformes ou dans les circulations horizontales, verticales ou diagonales. C'est l'enveloppe du cœur du stade et en même temps la structure, un ornement et le trait d'union entre la ville et l'arène. Ce lieu autonome et urbain à la fois a l'ambition d'être beaucoup plus qu'un programme sportif pour un événement unique. La géométrie du socle se mêle à celle du stade comme un arbre et ses racines. Un réseau très dense de chemins recouverts d'ardoise prend en compte les courants de piétons. Des jardins, des jardins minéraux ou des bosquets de bambous en contrebas conduisent au niveau bas du stade; comme le terrain est légèrement en pente cela crée un socle naturel pour le stade. L'entrée est aussi légèrement surélevée et assure une vision panoramique sur tout le site olympique. L'écriture spatiale du stade est radicale et

novatrice mais aussi simple et presque archaïque; tout est structure. L'enveloppe et la structure sont identiques. Les éléments individuels se soutiennent les uns les autres et sont reliés pour former une grille spatiale qui contient la façade, les escaliers, le volume du stade et le toit. Pour rendre le toit étanche, les interstices de la structure sont remplis d'une membrane translucide. Comme tous les équipements – restaurants, boutiques, espaces d'affaires, toilettes – sont traitées comme des unités refermées sur elles-mêmes il est possible de se passer d'une façade fermée. Cela permet aussi de ventiler le stade naturellement, l'aspect le plus important pour le caractère environnemental du projet. Le stade est pensé comme un grand contenant collectif qui laisse une impression incomparable, de près ou de loin. La conception homogène de l'intérieur du stade doit animer les foules et encourager les athlètes. Pour obtenir un effet homogène, les tribunes sont conçues avec le moins d'interruptions possibles et avec un plafond acoustique qui dissimule la structure porteur pour fixer l'attention des spectateurs seulement sur les déroulements des activités sur la piste. Les masses des spectateurs font partie de l'architecture et définissent sa forme.

Coupes
Plans
Échelle 1:2500

Niveau 0

- 1 entrée VIP
- 2 boutiques, restaurants
- 3 réception de l'hôtel
- 4 salle d'échauffement
- 5 garage souterrain
- 6 contrôle anti-dopage
- 7 soins médicaux
- 8 technique
- 9 centre de presse
- 10 athlètes/presse

Niveau 1

Caisses, entrées

Niveau 2

Promenoir public

Niveau 3

Gastronomie

Niveau 4

Loges

Niveau 5-7

11 promenoir public

Coupe sur la rive de toiture intérieure
Échelle 1:50

- 1 poutre de rive, structure du toit, plan haut tôle acier \square 1000/1000/20 mm
- 2 chéneau tôle acier
- 3 protection contre les intempéries film ETFE 250 μ m
- 4 précontrainte du film ETFE, câble acier Ø 10 mm
- 5 diagonale de la charpente, profil acier \square 600/600/20 mm
- 6 châssis de suspension de la membrane PTFE tube acier Ø 180 mm
- 7 châssis de la membrane PTFE tube acier Ø 160 mm
- 8 projecteurs du stade
- 9 protection visuelle et contre les intempéries verticale: fibre de verre, traitement de surface PTFE, résistant à la grêle
- 10 membre inférieur profil acier \square 800/800/20 mm
- 11 protection visuelle et membrane acoustique, tis-

sage fibre de verre, traitement de surface PTFE à pores ouverts

- 12 dispositif de mise en tension de la membrane PTFE profil pince en aluminium vissé par des tiges filetées M 10 à des pattes de fixation sur le tube acier Ø 89 mm

Coupe - Vue de dessus
Fixation Structure/membrane
Membrane
Échelle 1: 10
Axonométrie

- A Structure primaire avec poutres-portiques
- B Structure primaire et secondaire

- 1 garde-corps câble acier Ø 10 mm
- 2 poutre acier \square 1200/1200 mm
- 3 chéneau tôle acier
- 4 profil-pince profil aluminium extrudé 60 mm
- 5 film ETFE imprimé d'une trame de points 250 μ m
- 6 doublage des bandes ETFE b= 160 mm
- 7 pré contrainte du film ETFE câble acier en spirale Ø 10 mm
- 8 ancrage du câble de pré-contrainte, soudé au chéneau
- 9 traverse profil acier \square 150/150 mm avec pince-câble

La structure porteuse ressemble à un treillis apparemment sans hiérarchie ni direction. Mais l'impression trompe. Il s'agit beaucoup plus d'un système de symétrie en rotation, avec des poutres primaires ordonnées selon une géométrie régulière. La structure primaire est constituée de 24 portiques tangentiels à une poutre périphérique à 12 mètres de haut qui définit l'ouverture du toit. Elle est entrecoupée et contreventée de façon irrégulière par une poutre secondaire. Toutes les sections de poutre ont la même dimension externe de 1,20 x 1,20 mètres et sont dans le même plan. Les différents efforts sont repris par différentes épaisseurs de tôle. Les poutres légèrement ascendantes sur lesquelles les escaliers reposent sont intégrées à la structure primaire. C'est dans celles-ci que les poutres secondaires sont rapportées selon un rythme régulier, leurs positions –qui respectent quelques aspects techniques comme par exemple les largeurs nécessaires des voies de secours et les hauteurs de passage – sont déterminées du point de vue architectural et formel. Chaque poutre est utile, aucune n'est seulement décorative. La géométrie d'ensemble qui en découle semble chaotique mais ne l'est pas. Toute la structure d'acier de la façade et du toit est soudée, rigide et forme un seul élément. Il n'y a pas de joints de dilatation entre les membres individuels de la structure en acier.

Les variations thermiques ont pour conséquence la dilatation et le resserrement de la structure dans son ensemble. De plus, la structure en acier ne touche pas la coque de béton qui constitue le fond du stade. Les deux structures sont absolument indépendantes l'une de l'autre pour assurer la résistance aux tremblements de terre de l'édifice. Des joints articulés ont été prévus pour certains assemblages comme par exemple au droit des poteaux d'acier ou des paliers des escaliers, ils peuvent atteindre jusqu'à 30

cm de largeur dans les étages les plus élevés. La coque du stade est divisée en 6 segments. Les planchers, les murs et les poutres des gradins sont en béton coulé sur place, les gradins des tribunes sont des éléments préfabriqués en béton armé.

Page 778

Le «Nid d'oiseau» et son enveloppe ETFE

Le chiffre 8 est porte-bonheur pour beaucoup de chinois. C'est ainsi que les Jeux Olympiques d'été seront ouverts le 8.8.2008 à 8 heures du soir. Les cérémonies d'ouverture et de clôture, la finale de football et les différentes épreuves d'athlétisme se dérouleront dans le nouveau stade national de Pékin qui continuera à accueillir différentes manifestations sportives ou culturelles après les jeux; le nombre des places passant de 91 000 à 80 000. Le stade, conçu par Herzog & de Meuron est surnommé le «Bird's Nest» pour sa structure apparemment irrégulière, comme tressée. La forme du toit n'est pas libre mais c'est une section de tore, elle est donc définie mathématiquement. Les surfaces de toit sont symétriques par rapport aux deux plans de coupe verticaux passant par le centre du stade. La structure n'est en aucun cas irrégulière mais symétrique aux axes verticaux médians du stade (symétrie rabattue à 180 °) elle est formée à partir de plusieurs structures porteuses régulières superposées. La régularité est cependant presque invisible à l'œil nu justement à cause des superpositions des structures. Cet élément stylistique, la combinaison de différents motifs fait partie de la culture et de l'art chinois. La grande enveloppe du volume fermé d'environ 3 millions de m³ avec des axes d'environ 330 × 220 × 69,2 m a été achevée à temps avant le début des préparatifs des jeux. La construction métallique de la structure primaire (estimée à 45 000 t) contraste avec la couverture transparente et légère du toit et des «épaules» réalisée en film ETFE venant obturer les 880 perforations entre les «branches du nid». D'autres ouvertures sont traitées en issues et fermées par d'autres matériaux.

Les films ETFE (Asahi Fluon NJ 250 µm) maintenus par des câbles forment une surface transparente d'environ 38 000 m². Le film est imprimé dans certains secteurs d'une trame de points gris métallisés. Une membrane intérieure en tissage technique située sous le fil ETFE permet d'améliorer l'acoustique à l'intérieur du stade.

Comme les tolérances obtenues par l'entreprise de construction acier étaient difficiles à prévoir en amont, l'entreprise responsable du lot des membranes ETFE, Covertex, s'est vite décidée à exécuter les membranes en fonction de la géométrie véritable de l'ouvrage en acier. C'est ainsi que chacun des 880 modules a été défini selon sa propre géométrie en 3D. Les symétries évoquées plus haut ont été exploitées pour réduire le nombre des découpes de la membrane. Chaque

élément de membrane est fixé par un cadre-pince en aluminium (longueur totale env. 23,5 km) à de larges chéneaux en acier. Les membranes inclinées évacuent l'eau de pluie dans ces chéneaux puis en un point bas où elle est ensuite entraînée dans le réseau de collection des eaux pluviales.

La résistance du film ETFE, tout comme l'épaisseur possible à atteindre avec le processus de fabrication par extrusion sont limitées. Dans les conditions normales de sollicitation du vent et de la neige elles permettent de franchir des portées de 1,5 m. Pour réaliser des éléments en membrane de taille plus importante il faut les renforcer de câbles ou d'autres soutiens. Dans le cas du stade, les éléments de 300 m² maximum sont renforcés par 4690 câbles en acier inoxydable (longueur totale env. 30 km). L'écartement des câbles est de 0,8 et 1,4 m, le diamètre des câbles de 10 mm. Les câbles presque parallèles sont dans des poches transparentes, du côté interne de la membrane, interrompues quelques centimètres avant les têtes de câble fixées par des tendeurs et des braquets articulés sur les chéneaux d'acier. Pour limiter les déformations des membranes, les câbles entre deux appuis sont renforcés par des profils creux secondaires. La portée maximale entre ces renforts est d'environ 4 m.

Herzog & de Meuron ont déjà montré dans le stade de Munich (voir DETAIL 9/05) que la combinaison d'acier et de film ETFE permet des structures architectoniques inhabituelles. Ils ont choisi à Munich une solution de coussins ETFE précontraints et gonflés pour réaliser l'enveloppe. À Pékin, leur choix s'est arrêté sur des membranes tendues mécaniquement. Cette solution limite l'utilisation de matière elle n'est par contre pas plus simple que la mise en œuvre des coussins remplis d'air.

- A Sens de montage de la couverture ETFE, sur les axes des 24 portiques
- B Lignes d'altitude des surfaces de toiture
- C Vue de dessus des tendeurs
- D Vue de dessus des poutres secondaires (support des profils pince-câbles)
- E Module cintré dans le secteur d'une «épaule»
- F Vue de dessus sur un module cintré dans le secteur d'une «épaule»
- G,H Module de structure plan □ 1200/1200/20 mmdécoupé (vert), chéneaux (jaune), membrane ETFE 250 µm (gris), console pour câble acier (rouge), poutre secondaire des pince-câbles (bleu)

Page 780

Stade Letzigrund à Zurich

Le nouveau stade Letzigrund a beaucoup échauffé les esprits des supporters zurichois. L'ancien stade, construit en 1925 faisait partie de l'identité et était au cœur des émotions de son quartier, en périphérie de Zurich. Aujourd'hui, pour attirer les fans hors de leurs fauteuils devant la télévision, les stades de football doivent proposer toujours plus. L'UEFA choisit pour la coupe du mon-

de ou d'Europe le plus souvent des sites équipés de nouveaux stades. Pour les financer, différents programmes viennent compléter le stade proprement dit. L'Autriche et la Suisse ont combattu pour recevoir les matchs de la Coupe d'Europe 2008. Zurich a prévu le nouveau stade Hardturm, financé par des fonds privés. De nombreuses protestations ont suspendu l'avancée du projet et le stade n'a pas été achevé à temps. La ville a décidé en même temps la construction du nouveau Stade Letzigrund, apparemment plus judicieuse qu'une simple réhabilitation. Il a donc semblé évident de favoriser ce projet pour lui permettre de prendre part au championnat. Dans les programmes multifonctionnels financés par la ville il n'est pas question de multiplier les programmes. Le parti d'un stade comme prolongement de l'espace urbain se devait de pouvoir accueillir l'EURO 2008, 40–50 jeux de Super League, des manifestations d'athlétisme et quatre grands concerts par an. L'achèvement à temps a nécessité une véritable course contre la montre. Il a fallu en plus tenir compte des activités du vieux stade pendant la construction du nouveau sur le même site. Les nouveaux programmes sont concentrés hors du stade ancien, dans la tribune ouest pour permettre aux travaux de commencer pendant la démolition du stade existant. Le terrain est en décaissé de quelques mètres dans le sol, comme dans les amphithéâtres antiques et entouré de tribunes. Les hauteurs du bâtiment respectent l'échelle du quartier. Une rampe périphérique donnant sur la ville et le stade franchit les différences de niveau. Pour souligner encore plus son ouverture il n'y a pas de façades, seule une limite transparente permet le contrôle des entrées le long des rues. Les huit entrées restent ouvertes pendant les périodes sans match pour permettre au riverains d'utiliser librement «leur stade».

Plans
Échelle 1:2000
Coupe
Échelle 1:500

- 1 gymnase
- 2 piste de course
- 3 saut en longueur
- 4 réserve
- 5 technique
- 6 garage souterrain
- 7 fondation d'une pile
- 8 salle de musculation
- 9 bureau
- 10 vestiaires
- 11 foyer
- 12 rampe d'accès
- 13 personnel
- 14 cuisine
- 15 management
- 16 restaurant
- 17 loges
- 18 salons

Coupe verticale
Échelle 1:50

- 1 réseau électrique

- 2 panne de rive cintrée HEA 700 mm
 - 3 mât d'éclairage
tube acier \varnothing 630/630 mm
 - 4 poutre profil acier I 1,1 – 3,4 m
 - 5 plantations extensives, plantes grasses
terre végétale 80 mm,
panneau EPS 40 mm
panneau de protection contre l'érosion 8 mm
feutre drainant et protecteur
étanchéité de toiture film étanche renforcé d'un lé
de polyoléfine
panneau isolant acoustique, chant profilé
polystyrène, extrudé 40 mm
bac acier galvanisé 111 mm
 - 6 tube acier anti-déversement \varnothing 160/100 mm
 - 7 panne 120/160 mm et 60/100 mm
 - 8 lattes en robinier 50/50 mm
feutre, laine minérale 40 mm entre le lattage
transversal 60/80 mm
 - 9 surveillance vidéo
 - 10 haut-parleur derrière tissage PTFE
 - 11 gravier, lé d'étanchéité,
panneau aggloméré lié au ciment 36 mm
poutre bois massif 120/240 mm
 - 12 ouverture de révision plastique
 - 13 trop plein
 - 14 haut parleur dans un boîtier en triplis 19 mm
 - 15 poteau en compression béton armé avec
fourreau acier prépatiné 15–20 mm
 - 16 poteau en traction béton armé avec
fourreau acier prépatiné 15–20 mm
profil en traction avec barre à œillets
 - 18 profil acier I 600 mm
 - 19 panneau d'affichage contreplaqué
revêtement en résine de phénol
 - 20 panneau aggloméré lié au ciment 8 mm
profil acier, étanchéité polyoléfine
panneau triplis 27 mm
 - 21 antenne
- 1 poteau en compression, fourreau acier 15–20
mm, rempli de béton
 - 2 poteau en traction, fourreau acier, remplissage bé-
ton et âme acier
 - 3 poutre profil acier I, porte à faux max. 32 m
 - 4 tête du poteau en traction, barre à œillets avec
pointe
 - 5 ancrage du poteau en compression: platine
conductrice au droit du pied et armatures en pro-
longement du fourreau
 - 6 ancrage du poteau en traction: prolongement de
l'âme par 200 goujons
 - 7 armature en éventail permettant de reprendre les
forces d'écartement
 - 8 armature et platine pour reprendre les forces en
traction

Géométrie

La géométrie du stade Letzigrund ne doit pas répondre seulement à des contraintes fonctionnelles, elle doit aussi former un tout élégant qui puisse être mis en œuvre avec une structure porteuse efficiente. Le résultat est une structure complexe: le parallélépipède comprenant le parking et les espaces d'entraînement dans les niveaux bas de la tribune ouest se transforme en une structure en arc et rayonnante aux niveaux publics pour s'achever en un toit circulaire formant à son tour une nouvelle géométrie. Les tribunes suivent le tracé courbe du parcours des 400 mètres pour ne devenir rectilignes que le long du parcours des 100 mètres. Elles sont plus hautes et plus profondes sur le flanc ouest qu'à l'est, les places y étant plus attrayantes et autorisant sous elles d'autres fonctions. Le toit suit la pente des tribunes, il est planté, équipé de 2500 m² de panneaux solaires et posé sur 32 poutres en porte à

faux et poteaux doubles. Aussi bien le poteau que les mâts d'éclairage disposés à l'extrémité des poutres en porte à faux doivent avoir un écartement régulier. En même temps, le positionnement des paires de poteaux suit la disposition des tribunes et celle des mâts la rive du toit. Cela a pour conséquence que les pieds et les têtes des poteaux ne peuvent pas être d'aplomb. C'est pour cela que les poteaux sont inclinés. C'est ainsi qu'une nécessité constructive a conduit à ce résultat, ambitieux du point de vue formel, des «poteaux dansants».

Poutres et poteaux

Les poutres en porte à faux sont normalement portées par un poteau à la fois en pression et en tension. Pour assurer un transfert des charges optimal, les poteaux en tension doivent être placés en rive extérieure. Cela n'a pas été possible ici, les secteurs publics devant être absolument libres de tout obstacle. C'est pour cela que les 32 poteaux sont disposés en paires sur les gradins les plus hauts des tribunes. Au regard de cette disposition peu avantageuse du point de vue statique et de l'importance du porte à faux du toit, les poteaux sont très filigranes. Les poteaux en compression internes portent une charge de 1900 t, les poteaux extérieurs sont sollicités en tension par 1400 t. On a choisi de mettre en œuvre une structure composite pour répondre aux efforts importants: un noyau en béton armé est enveloppé d'acier prépatiné. L'élément essentiel de la structure porteuse est posé dessus: une poutre d'acier, pouvant atteindre jusqu'à 43 m de longueur et 32 m de porte à faux. Le chapiteau du poteau en compression est achevé par une calotte cylindrique. La poutre est simplement en appui et donc posée sans contrainte. Deux tiges filetées servent de sécurité en cas d'un retour de forces. L'extrémité du poteau en tension est conçue comme une barre à œillet et transfère les efforts par un goujon articulé.

Encastrement des poteaux

Les poteaux sont prolongés de 4 mètres par un profil d'acier en 4 éléments permettant l'encastrement dans les murs en béton armé situés au-dessous. Ces murs qui servent aussi de protection contre les tremblements de terre sont raccordés à un mur en béton gratté sur lequel la rampe périphérique est posée. Les efforts sont regroupés au point de croisement des murs: 200 têtes de goujons pour l'ancrage des poteaux en traction, trois câbles tendus à 235 tonnes pour le transfert des charges du toit, 22 barres d'armature de sécurité contre les tremblements de terre, un câble tendu à 100 tonnes pour le renfort de la rampe ainsi qu'un renfort avec des câbles d'armature contre l'éclatement des nœuds suite aux énormes sollicitations. L'exécution d'un tel nœud est possible seulement quand tous les éléments sont

dans leur position correcte et mis en œuvre dans le bon ordre.

Montage des poutres

Les calottes cylindriques et les poutres à œillets pour l'assemblage en tête de poteau se sont avérés efficaces aussi bien pour le transfert des charges que pour le bon déroulement du montage. Une grue soulève les poutres sur les poteaux et le goujon d'assemblage est positionné. Pour ce faire les poteaux de 18 tonnes sont positionnés avec une tolérance maximum de 20 mm sur les poutres assemblées en atelier d'environ 52 tonnes. Une série de mesures de contrôle a permis de garantir le respect des tolérances: dimensions des poteaux exactes au moment de leur érection, mesures de contrôle avant et après le bétonnage et avant le montage des poutres. Le haut niveau de précision a valu le coup. Les différences maximales au niveaux des poteaux sont de 12 mm, toutes les poutres se sont parfaitement intégrées et la phase de montage n'a duré qu'une demi-heure environ. Les espaces intermédiaires des poutres sont contreventés par un treillis d'acier qui porte la tôle de toiture, assure une protection contre le renversement, reprend les forces horizontales et assure l'évacuation des eaux. Un joint de dilatation tous les trois modules permet de limiter les déformations (+/- 40 mm) liées aux changements de température. Les plus grands efforts sont au droit des poteaux sous pression c'est pour cela que les poutres sont dimensionnées à 3,4 mètres de haut alors qu'en rive elles sont ramenées à 1,1 mètre. Elles apparaissent sur la surface du toit comme des nervures. Elles sont habillées en sous face par un lambris de robinier.

Habillage du toit

Le lambris de bois est fixé à la structure de façon à ce que ses déformations soient indépendantes de celle-ci. Le découplage est important, la structure changeant de plusieurs centimètres en hiver et en été et pouvant même se soulever sous l'effet du vent. Un assemblage rigide entre la structure acier et le lambris en bois aurait conduit à des détériorations des lattes de bois ou à des défaillances d'assemblage. Les déformations du toit dues à son poids propre, aux installations photovoltaïques, à la neige et au vent ont été prévues avec exactitude en amont, les résultats des calculs ont ensuite été vérifiés sur le chantier, les valeurs changeant de seulement quelques millimètres, selon les mesures prises à différentes heures: l'après midi la surface du toit est chauffée par le soleil, se dilate et provoque une déformation vers le bas alors que, tôt le matin, aucune déformation ne se produit. Les déformations du toit seront aussi surveillées à l'avenir et permettront d'obtenir des informations sur le vieillissement de la structure.

Page 786
Crématorium à Kakamigahara

On associe pas forcément la légèreté au béton armé et pourtant, le toit du crématorium «Meiso no Mori» – forêt de méditation– semble flotter au dessus du paysage. Le crématorium est au cœur du cimetière aux allures de parc de Gifu, ville préfecture de 150 000 habitants, entre une colline boisée au sud et un étang artificiel au nord. La démolition du bâtiment d'origine a permis à Toyo Ito de réaliser une chapelle funéraire dégagée de tout contenu religieux. Il souhaitait créer un lieu de recueillement avec une liaison étroite avec la nature, soulignée par son écriture organique.

Le toit constitué de formes concaves et convexes de béton de 20 cm d'épaisseur se prolonge sous forme de 12 poteaux coniques et s'appuie aussi sur le noyau de deux niveaux. Des cubes habillés de marbre constituent des espaces introvertis dans lesquels les rituels des adieux, jusqu'à la crémation, peuvent se dérouler.

La forme du toit est le résultat d'une collaboration étroite avec l'ingénieur structures Mutsuro Sasaki. Au départ, l'esquisse était intuitive, basée sur la pratique, ses coordonnées spatiales ont été numérisées puis soumises à une analyse statique menée grâce à l'ordinateur. Il est apparu nécessaire de minimiser les forces internes et d'assurer une pente suffisante pour l'évacuation de l'eau de pluie dans les têtes des poteaux. Des centaines de cycles de calcul ont fini par donner le modèle d'une forme optimale, inconnue dans sa version finale aussi bien par l'architecte que par l'ingénieur. C'est sur la base de ces données numériques que les éléments de la co-

que et les poteaux ont été préfabriqués. Aussi bien la mise en œuvre de toute la coque –seulement des variations très faibles ne pouvaient être tolérées– que la phase du bétonnage ont été un défi: seul le travail parfaitement exact avec un béton à durcissement rapide a permis de réaliser la coque dans une épaisseur régulière et homogène.

Plans échelle 1:750 Coupe échelle 1:500

- 1 entrée principale
- 2 hall d'entrée
- 3 veillée funèbre
- 4 administration
- 5 préparations
- 6 crématoire
- 7 local technique
- 8 salle de contrôle
- 9 salle d'attente

Détails échelle 1:20

- 1 enduit étanche polyuréthane 3 mm
- mortier de finition 10 mm
- dalle béton armé 200 mm
- mortier isolant 20 mm
- revêtement de surface 3 mm
- 2 tôle acier inoxydable 5 mm
- 3 verre trempé 19 mm
- 4 évacuation des eaux pluviales intégrée:
- tube acier Ø 216 mm
- 5 marbre 20 mm
- lit de mortier 10 mm
- isolant thermique 20 mm
- isolant thermique 100 mm
- béton armé 200 mm
- couche de propreté 80 mm
- 6 chéneaux de condensation acier inoxydable
- 7 plat acier 165/12 mm
- 8 plat acier 165/9 mm

Page 791
Terminal aéroportuaire à Pékin

Le nouveau Terminal 3 de l'aéroport de Pé-

kin est, avec ses presque 3 kilomètres de long, l'un des plus grands bâtiments du monde. 50 millions de passagers annuels y sont attendus à partir de 2020. Malgré la dimension, la clarté et la symétrie du plan garantissent la bonne orientation. Le complexe linéaire s'élargit à ses extrémités pour former deux grandes halles: le Terminal T3 au sud pour les vols domestiques et le Terminal T3B au nord pour les vols internationaux. La forme arquée est soulignée par la surface de toiture homogène et sa double courbure. L'ensemble fait 350 000 m², les lanterneaux intégrés assurent la ventilation naturelle des espaces. La charpente est constituée de poutres treillis en acier, portée par des poteaux d'acier pouvant atteindre 30 m de haut. La sous face est constituée de fines lamelles d'aluminium qui ménagent des vues dans la structure et dont la finesse confère légèreté et dynamisme aux espaces de la halle. Organisées comme des volumes ouverts avec des galeries et des niveaux en escalier des liens visuels riches sont créés entre les halles. La mise en couleur des poteaux, des plafonds et des poteaux de façade passe du rouge au terminal T3 A qui est aussi l'entrée du complexe, au jaune dans le Terminal T3 B.

Le toit d'acier est porté par une structure de plancher en béton armé. Les transferts de charges horizontales et verticales se font par les dalles en béton armé, par les retombées de poutre et les poteaux ronds, selon une trame de 12 mètres. Les portiques à plusieurs niveaux ainsi obtenus confèrent à l'ouvrage l'élasticité nécessaire dans la région de Pékin pour répondre aux risques de tremblements de terre. La charpente elle-même est stabilisée par les grands poteaux

Nouveau!

Construire des façades
THOMAS HERZOG · ROLAND KRIPPNER
WERNER LANG

«Construire des façades»
Thomas Herzog, Roland Krippner,
Werner Lang
2007, 324 pages, plus de 1000
dessins et photographies,
23x30cm, broché
ISBN: 978-2-88074-722-0

Construire des façades

Elaborer des façades constitue aujourd'hui un véritable défi pour les concepteurs. En effet, la façade doit répondre à de nombreux critères, tant fonctionnels qu'esthétiques, qui sont dictés notamment par les caractéristiques des matériaux utilisés pour sa construction. Sous la forme d'un ouvrage de référence, «Construire des façades» présente l'ensemble des principes de planification techniques indispensables à la conception et l'élaboration des façades, ainsi que les connaissances essentielles sur la nature et l'utilisation de matériaux spécifiques tels la brique, la pierre, le verre, le bois, le plastique, le béton ou le métal. Il propose en outre de nombreuses informations utiles pour l'élaboration de façades modernes en verre ou destinées au stockage de l'énergie solaire.

90,- €/130 CHF
plus emballage et
frais d'envoi

d'acier. La liaison avec les poteaux de béton armé et les retombées de poutres assure l'encastrement des poteaux d'acier. Cela permet du point de vue statique une déformation relativement illimitée du toit et de réaliser l'ensemble de la surface de toiture sans joints de dilatation. Les premières études ont montré qu'en raison du grand nombre d'éléments différents et du planning serré un treillis avec des assemblages vissés était le système porteur le mieux adapté. Les fonctions des espaces, les hauteurs sous plafond nécessaires et la limite des hauteurs de toiture fixée à 45 mètres ont imposé la forme du toit en de nombreux points.

Une trame diagonale de 36 m a été conçue pour les poteaux d'appuis du toit. La trame constructive du treillis est de 4,5 mètres. On compte en tout plus de 18 000 nœuds et presque 70 000 profils creux en acier. Du fait de la courbure du toit tous les éléments sont différents. Pour optimiser le poids des pièces, les profils en acier ont été calculés individuellement pour chaque barre. On a mis au point un système modulaire basé sur la préfabrication et la rapidité du montage sur le chantier, pour répondre à la diversité des éléments et des assemblages.

La symétrie du bâtiment n'est pas reflétée dans le treillis puisque l'organisation dissymétrique des lanterneaux empêche la symétrie entre les axes de la structure. Certaines barres de la nappe triangulée inférieure ont été supprimées ce qui donne des hexagones. On a utilisé le système Mero pour les nœuds de la nappe inférieure, après que son brevet soit dépassé il a été repris par la norme chinoise. Jusqu'à 8 barres sont fixées à une boule d'acier creuse. Le nœud supérieur a été conçu comme «bowl node» une demi sphère avec un élément supérieur cylindrique permettant d'assembler directement des profils creux carrés pour la fixation directe du bac acier de la toiture. Le maître d'ouvrage a ce pendant décidé de modifier ce détail. Le «bowl node» a été remplacé par le nœud sphérique, rendant impossible la pose du bac acier et nécessitant la création d'un second plan porteur. Les fixations par vis, ne pouvant pas être réalisées avec les qualités d'acier disponibles sur place, ont été remplacées par des assemblages soudés. Cela a nécessité un échafaudage complet du toit pendant le montage, a nettement modifié le déroulement du chantier en déplaçant ses points forts de la préfabrication aux montages sur place. Cet exemple montre comment les différentes conceptions des détails et comment les rapports à la technique sont abordés différemment selon les différentes cultures.

Coupe station de trains rapides et halle principale T3A
Échelle 1:4000

Schéma de fonctionnement T3 B niveaux 1-3
Coupes sur la halle principale, halle des départs
Échelle 1:4000

Plan niveau 3

Échelle 1: 10 000

Niveau 3: arrivées, international
Niveau 2: départs, international et trains de liaison
Niveau 1: locaux techniques

- 1 contrôle des passeports, visa
- 2 salons VIP
- 3 halle de départ
- 4 salle d'attente
- 5 navette souterraine d'embarquement
- 6 arrivée des bagages
- 7 locaux techniques
- 8 station de train rapide
- 9 parvis
- 10 départs, trafic national

Coupe transversale sur la halle de liaison
Échelle 1:1500

Coupe constitution du toit avec ses lanterneaux
Échelle 1: 50

- 1 panneau aluminium isolé 60 mm
- 2 poutre profil acier I 160 mm
- 3 verre de sécurité feuilleté 58 mm
- 4 profil acier □ 175 mm
- 5 vitrage isolant verre de sécurité feuilleté
- 6 constitution de la toiture: couverture tôle d'aluminium, joints debouts 1,5 mm, isolant thermique 200 mm, pare vapeur, isolant acoustique 150 mm, bac acier perforé 150 mm
- 7 chéneau panneau acier inoxydable 250 mm
- 8 treillis nœuds d'assemblage supérieurs acier inoxydable
- 9 tube acier Ø 300 mm
- 10 lamelles aluminium □ 150/25/1 mm peintes en blanc sur châssis profil acier □ 160 mm

Perspective charpente et plafond suspendu
Coupe sur la façade
Échelle 1:100

- 1 constitution du toit voir p. 794, alinéa 6
- 2 profil acier □ 250 mm
- 3 jonction de façade souple
- 4 poteau acier Ø 640 – 1130 mm avec évacuation de l'eau de pluie intégrée
- 5 poteau de façade incliné: tube acier Ø 200 mm
- 6 traverse horizontale profil acier □ 140/200 mm
- 7 vitrage isolant verre de sécurité feuilleté 2x 10 + vide 16 + verre trempé 15 mm, traitement de la surface Low-E
- 8 protection solaire fixe, lamelles aluminium laquées
- 9 assemblage poteau à la dalle d'étage
- 10 aluminium 3 mm, panneau sandwich 100 mm
- 11 pied de poteau avec goujonage bétonné
- 12 piste

Page 798 Gare «Southern Cross» à Melbourne

La nouvelle gare Southern Cross de Melbourne se veut gare urbaine, sur le modèle des grandes gares européennes. Comme une place couverte, elle assure les liaisons piétonnes au-dessus des voies, à l'abri, entre le centre ville et les Docklands. Le système de toiture trapézoïdal qui franchit l'îlot entier de 216 x 180 mètres a une géométrie particulièrement complexe sans aucune symétrie ni répétition. Grâce à la fabrication assistée par ordinateur, toutes les pièces de formes différentes ont pu être réalisées sans surcoûts trop élevés. La forme de l'ensemble qui rappelle un paysage de dunes a été définie par des études aérodynamiques qui ont montré les possibilités de ventilation de l'espace par convection naturelle.

Les gaz d'échappement des locomotives diesel s'élèvent selon les courants qui se forment sous le toit et sont extraits par les ouvertures en partie hautes. Les courants d'air qui se forment sous le toit garantissent la bonne extraction de l'air vicié toute l'année.

Les poteaux Y en acier de 6 à 16 mètres de haut, de section creuse, sont positionnés un quai sur deux. Ils portent la structure primaire, des poutres treillis ondulées d'une portée de 40 mètres dans le sens de la voie entre lesquelles des coussins transparents en membrane ETFE constituent l'éclairage zénithal. Une structure secondaire aux formes libres est posée sur la structure primaire avec laquelle elle contraste. Grâce au déplacement des espaces secondaires dans des cubes indépendants, tout l'espace principal demeure aussi généreux que clair.

Plan du niveau supérieur
Coupes Échelle 1:2000

- 1 entrée
- 2 vente de billets
- 3 passerelle piétonne
- 4 boutiques
- 5 administration
- 6 boutiques/bureaux

Plan masse Échelle 1:20 000

- 7 entrée principale
- 8 passerelle piétonne

Détail
Poteaux en Y • Éclairage zénithal ETFE • Ouvertures de ventilation
Échelle 1:50

- 1 couverture aluminium à plis verticaux
- 2 tube acier Ø 120 mm
- 3 évacuation de l'eau
- 4 coussins ETFE, éclairage zénithal
- 5 structure cintrée, treillis acier Ø 355 mm
- 6 poteaux tube acier Ø 180-120 mm
- 7 réseau supérieur
- 8 projecteur
- 9 structure treillis tubes acier Ø 3600 mm, 1600 mm
- 10 tube acier Ø 170 mm
- 11 panneau de plafond aluminium
- 12 protection contre la pluie de l'ouverture de ventilation aluminium, taux d'ouverture 55 %

Page 802 Patinoire à Sankt Pölten

Le contour dynamique et en pente de la patinoire reprend les hauteurs du volume existant sur le terrain et s'achève au nord par le traitement d'un point haut marquant. La patinoire publique, le centre d'entraînement de hockey sur glace, de patinage artistique et de vitesse sont regroupés derrière la peau en aluminium lisse et brillante. Deux volumes de différentes hauteur encadrent la patinoire en L, au sud et à l'est. Une passerelle entre la partie basse et les vestiaires et les services plus en hauteur forme un avant toit et confère à l'entrée vitrée son caractère accueillant. On atteint à partir de là le foyer, les vestiaires, le buffet et la boutique d'articles pour les fans. Les vestiaires pour les joueurs et les locaux techniques sont regroupés dans l'autre aile et surmontés des tribunes

et des salons VIP. Le règlement du jeu exige une hauteur sous plafond de 7 mètres au-dessus des 30x60 mètres de la piste de glace. De la même façon, la vue à partir des tribunes sur la piste ne doit pas être troublée par d'éventuels poteaux, c'est une contrainte particulière pour la structure de la patinoire. Les douze poutres en lamellés collés, de formes et sections différentes s'appuient sur des piles préfabriquées en béton armé. La géométrie inhabituelle de la structure s'inspire d'un corset qui s'élargit en son centre. Les murs et le toit sont construits comme des éléments sandwich porteurs, l'aile des services fait exception et est en maçonnerie de béton armé. La température basse dans la patinoire, utilisée toute l'année, la chaleur des vestiaires et l'humidité de la piste de glace imposent différentes contraintes à la technique et ont même nécessité de doubler le pare-vapeur. Les bandeaux vitrés et les façades sont conçus pour que les rayons du soleil ne touchent pas directement la surface de glace mais pour que tout l'espace soit bien éclairé et clair lors de son usage diurne. La nuit, les façades et leurs percements servent de surfaces d'orientation lumineuses.

Plans • coupes Échelle 1:750

- 1 banc de touche, jury
- 2 entrée
- 3 vestiaires
- 4 douches
- 5 technique
- 6 banc des joueurs
- 7 salle sèche
- 8 bureau
- 9 boutique
- 10 foyer
- 11 surveillant
- 12 personnel
- 13 aplanisseur de la glace
- 14 production de froid
- 15 tribune
- 16 vide
- 17 loge VIP
- 18 chauffage
- 19 ventilation / eau chaude
- 20 panneau d'affichage

Coupes verticales Échelle 1:20

- 1 lé d'étanchéité PVC avec tissage polyester panneau OSB étanche à la vapeur 18 mm poutres en 80/260 mm / feutre isolant thermique 240 mm pare vapeur film PE 0,2 mm lattage 30 mm, panneau acoustique laine de cellulose compactée 25 mm
- 2 panneau composite aluminium-PE traitement de surface PU 4 mm, système aluminium, vide ventilé 60 mm coupe vent polyacryl collé panneau OSB, joints fermés 15 mm pin 100/180 mm, entre laine de roche 180 mm frein vapeur film PE collé platelage 22 mm panneau aggloméré lié au gypse 8 mm poutre bois lamellé-collé 2x 240/1100 mm
- 3 marche, pièce préfabriquée béton armé 120 mm isolant système composite polystyrène-ciment goujonné 100 mm frein vapeur triple épaisseur de résine époxy enduit coloré laque acrylique grise béton
- 5 carreaux de céramique 8 mm, colle

- 6 étanchéité film à peindre avec tissage enduit chauffant 70 mm frein vapeur film PE 0,2 mm isolant thermique dispersion minérale, liée 80 mm frein vapeur film PE collé éclat de pierre 90 mm, béton armé 350 mm
- 7 caoutchouc 9 mm, colle époxy
- 8 granulat caoutchouc-plastique 20 mm, asphalte drainant 60 mm, aplanissement 50 – 60 mm protection anti-géllévitte caillasse
- 9 couvre joint polyéthylène 15 mm recouvrement polycarbonate 4 mm tôle acier galvanisée capotage plastique blanc renforcé de fibre de verre 10 mm
- 10 glace 40 mm, gazon synthétique recouvert de sable 12 mm, panneau absorbant plastique lié avec une résine de synthèse saupoudrage de sable, quartz feutre de support, plan de finition 50 mm couche de gravier 150 mm isolant thermique 200 mm couche de gravier 400 mm feutre, plan de finition étanché
- 11 support, fixe latéralement, assuré contre le renversement, membre haut fendu avec une âme acier insérée, membre inférieur mis en place sur le chantier sur un support soudable, enduit de protection incendie
- 12 poteau béton armé 1000/500 mm avec couplage à la traction profil T/IPE 300/2 mm
- 13 béton armé lissé 150-160 mm, couche séparatrice film PE

Axonométrie de la structure poutre et poteaux, axe 3 Échelle 1:400

- 1 joint de travail (production) des poutres
- 2 joints des poutres (transport)
- 3 couplage des poutres à la traction /compression, tube acier
- 4 liaison tiges filetées
- 5 support articulé des poutres
- 6 encastrement des poteaux

Page 810
Conditions spécifiques de la patinoire de Sankt Pölten

La leçon de Bad Reichenhall

Lors de la conception de la patinoire, le souvenir de l'effondrement de celle de Bad Reichenhall, en 2006, n'est pas loin. L'expert et professeur Stefan Winter, de l'Université technique de Munich rappelle cependant, dans l'analyse des causes de l'accident, qu'une structure en lamellé-collé répondant aux standards actuels n'est pas comparable à la structure en bois qui était celle de Bad Reichenhall. Les conséquences en boule de neige des différents facteurs comme le choix d'un système porteur inadapté, sans certificat de conformité statique combiné avec plusieurs erreurs de mise en œuvre et le manque d'entretien ont conduit à l'effondrement. Il est même étonnant que, malgré ses graves défauts, la patinoire ait tenu 30 ans. La patinoire de St Polten, quant à elle, a été construite avec des poutres en lamellé-collé de pin conformément à la réglementation en vigueur de la norme EN 386. Le dimensionnement correspond à la classe d'usage 3 avec une réduction de 15% des portées admissibles pour assurer la sécurité vis à vis des variations de l'humidité ambian-

te et donc ainsi aussi de celle des parties construites. La température intérieure, l'humidité de l'air et la température de la surface de glace ont du être harmonisées de façon optimale; c'est la raison pour laquelle le parfait fonctionnement des installations techniques est particulièrement important dans une patinoire. L'entreprise chargée de l'exécution a collaboré, dès le concours, avec l'architecte pour lui prodiguer son assistance technique. Les architectes et les ingénieurs ont su, au cours de nombreux entretiens, trouver le bon compromis entre la liberté formelle et les techniques de production en tenant compte aussi bien des contraintes économiques et constructives liées au système porteur que du traitement de l'enveloppe dans son ensemble.

Structure

La coque tridimensionnelle qui constitue la toiture est aussi l'élément fondateur de l'espace. Du fait de la complexité structurelle des surfaces en hyperbole la forme a été géométrisée jusqu'à ce que les deux derniers axes soient courbes dans deux directions. Les autres surfaces sont courbées dans une seule direction et organisées en deux sections aux courbes contraires. La structure primaire est constituée par une série de poutres parallèles avec une portée maximale de 38 m sans point porteur intermédiaire grâce au seul retrait de 4-5 mètres des appuis pour un entraxe de 6,25 m. Les poutres des travées sont articulées en deux points et posées sur des piles en béton armé encastées à leur tour en partie basse.

Du côté est, elles transpercent la tribune qui assure ainsi une fonction statique en réduisant la longueur de flambement. Les poteaux préfabriqués sont, par leur inclinaison et leurs assemblages avec les poutres, conçus aussi pour assurer le contreventement transversal de la halle. Les 12 poutres en flexion acquièrent leur portance grâce la divergence spatiale des membres supérieurs et inférieurs cintrés. Les cintres de ceinture en contreplaqué sont rigides et maintenus à une bonne distance du point de vue statique par des entretoises, en traction et compression, réalisées en tubes d'acier. Avec la réduction de la résistance à la flexion au niveau des appuis la membrure de ceinture inférieure est réduite à une section carrée en extrémité de la poutre. La structure secondaire est constituée de la coque statique de la toiture en éléments préfabriqués. Ceux-ci sont en panneaux agglomérés à fibres orientées en longueur avec des chevrons et un isolant thermique intermédiaire. La peau de toiture constituée d'un lé de toiture en plastique avec une trame en polyester est appliquée sur une épaisseur assurant le frein d'humidité et formant coupe vent. Des panneaux perforés insensibles à l'humidité permettent de maîtriser l'acoustique à l'intérieur de la halle.

Exécution

Inspirée par l'idée du projet: un corset qui s'élargit en son milieu, la forme de la structure varie en référence à l'image anatomique. Pour simplifier le transport des longues poutres celles-ci sont divisées verticalement et assemblées sur le chantier. Les points de raccord sont en alternance en haut et en bas pour des raisons optiques. Un joint horizontal supplémentaire est aussi nécessaire pour des raisons liées à la technique de production mais achevé en atelier. Des presses ont été spécialement construites pour obtenir une parfaite exactitude des assemblages, et tous les éléments ont été fraisés à l'aide de fraiseuses numériques puis collés ensemble. Des tiges filetées ABC aux extrémités des fourches renforcent les poutres contre les forces en traction transversales. Comme non seulement les écartements des poteaux mais aussi la pente du toit varient, les découpes des arêtes en biais des murs et du toit n'ont pu être réalisées qu'avec des plans d'exécution en 3 D complexes. La coque du toit, incluant la couverture et son habillage, est constituée d'éléments préfabriqués. Seuls les éléments de mur ont été complétés par le contreventement de panneaux réalisé in-situ; à l'intérieur les panneaux sont en fibre de bois liés au ciment, à l'extérieur composites bois-aluminium. La complexité de la conception est particulièrement importante à cause des surfaces de toiture et de mur inclinées et a nécessité presque une année entière. Environ 250 éléments différents en acier ont été exécutés avec l'unité de fraisage numérique puis assemblés.

L'humidité

Comme la patinoire est en service toute l'année, d'août à mai le rapport air chaud-air froid s'inverse au cours de l'utilisation: en hiver la température extérieure est plus basse que la température intérieure et en été l'air est plus froid à l'intérieur qu'à l'extérieur. Pour éviter à tout prix l'humidité dans l'épaisseur d'isolant il a fallu intégrer, en toiture, des deux côtés de l'isolant, un pare-vapeur d'excellente qualité. Même dans le cas particulier des vestiaires, relativement chauds, situés sous la tribune longeant la halle froide un pare-vapeur a été rapporté sur l'isolant intérieur.

Résistance aux chocs

La patinoire est utilisée pour le patinage de vitesse, le patinage artistique et le hockey sur glace. Il est toujours possible qu'un palet atterrisse sur le revêtement de la halle, c'est pour cela que les surfaces sont revêtues de panneaux liés au ciment. Les murs en partie basse entre les vestiaires et la halle sont particulièrement exposés à des chocs importants causés par les patins ou les crosses. Les architectes ont donc choisi de mettre en œuvre un mur en béton apparent avec une âme isolante, le simple béton isolant s'avérant impossible à cause des contraintes stati-

ques. Dans les vestiaires, les joueurs peuvent atteindre avec leur crosse tous les murs, les surfaces de ceux-ci sont donc résistantes aux chocs. Le montage d'un plafond en plâtre cartoné aurait signifié trop de rupture dans le pare-vapeur, ce dernier étant nécessaire du point de vue de la physique constructive, c'est pour cela que l'on a préféré mettre en œuvre un film à peindre en finition extérieure de l'isolation thermique.

Production de la glace

Trop peu de chaleur résiduelle est produite dans le voisinage de la patinoire pour permettre une production de froid environnementale à l'aide d'une machine d'absorption alimentée par la chaleur résiduelle. Le froid nécessaire est donc produit selon un processus de refroidissement à compression électrique. Pour limiter la consommation en énergie, on utilise de l'ammoniac comme produit refroidissant. L'ammoniac a l'avantage de ne pas détériorer la couche d'ozone et est donc respectueux de l'environnement. Le gaz est cependant combustible et fortement irritant et donc utilisé en circuit fermé. La saumure est le deuxième porteur énergétique choisi. Le système d'énergie primaire est conçu pour la récupération de chaleur avec des condensateurs liquides pour permettre de réutiliser 100% de la chaleur résiduelle de la production frigorifique pour le chauffage de l'eau des douches, pour le renouvellement de la glace et pour la ventilation

Ventilation, hygrométrie, chauffage

Le danger de la formation de condensation ou de brume est particulièrement élevé dans les patinoires, l'air relativement sec soufflé se refroidissant sur la surface de glace en absorbant l'humidité. Pour éviter la formation de brume, l'humidité de l'air, la température et la répartition de l'air doivent être harmonisées. On ne peut atteindre des conditions optimales qu'à l'aide d'installations mécaniques d'assèchement de l'air qui assurent en plus que la charpente en bois n'est pas en permanence exposée à l'humidité. La charpente absorbe une partie de la condensation ce qui évite les irrégularités sur la glace dues à l'égouttage de la condensation. Une ventilation à induction avec un système de répartition en plafond et un courant d'air dirigé vers le bas ont été choisis pour permettre de maintenir la section des tuyaux de ventilation assez faible. Les sorties d'air avec niveau d'induction double permettent de réduire la quantité d'air conditionné de moitié et donc de limiter nettement les coûts d'énergie de ventilation. Une installation de récupération de chaleur par absorption supplémentaire complète le système de récupération de chaleur standard et sert en même temps à l'assèchement de l'air. La chaleur nécessaire au conditionnement de l'air et au fonctionnement de la climatisation est assurée par la

récupération de la chaleur résiduelle et par celle du réseau de chauffage. La halle est chauffée au sol par un système à basse température, avec une installation d'air chaud centralisée et des plafonds radiants dans les parties accessibles au public.

Fondations

Comme la patinoire est située sur un site inondable avec un niveau de nappe phréatique élevé, l'isolation thermique doit être protégée contre les remontées d'eau (les poussées verticales); le problème a été résolu par une surcharge. La constitution de la piste de patinage avec une fondation étanche à l'eau et au gel protège de la montée de l'eau. Grâce à la mise en œuvre d'un isolant particulièrement épais de 20 cm il est possible d'éviter le chauffage antigel et, de la même manière, toutes les jonctions situées dans la fondation de la piste ont été conçues avec une attention particulière vis à vis de la sécurité face aux inondations ou au gel. Un gazon synthétique, teinté en blanc et intégrant le tracé des lignes du terrain de jeu réglementaires, constitue la sous-couche de la glace de la piste. Ce revêtement peut être utilisé pour des activités polyvalentes pendant les mois sans glace.

Éclairage

Le maître d'ouvrage souhaitait un éclairage homogène, sans éblouissement et sans ouvertures zénithales en toiture. Pour les tournois et les activités normales de la patinoire, aux heures d'ouverture publiques, il est cependant souhaitable d'avoir de la lumière naturelle. Il fallait donc trouver une solution pour faire entrer le plus possible de lumière sans que le soleil rayonne directement sur la glace et sans éblouir les joueurs et cela, chaque jour de l'année. Les simulations informatiques ont permis, lors de la conception, de déterminer quelles parties de façade ne sont naturellement directement éclairées ou, dans le cas d'une surface vitrée celles où le soleil ne rayonne pas directement sur la glace. C'est ainsi que la partie basse de la façade ouest a été traitée en bandeaux vitrés ainsi que tout le côté nord en grandes surfaces de verre. La puissance de l'éclairage artificiel doit être conforme aux directives sportives. Des éclairages à réflecteurs de haut rendement, à halogène, disposés entre les poutres répondent à ces directives.

- A Axiométrie du contreventement, plan de toiture
- B Structure, axes 7, 11, 13; portée 6,25 m
Déformations dues aux charges permanentes et à la neige multipliées par 10
- C Diagramme du système de ventilation
Coupe, plan
- D Diagramme des zones de température
Plan
- E Schéma fonctionnel, programme
Plan du rez de chaussée, 1er niveau
- F Diagramme des installations techniques
Production de glace, eau chaude