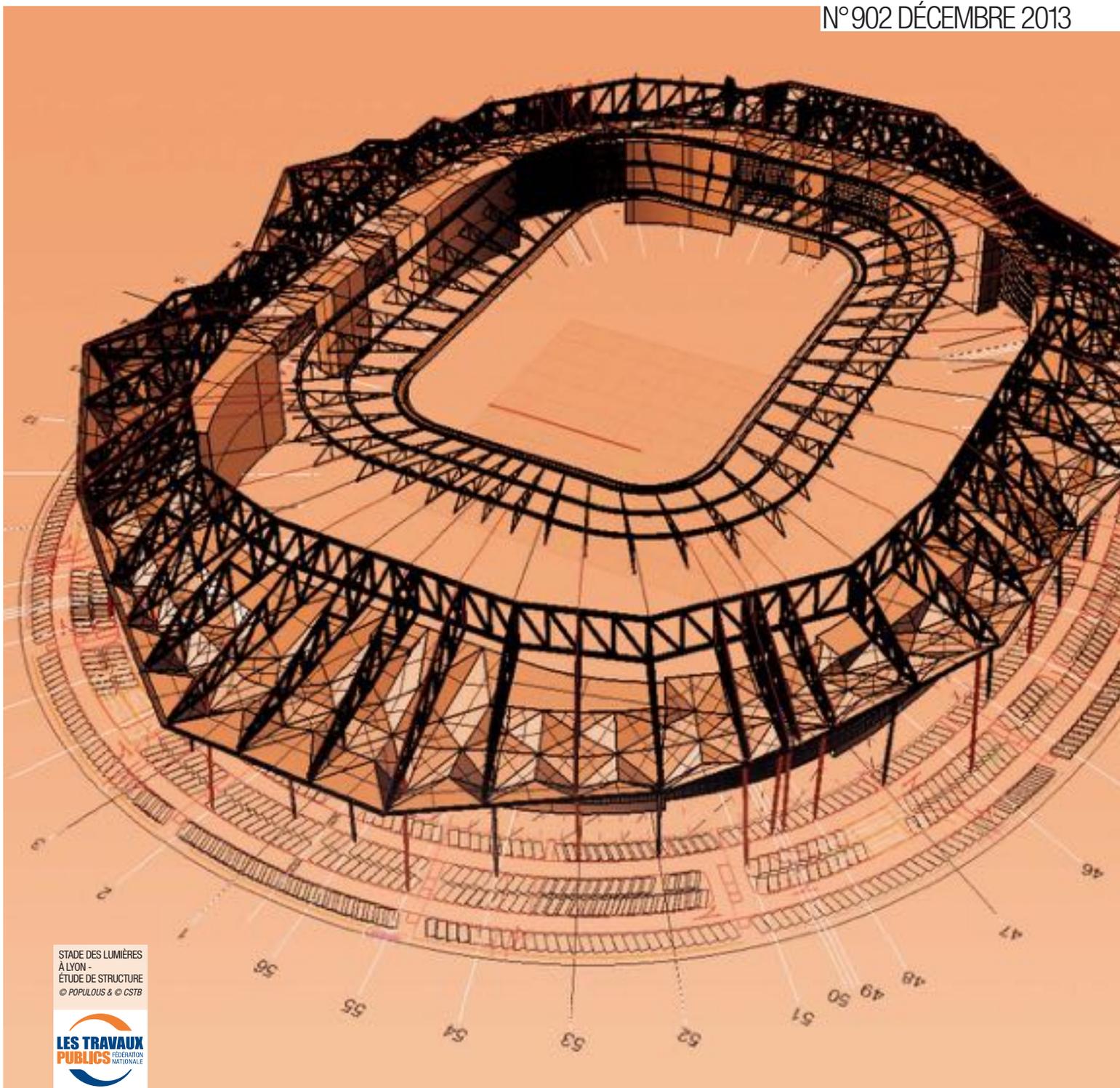


TRAVAUX

REVUE TECHNIQUE DES ENTREPRISES DE TRAVAUX PUBLICS

STADES. STADE PIERRE MAUROY A LILLE. STADE JEAN BOUIN A PARIS. ALLIANZ RIVIERA A NICE. LE STADE OCEANE AU HAVRE. STADE AQUATIQUE S.P. MUKHERJEE A NEW-DEHLI. NOUVEAU STADE DE BORDEAUX. NOUVEAU STADE VELODROME DE MARSEILLE ET SES ABORDS. SECURITE ET CONFORT DANS LES STADES DE DEMAIN. STADE DE LIBREVILLE. TRESORS DE NOS ARCHIVES : LE NOUVEAU STADE CHARLETY EN 1994

N° 902 DÉCEMBRE 2013



STADE DES LUMIÈRES
À LYON -
ÉTUDE DE STRUCTURE
© POPULOUS & © CSTB



Directeur de la publication
Bruno Cavagné**Directeur délégué**
Rédacteur en chef
Michel Morgenthaler
3, rue de Berri - 75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 03
Email : morgenthalerm@fntp.fr**Comité de rédaction**
Hélène Abel (Ingérop), Jean-Bernard
Datry (Setec), Philippe Gotteland
(Fnfp), Laurent Guilbaud (Saipem),
Ziad Hajar (Eiffage TP), Florent Imberty
(Razel-Bec), Claude Le Quéré (Egis),
Louis Marracci (Bouygues TP),
Stéphane Monleau (Soletanche Bachy),
Jacques Robert (Arcadis), Claude
Servant (Eiffage TP), Philippe Vion
(Systra), Michel Morgenthaler (FNTP)**Ont collaboré à ce numéro**
Rédaction
Monique Trancart, Marc Montagnon**Service Abonnement et Vente**
Com et Com
Service Abonnement TRAVAUX
Bât. Copernic - 20 av. Édouard Herriot
92350 Le Plessis-Robinson
Tél. : +33 (0)1 40 94 22 22
Fax : +33 (0)1 40 94 22 32
Email : revue-travaux@cometcom.frFrance (10 numéros) : 190 € TTC
International (10 numéros) : 240 €
Enseignants (10 numéros) : 75 €
Étudiants (10 numéros) : 50 €
Prix du numéro : 25 € (+ frais de port)
Multi-abonnement : prix dégressifs
(nous consulter)**Publicité**
Emmanuelle Hammaoui
9, rue de Berri
75008 Paris
Tél. : +33 (0)1 44 13 31 41
Email : ehammaoui@fntp.fr**Site internet : www.revue-travaux.com****Réalisation et impression**
Com'1 évidence
Immeuble Louis Vuitton
101, avenue des Champs-Élysées
75008 PARIS
Tél. : +33 (0)1 82 50 95 50
Email : contact@com1evidence.com

La revue Travaux s'attache, pour l'information de ses lecteurs, à permettre l'expression de toutes les opinions scientifiques et techniques. Mais les articles sont publiés sous la responsabilité de leurs auteurs. L'éditeur se réserve le droit de refuser toute insertion, jugée contraire aux intérêts de la publication.

Tous droits de reproduction, adaptation, totale ou partielle, France et étranger, sous quelque forme que ce soit, sont expressément réservés (copyright by Travaux). Ouvrage protégé ; photocopie interdite, même partielle (loi du 11 mars 1957, qui constituerait contrefaçon (code pénal, article 425).

Editions Science et Industrie SAS
9, rue de Berri - 75008 Paris
Commission paritaire n°0116 T 80259
ISSN 0041-1906

DE VRAIES PROUESSES TECHNOLOGIQUES



Au cœur de nos villes, les stades apparaissent comme les lieux historiques de la compétition sportive et de spectacles aujourd'hui planétaires. Nés à Olympie, ils se sont peu à peu transformés en une machine à voir grâce à la modernité technologique - mélange d'acier, de verre et de béton, systèmes de retransmission à la pointe de la technologie.

Consacrant une architecture monumentale, les stades sont devenus une puissance visuelle ostensible magnétisant les foules. La rigueur de leur géométrie en anneau participe du façonnement de la masse qui clame sa soumission à l'ordre de la compétition sportive au sein d'un espace clos et dans un temps rythmé par les prouesses des athlètes. Ainsi les stades contemporains sont le fruit d'un curieux métissage entre ces deux archétypes : la piste du stade grec, archétype des espaces destinés à la course, l'ellipse de l'amphithéâtre romain, archétype des espaces destinés au combat. Selon les lieux et les époques, le stade contemporain a emprunté tel ou tel caractère de ces deux archétypes architecturaux, la combinaison de ces éléments donne aujourd'hui une très grande diversité d'ouvrages.

Pour l'entreprise, un stade est un ouvrage complexe où les techniques des travaux publics et du bâtiment se marient, où l'association de matériaux différents nécessite une très grande rigueur de conception et de réalisation. L'audace, l'innovation

et l'imagination sont toujours à l'œuvre. Au chapitre des réussites, qui n'a pas en tête l'exemple historique du nouveau Parc des Princes de 1972, dessiné par l'architecte Roger Taillibert et construit par une petite entreprise alors inconnue qui a su oser et convaincre, a gagné son pari et brille aujourd'hui au firmament des constructeurs mondiaux parmi les grands des TP français.

Plus récemment, la construction du Grand Stade de Lille et une première mondiale avec un toit mobile capable, en dépit de ses 2 000 tonnes, de se refermer en 30 minutes afin de se jouer des intempéries. Autre merveille de technologie, la partie nord de la pelouse, déployée sur un immense plateau métallique de 4 400 tonnes, est rétractable. Une boîte à spectacles apparaît alors, qui se convertit en Palais des sports ou en salle de concert. Ces réalisations illustrent bien comment de tels ouvrages peuvent donner lieu des prouesses technologiques de premier plan. On remarque ainsi que les stades les plus récents, inspirés du modèle du Colisée, sont polyvalents et leurs concepteurs cherchent à rentabiliser leurs coûts de fonctionnement en les insérant le mieux possible dans leur espace environnant.

Le stade contemporain est autant le lieu du sport que le lieu du spectacle en général.

Une autre tendance lourde se dessine aujourd'hui : construire des stades respectueux de l'environnement. Ainsi, huit des douze stades qui accueilleront les prochains matchs de la Coupe du Monde 2014 vont respecter les normes de construction durable. Cela permettra d'économiser eau et électricité, tout en faisant usage de matériaux recyclés, comme le béton issu de la démolition des précédentes structures.

Face à l'agitation effrénée provoquée par l'urbanisme moderne, le stade symbolise ainsi le ciment de la communauté sportive réunie, concentrée sur elle-même, et souvent dans un état quasi-fusionnel. Il est passionnant pour l'architecte et pour l'entreprise de concevoir un stade, c'est à chaque fois un défi technique et humain qu'il faut relever !

BRUNO CAVAGNÉ
PRÉSIDENT DE LA FÉDÉRATION NATIONALE
DES TRAVAUX PUBLICS

RUDY RICCIOTTI LE PROVENÇAL ARCHITECTE SENSIBLE QUI DÉCOÏFFE

RUDY RICCIOTTI, PERSONNALITÉ FLAMBOYANTE ENTRE TOUTES, EST UN SUJET DE PRÉDILECTION POUR LES JOURNALISTES.

PROPOS RECUEILLIS PAR MICHEL MORGENTHALER



1

© AGENCE RUDY RICCIOTTI

BIOGRAPHIE EXPRESS : NÉ À ALGER EN 1952, ÉCOLE D'INGÉNIEURS DE GENÈVE 1974, ÉCOLE D'ARCHITECTURE DE MARSEILLE 1980.

QUELQUES ŒUVRES : STADIUM DE VITROLLES 1994, PHILARMONIQUE DE POTSDAM 1996, CENTRE NATIONAL DE CHORÉGRAPHIE D'AIX-EN-PROVENCE 2006, AILE DES ARTS DE L'ISLAM AU MUSÉE DU LOUVRE 2012, MUCEM DE MARSEILLE 2013, STADE JEAN BOUIN À PARIS 2013.

DISTINCTIONS : GRAND PRIX NATIONAL D'ARCHITECTURE, MÉDAILLE D'OR DE LA FONDATION DE L'ACADÉMIE DE L'ARCHITECTURE, CHEVALIER DANS L'ORDRE DE LA LÉGION D'HONNEUR, COMMANDEUR DANS D'ORDRE DES ARTS ET DES LETTRES, OFFICIER DANS L'ORDRE NATIONAL DU MÉRITE.

Qu'est-ce qui est beau ?

Qu'est-ce qui est laid ?

Qu'est-ce qu'un chef-d'œuvre ?

La beauté en architecture est la copulation sans scrupule du maniérisme avec les valeurs du travail. Les réalisations architecturales que je qualifierais de belles seraient n'importe quel barrage, presque tous les ponts et tous les navires de guerre de la Marine Nationale. De façon générique également

la totalité de la production architecturale jusqu'en 1939. De façon définitive les ouvrages de génie civil même ratés sont beaux pour la puissance qu'ils évoquent.

Rudy le Moko, orchidoclaste, dur à cuire, flibustier, grande gueule, truand marseillais, matamore, grand éracteur, mafieux, anarchiste, réaction-

naire, sûr de lui, beau-parleur, flamboyant, gitan, voleur de poules, bâtard, fils de rital, mèteque, radical, étranagement délicat, anarcho-chrétien.

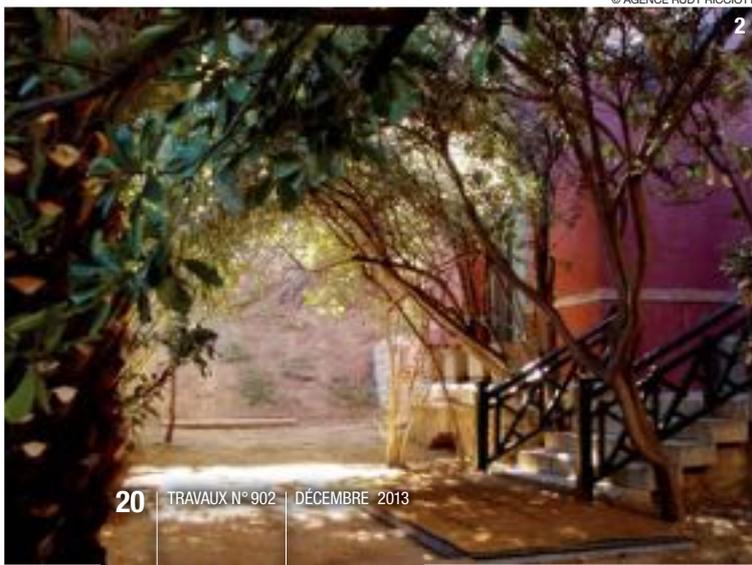
Tel est le catalogue abrégé des qualificatifs dont vous êtes gratifié, écrits noir sur blanc. Pour autant, on ne relève pas la moindre action en justice pour insulte. Cette image sem-

ble vous plaire. La provocation est-elle votre carburant ?

Les qualificatifs que vous citez relèvent la plus part du temps de l'insulte anonyme.

Au demeurant mes trois enfants, mes trois petits-enfants, mes trente collaborateurs et mes partenaires de travail ne me reconnaissent pas dans ces qualificatifs inspirés par une programmation neurolinguistique ou cognitive

© AGENCE RUDY RICCIOTTI



2

© GOOGLE



3

proche du racisme. Il est plus facile de faire du business en étant cycliste, green, végétarien, non-fumeur, de gauche, démocratique, amateur d'art contemporain, ayant bon caractère et politiquement correct, qu'en étant libre de dire, et en refusant de faire fellation, même sympathique, conceptuelle ou contemporaine. Face à l'exil de la beauté, à l'épuisement démocratique, à la désintégration européenne, à l'acculturation générique, à la globalisation et aux pulsions fascistoïdes de la bureaucratie, il convient d'être vigilant avec en main un pistolet à eau chargé de pastis. Il y a donc de nouveaux chantiers de la raison à ouvrir. L'architecture comme ombre portée politique appelle un minimum d'engagement esthétique. Évidemment les matériaux mentaux que sont la posture critique, la tension, la violence, le sensuel, le sacré, l'onirique et la radicalité pourraient déplacer l'architecture vers un art total comme l'est la performance poétique par exemple.

L'architecture, comme l'art contemporain, est menacée par l'avachissement et l'anorexie critique. On le voit bien avec l'art contemporain devenu discipline commerciale aux lieux communs les plus affligeants. Les moteurs de cette triste réalité sont la corruption par l'argent d'une part et l'émasculatation par la bureaucratie autoritaire de l'autre.

D'autres moteurs tout autant destructeurs sont la culpabilité de construire et à prendre du plaisir... Je pense que le moment est effectivement venu pour l'architecture de s'égarer un peu hors la vue du politiquement correct. Mais c'est aux architectes de combattre pour cette liberté, de se désengluer du niais et du bégaiement rhétorique pour courir quelques frissons dans l'espace libertaire.



© JEAN-CLAUDE CARBONNE

- 1- Rudy Ricciotti.
- 2- Villa La Tartane à Bandol où œuvrent Rudy Ricciotti et ses 30 collaborateurs.
- 3- Le stadium de Vitrolles.
- 4- Le Pavillon Noir, centre national de chorégraphie à Aix-en-Provence.
- 5- ITER à Manosque.
- 6- Centre Aimé Césaire à Genevilliers.

Vitruve, Palladio, Mansart, Mique, Perret, Mies van der Rohe, Le Corbusier, Frank Lloyd Wright, Niemeyer... Êtes-vous le fils spirituel de quelqu'un ?

Oui des maçons en général et de ceux sur les chantiers, compagnons ou ingénieurs qui se lèvent tôt et qui ont l'amour de leur métier. Mes modèles sont Jean Baudrillard, Pier Paolo Pasolini, Curzio Malaparte, Blaise Pascal, le Commandant Massoud, le Sous-commandant Marcos, le Général de Gaulle, le moine Giordano Bruno, Joschka Fischer pour son humour et Angela Merkel que je trouve sexy...

« Je ne suis pas un architecte de dessin ».

N'est-ce pas un handicap pour l'exercice de votre profession ?

Le dessin est trop lent, il est une figure et l'emphase de sa propre représentation. Un architecte qui dessine ne construit pas. Le dessin porte malheur. Quand j'en fais c'est exclusivement et gratuitement pour les ventes aux enchères des associations humanitaires.

Décrivez votre cabinet et votre équipe.

Une maison du début du 20^e siècle avec de beaux arbres dans un beau jardin entretenu tous les jours par une dame que j'ai embauchée comme jardinière car elle ne peut vivre de sa retraite. L'ambiance est fraternelle et combattante. En 33 ans d'exercice libéral je n'ai jamais licencié.

Vous revendiquez la qualité de « réactionnaire », est-ce dans le sens de « qui réagit » ? Mais vous avez dit aussi « je suis un architecte du 19^e siècle ».

Que faut-il comprendre ?

Je suis émerveillé par l'art de construire de cette époque. La bibliothèque de Labrouste est pour moi le chef d'œuvre absolu. À cette époque, il y avait cent mots pour décrire une façade, aujourd'hui il n'y en a plus que trois. Soit une perte désolante de mémoire et de savoirs de nos métiers. Nous perdons les mots, mais nous perdons aussi les formes. La fascination pour les productions nord-européennes et la construction à sec, l'exaltation du minimalisme, notre consommation à outrance des technologies, tout cela a laminé le travail sur la forme et la géométrie d'un bâtiment. Nous nous sommes comportés en prédateurs. ▷

© LISA RICCIOTTI



© OLIVIER AMSELLEM



Cela a conduit à une esthétique à la fois standardisée mondialement, mais aussi régie par la tyrannie du bling-bling technologique, du brillant et du tape-à-l'œil. Je suis pour la résistance au consumérisme. Je suis pour une architecture mate. En un mot être réactionnaire c'est être réactif à la modernité, rêve éteint. La rupture n'est plus d'intérêt.

Vous dites faire du maniérisme. De quoi s'agit-il ?

Le maniérisme c'est la synthèse des savoirs. Il s'agit de survie et d'appétit. En vrac, l'architecture snobée par les critiques, les étudiants snobés par leurs professeurs, les professeurs trompés par leurs femmes, puis l'épuisement européen, l'exil de la beauté, la fin de l'homme blanc, la doctrine de la pastèque, le minimalisme comme nouveau Félibrige... du latin « fellare », l'art de sucer le sucre, l'impérialisme anglo-saxon, l'architecture « lounge », la couleur fluo, le dampalon, le méthacrylate, la savonnette sous emballage plastique souple, le design comme ressource spirituelle, l'éloge du banal et de l'ordinaire comme lutte des classes, le minimalisme encore comme ultime pornographie, sport et culture, contrition et cynisme, révolution et sardine, démocratie et poutargue, république et fenouil, burka et Gotainer... Enfin bref, notre nouvel horizon métaphysique ! Il faut faire avec, quel leurre est-il si ce n'est le moment du pastis quand l'hostie a du goût. Une seule voie, une seule réalité, un seul avenir, une seule croyance, une seule sexualité, une seule expression, une seule compression, une seule compassion, un seul projet... Bombarder, bombarder Marseille pour faire un exemple et se bombarder soi-même pour respirer un peu, ou dit plus

modestement, raser les montagnes pour que l'on voie la mer. Arthur Cravan pesait 110 kg quand il était le poète boxeur qui snobait par ses muscles Marcel Duchamp. Les retables de Séville, d'or total, nous culpabilisent de ne pas croire en Dieu et nous laissent dubitatifs quant à l'œuvre d'Yves Klein. Seul résiste le Maniérisme, véritable masse musculaire apte à encaisser la colonisation de la morale architecturale. Le maniérisme, intuition politique augmentée de l'idée de bien faire quand on n'a plus d'idée, ou quand l'idée elle-même est coupable. De Gaulle disait qu'il vaut mieux une mauvaise idée que pas d'idée du tout. Le maniérisme accumulateur de savoirs et défenseur des métiers, ces métiers dont nous avons besoin, acteurs du BTP, car ils sont socialement structurants. Le maniérisme, permettant de refuser les voyages neuroleptiques de l'art comptant pour rien, est une ultime radicalité encore porteuse de sens. Le maniérisme pour refuser la taxe puritaine de la modernité. Le maniérisme comme bouclier fiscal devant cette modernité pathétique dont l'autisme inlassable... confine à la terreur. Et puis en gros, en finir à la grenade avec les stupéfiants du type convivialité et pelouse pour rêver un concert d'Alan Vega du groupe Suicide sur un porte-avion russe en buvant un Americano maniéré dans le cockpit ouvert d'un Sukhoï 27. Mieux vaut le sourire sadique de Maradona que le sourire sardonique de la Joconde. Comme Barbey d'Aurevilly, faire dans l'art de bâtir des phrases longues pour rattraper le chemin perdu.

Que faut-il entendre par « récit » dans votre œuvre architecturale ?

Je suis un architecte inquiet essayant de produire du sens, de considérer le

contexte et qui évalue la narration et le récit comme des nourritures utiles. L'architecture doit fabriquer du sens, certes, mais aussi être fabrique de cohésion sociale. Aujourd'hui, notre société subit une perte de récit et de cohésion sociale. Nous nous devons de célébrer des moments de vie pour contrer ce manque et réactiver le désir de vivre ensemble afin d'éviter la névrose.

Mon travail célèbre le contexte et la question de la circonstance, mais je ne suis pas le seul, les architectes français sont talentueux et concernés par ces enjeux de société. Il faut accepter le principe de culpabilité et assumer la difficulté d'être de l'architecture. Ainsi le maniérisme s'impose, il permet de rêver à nouveau les vertus du travail. Le mien est en opposition au salafisme architectural ambiant. L'effacement de la narration et le moralisme de braguette sont les versions aigues de la modernité. La rétention, l'interdiction du signe au profit d'une prétention en humilité sont les pathos androgynes de notre modernité finale. La confluence neurolinguistique du minimalisme traduit un intégrisme agréé (ou agrégé) et une soif moralisatrice partagés des professeurs des écoles d'architecture et des salafistes, qui intuitivement

convergent sur la critique de la minijupe. Mais où il y a croyances pour les uns il y a soumission à la culture hors-sol née des mythologies anglosaxonnes pour les autres. 80 années après le Bausou il faut me pardonner de ne plus être aux ordres d'un mouvement qui fit le procès du décor comme attribut de la scène bourgeoise. Depuis l'on connaît le long cheminement destructeur de récit via le situationnisme devenu pathologie de la psychose marxienne. Sartres reprochait à Camus d'être un philosophe approximatif. Camus répondait en disant être fatigué d'être jugé par ceux qui ont eu l'instinct de placer leur fauteuil dans le sens de l'histoire. Cet affrontement Sartres-Camus était annonciateur de l'affrontement Nord-Sud. Contrairement à la doxa quasi-religieuse en vigueur, je pense que la modernité est un projet achevé et qu'il nous faut soigner la névrose situationniste.

BFUP, HQE, inutile d'expliquer ces acronymes aux lecteurs de la revue Travaux. Ils seront ravis de connaître tout le bien que vous pensez de l'un et tout le mal que vous pensez de l'autre.

Les Bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), le Ductal comme le BSI, sont des matériaux incontournables pour réaliser, grâce à des performances mécaniques élevées, des architectures fines et élancées. La présence de fibres dans le BFUP permet à l'ouvrage de s'affranchir des aciers passifs et entraîne donc l'élimination des épaisseurs d'enrobage et la réduction des épaisseurs structurelles et des équarrissages... Il est ainsi possible de réaliser des tabliers de passerelles de 3 cm d'épaisseur. Grâce à la

7- Musée Jean Cocteau à Menton.

8- Aile des Arts de l'Islam, musée du Louvre à Paris.

9 & 10- MuCEM à Marseille.

11- Stade Jean Bouin à Paris.

© ÉRIC DULIÈRE

7



© LISA RICCIOTTI

8



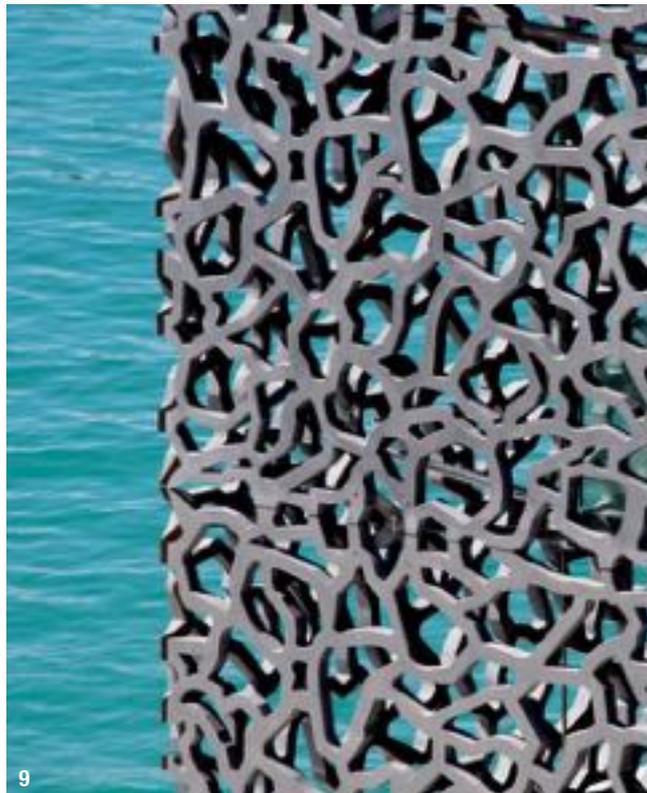
réduction de la quantité de matériau à installer, le temps de manutention et de mise en œuvre d'une résille par exemple est également diminué. Ce béton ne craint ni la corrosion, ni l'encrassement, ne nécessite ni protection, ni entretien. Non poreux, le BFUP résiste parfaitement aux agressions chimiques et polluantes (ions chlorures, sulfates et carbonatation), à l'écaillage, aux chocs, à l'usure et à l'abrasion. Dans certains domaines des cibles HQE, il est plus performant que l'acier, dans d'autres, il est voisin.

Les projets utilisant les BFUP prennent un tour innovant et constituent un défi structurel. Ils interrogent la forme par l'exploration de la matière ; des cas de figure uniques en leur genre apparaissent et permettent des premières mondiales. Les frontières sont repoussées liant ingénierie de haut niveau et vision constructive. Cette technologie va réformer en profondeur les certitudes et écritures. Le thème du travail à la compression sera aussi important que le travail en flexion. Ingénieurs comme architectes se trouveront donc confrontés à enrichir leurs regards partagés sur les ouvrages en béton.

Quant à la HQE soyons clair : la magouille aujourd'hui est de fabriquer du bénéfique sur le dos de la question environnementale.

Les banques, les industries chimiques, l'industrie de l'acier, les publicistes, tous sont « verts » sans aucun doute. La manipulation est devenue au delà du lobbying industriel une machine à fabriquer des marchés de communication pris sur les budgets recherche et développement.

L'industrie nucléaire, l'industrie pharmaceutique sont également HQE. Le bêlement caprin sur le sujet atteint



9 © LISA RICCIOTTI

un niveau pornographique. Il faut libérer les énergies et les intelligences des ingénieurs. Ils sont le futur. Il faut déréglementer et obliger aux résultats, ce qui est autre chose. Il faut bilancer l'empreinte environnementale et pour cela, réduire la pression confort et la dépendance technologique. Lisez à ce sujet mon pamphlet « La HQE® brille comme ses initiales sur la chevalière au doigt » aux éditions Le Gac Press.

Décrivez les idées directrices qui vous ont inspiré le stade Jean-Bouin.

J'ai souhaité faire un stade avec les

pieds dans la cité à l'image des arènes antiques de Rome, Nîmes, Arles.

Il dispose d'un rez-de-chaussée public et non d'un quadrillage d'espaces interdits. Le stade antique possède cette efficacité urbaine. Un stade doit pouvoir être touché quotidiennement. Le Stade Jean Bouin ne rivalise pas avec le Parc des Princes. Sa forme n'est que l'expression réglementaire des hauteurs disponibles. Au total, il fait la ola. Par opposition au Parc des Princes marqué de puissance formelle, le stade Jean Bouin est féminin et n'a que la peau et les os. Les deux obéissent à des configurations idéologiques et

à des voyages très différents. Le Parc des Princes est un voyage par interprétation tonitruante de l'art de construire. On le voit avec les coques rythmant à l'identique la dictature savante du coffrage et de la précontrainte... L'usage de la précontrainte ne renvoie pas à la culture de la miniature et de la fragilité comme le MuCEM, ni à la soumission au contexte. C'était l'épopée de Bouygues, très en avance à l'époque, c'était assez naturellement impérialiste quand ça a été fait, en 1972 l'entreprise avait des ingénieurs brillants et l'architecte Taillibert, l'idée. Le stade Jean Bouin, lui, est un stade féminin et maniéré comme l'est la mauvaise conscience de Jean Valjean, le pied sur la pièce de cinq sous.

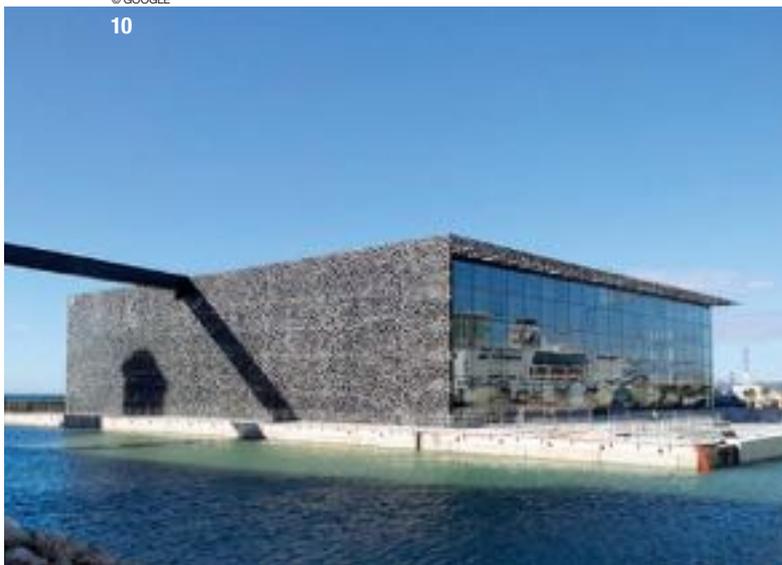
La dentelle de béton sera-t-elle la marque de Rudy Ricciotti dans l'histoire de l'architecture ?

Non, elle est la marque du pouvoir des ingénieurs et le retour de leur complexité sensible. À l'école des Ponts et Chaussées j'ai, il n'y a pas longtemps, fait une conférence.

Je disais aux étudiants de prendre exemple sur leurs prédécesseurs tel Freyssinet, Vicat et tant d'autres, qui ont honoré leurs fonctions au service de bénéfices collectifs dans l'art de construire et au service de la République. Aujourd'hui la plupart des élèves font des pipes aux banques et autres spéculateurs pour travailler dans les finances comme prédateurs des valeurs du travail. Je leur disais que leur performance de carrière sera évaluée au prorata des licenciements auxquels ils auront opéré comme variable d'ajustement économique et là sera leur honte. J'aimerais que ma marque soit celle d'avoir participé au renouveau des ingénieurs et de la mémoire du travail. □

© GOOGLE

10



© AIR IMAGES

11





© BONNA SABLA

BONNA SABLA DU TUYAU PRESSION AU SUR MESURE AVEC LA QUALITÉ INDUSTRIELLE

REPORTAGE DE MARC MONTAGNON

BONNA SABLA CONÇOIT ET FABRIQUE DES ÉLÉMENTS EN BÉTON PRÉFABRIQUÉ POUR LES CHANTIERS DE TRAVAUX PUBLICS ET DE BÂTIMENT DANS LES DOMAINES DE L'ASSAINISSEMENT ET DU TRAITEMENT DES EAUX, DU GÉNIE CIVIL, DE L'AMÉNAGEMENT URBAIN ET DES RÉSEAUX SECS. CETTE GRANDE ENTREPRISE D'INGÉNIEURS, TRÈS BIEN IMPLANTÉE SUR LE TERRITOIRE FRANÇAIS, DISPOSE ÉGALEMENT DES MOYENS TECHNIQUES ET HUMAINS POUR DÉFINIR DES SOLUTIONS SUR MESURE DANS LA CONCEPTION D'OUVRAGES, NOTAMMENT DE GRANDS PROJETS ARCHITECTURAUX EN BÉTON FIBRÉ ULTRA HAUTES PERFORMANCES (BFUHP) TELS QUE LE MUCEM, À MARSEILLE, LE STADE JEAN BOUIN ET LA FONDATION LOUIS VUITTON, À PARIS. AVANT D'ARRIVER AU BFUHP, BONNA SABLA AURA TRAVERSÉ TROIS SIÈCLES, DEPUIS L'INVENTION DU TUYAU PRESSION AU XIX^e SIÈCLE. UN EXEMPLE UNIQUE DE PÉRENNITÉ.

En effet, c'est en 1894 que Aimé Bonna invente le tuyau « âme-tôle » et crée l'entreprise Bonna qui développe sa fabrication sur des chantiers forains en France et à l'étranger.

En 1924, elle est rachetée à son fondateur par la CGE (Compagnie Générale des Eaux), son principal client, et devient la « Société des tuyaux Bonna »,

ce qui ne l'empêche pas de construire sa croissance sur les grands projets de transport de l'eau puis de pénétrer les marchés du ferroviaire et de l'environnement.

Presque simultanément, est créée en 1892 la Société Anonyme des Chaux et Ciments de Béon Lurieux qui fabrique, à l'origine dans l'Ain, des produits préfabriqués en béton et de la chaux.

1- Viaduc autoroutier de la Côtière dans l'Ain : 651 dalles d'un poids moyen unitaire de 36 tonnes.

DEUX PARCOURS QUI SE COMPLÈTENT

Dès cette époque, Bonna est présente sur tous les grands projets de transport de l'eau en France et à l'étranger. Elle soumissionne seule ou en association l'exécution de travaux de canalisations de grande envergure, ce qui l'amène à créer plusieurs usines de fabrication dans les pays où elle opère.



Nicolas Yatzimirsky,
directeur général
de Bonna Sabla.

UN ÉLARGISSEMENT DE COMPÉTENCES

Nicolas Yatzimirsky, directeur général de Bonna Sabla, constatant la baisse avérée du marché de l'assainissement, a engagé depuis deux ans l'entreprise dans de nouvelles directions : le génie civil spécifique et le bâtiment. Il nous explique les raisons de cette orientation nouvelle.

Les principaux marchés de Bonna Sabla sont traditionnellement ceux de l'assainissement et des tuyaux pression (adduction d'eau potable, circuits de refroidissement des centrales nucléaires) pour lesquels l'essentiel des travaux lourds a déjà été réalisé ; ceux de l'aménagement urbain et ceux du génie civil spécifique, pour lesquels il pressent un développement important. D'ailleurs, des projets liés à l'utilisation des bétons hautes performances sont déjà à l'ordre du jour.

Il y a trois ans, la question stratégique qui se posait était liée à la baisse du marché de l'assainissement. Ainsi, afin d'utiliser au mieux son savoir-faire technique et ses implantations industrielles, Bonna Sabla s'est orientée vers le génie civil spécifique, marché pour lequel l'entreprise a développé des solutions d'éléments préfabriqués pour la réalisation d'ouvrages d'art.

« Sur ce marché, les acteurs sont peu nombreux, précise Nicolas Yatzimirsky, et notre concurrent, si concurrent il y a, est le béton coulé en place, mais il n'en est d'ailleurs pas vraiment un car les entreprises, lorsqu'elles ont des problèmes spécifiques à résoudre, par exemple de durée de chantier ou de travaux en ville, font appel à la préfabrication ».

« Notre projet est alors d'inventer, de concevoir et de proposer des solutions complètes qui permettent à nos clients de réaliser leurs chan-

tiers dans les meilleures conditions. Et, cette offre constitue un vecteur de croissance car nous offrons une alternative à l'entreprise. Ainsi, nous sommes autant capables de concevoir un projet dans sa globalité, que de répondre à un besoin déjà bien défini par le client, qui nous confiera alors sa réalisation, tant pour notre savoir-faire que pour notre présence sur l'ensemble du territoire - unique dans le secteur de la préfabrication ».

Une autre évolution est intervenue en parallèle dans le cadre d'une collaboration avec Vinci pour les ouvrages de la LGV SEA (Sud Europe Atlantique / Tours-Bordeaux). Afin de résoudre les contraintes imposées par les Régions, c'est à dire les raccordements de la LGV à la ligne existante, la préfabrication de nombreux ouvrages s'est imposée comme la solution idéale. Elle a permis à Bonna Sabla de relancer ses fabrications de poutres précontraintes et un atelier de fabrication d'écrans anti-bruit fabrique ceux qui seront installés tout au long du tracé.

« Bonna Sabla dispose des moyens humains et industriels pour répondre aux différents problèmes posés. Par cette démarche, nous passons de la préfabrication industrielle de très grandes séries - tuyaux, éléments de regard - à des produits dessinés et spécifiques au chantier. Tout en restant leader sur le marché de l'assainissement, nous utilisons notre savoir-faire sur des productions qui ont une valeur ajoutée supérieure ».

Un autre domaine sur lequel Bonna Sabla connaît un développement important est celui des éléments de façades pour le bâtiment en BFUHP.

« Nous avons été approchés par plusieurs entreprises pour réaliser des bâtiments d'exception dont trois principaux qui sont le MuCEM, à Marseille, le stade Jean Bouin où joue l'équipe du Stade Français et, les éléments de façade de la fondation Louis Vuitton, à Paris. Pour ces ouvrages, les entreprises avaient besoin d'un partenaire ayant une grande maîtrise du béton préfabriqué et qui soit prêt à s'engager dans ces différentes aventures. Elles n'ont pas été de tout repos... En effet, la complexité et la multiplicité des pièces à réaliser ont été un défi. On peut ainsi citer la réalisation de plus de 3 000 panneaux différents pour le stade Jean Bouin, ou celle de 19 000 pièces avec une tolérance au millimètre pour la Fondation Louis Vuitton. »

En plus, de son savoir-faire en Travaux Publics, Bonna Sabla devient, avec ces prestigieuses réalisations, une référence dans le monde du bâtiment et se rapproche ainsi des activités des autres sociétés du groupe Consolis. Les résultats de cette prise de risque ont déjà porté leur fruit : Nicolas Yatzimirsky confirme qu'aujourd'hui Bonna Sabla est consulté régulièrement par des architectes et des entreprises pour réaliser des façades complexes.

Dans les années 70, s'appuyant sur sa maîtrise des techniques de préfabrication du béton, elle se diversifie et achète des entreprises qui lui permettent de pénétrer de nouveaux marchés (ferroviaire, environnement, traitement de l'eau...).

Simultanément, elle multiplie ses implantations dans le monde.

Le parcours de Sabla est tout aussi exemplaire. De 1920 à 1950, la Société Anonyme des chaux et ciments de Béon Lurieux se développe sur toute la France. Elle se diversifie dans la préfabrication de produits tels que les clôtures, les pavés, l'assainissement, ainsi que des produits pour le bâtiment. L'acronyme « Sabla » est adopté en 1942. La société s'installe à Lyon. Elle est cotée en bourse. La fabrication de la chaux est définitivement arrêtée.

Dans les années 70, face à la forte demande du marché du bâtiment, Sabla fabrique des planchers et des pré-dalles et installe, avec ses propres équipes, des stations d'épuration avant de se diversifier dans les produits de voirie.

UN RAPPROCHEMENT LOGIQUE

Une étape importante est franchie en 1998 lorsque, sous l'égide de la CGE, deux des acteurs de références du secteur que sont Bonna et Sabla se rapprochent pour aboutir, en 2001, à la fusion juridique sous la dénomination de Bonna Sabla SNC.

En 2002, dans le cadre d'un LBO, la CGE cède Bonna Sabla à une holding de reprise appartenant au fonds Axa Equity puis, en 2005, l'entreprise est rachetée par le fonds Industri Kapital qui constitue, avec le scandinave

Consolis Oy, le premier groupe européen de produits préfabriqués en béton sous le nom de Consolis.

Depuis 2007, LBO France est l'actionnaire majoritaire du Groupe Consolis. Ces dix dernières années, Bonna Sabla a élargi le champ de ses activités avec la reprise de plusieurs sociétés dans les secteurs de l'environnement, du funéraire, du bâtiment et de l'assainissement (MPB, Nomblot, La Nive, Francioli, Bih, Eurocase, Francecase).

DES RÉPONSES INNOVANTES

« Nous avons pris trois engagements, indique Nicolas Yatzimirsky, directeur général de Bonna Sabla : apporter un professionnalisme irréprochable, offrir des réponses innovantes et mettre à disposition des solutions pérennes ». Le développement de l'entreprise se

construit sur sa forte capacité à innover. Quelques exemples de réalisations récentes la mettent en lumière.

L'alliance inédite de l'excellence architecturale et de la prouesse technologique sont présentes dans la « passerelle des Anges », à Saint-Guilhem-Désert dans l'Hérault, signée Rudy et Romain Ricciotti. Avec une portée de 67,50 m pour une hauteur de 1,80 m, la passerelle construite sans appui intermédiaire a nécessité la fabrication de voussoirs en BFUHP (Ductal® de Lafarge). Ces pièces monolithiques sont réalisées à partir d'un seul et unique moule. Préfabriquées en usine, elles permettent un chantier court et simple dans des conditions de de travail et de sécurité améliorées, en respectant le site du Pont du Diable classé au patrimoine de l'Unesco. ▷



2



3



4



5

Pour cet ouvrage, le groupement d'entreprises Bonna Sabla/Freyssinet a réalisé une prouesse : un ouvrage post-contraint avec des tolérances de construction de l'ordre de 4/10^e de millimètre pour chaque pièce.

Inspirée des sanitaires réalisés pour Autoroutes du Sud de la France et conçue par le designer Patrick Meynier, la gamme de mobilier urbain Francioli « On the Road » utilise des bétons à forte valeur ajoutée.

Cette gamme, dont une belle mise en œuvre figure sur l'aire de Mornas dans le Vaucluse se compose de bancs, tables, mange-debout, cendriers, tabourets, bornes lumineuses et murs brise-vent.

Proposée en deux tons, elle fait appel au BFUHP (Ductal®) pour les pieds et les structures avec des assises en béton matricé couleur et aspect teck vieilli.

De résistance mécanique élevée, le BFUHP (Ductal®) permet d'obtenir de faibles épaisseurs et des formes géométriques complexes.

Quant au béton matricé, il est teinté dans la masse et reproduit l'aspect du bois tout en conservant les qualités propres à ce matériau, notamment résistance au feu et pérennité.

PRÉSERVER LA BIODIVERSITÉ

Le matériau béton s'inscrit parfaitement dans une démarche écologique qui prend en compte la réduction des consommations d'énergie et le bilan en carbone de la production.

Le processus de fabrication est peu consommateur d'énergie, le matériau est entièrement recyclable, pérenne et durable.

Les émissions liées au transport sont limitées car les usines doivent être proches des chantiers.

Chez Bonna Sabla, plusieurs solutions s'inscrivent dans cet engagement considéré, comme un principe fondateur, et qui contribue tant à la protection

2- La passerelle des Anges à Saint-Guilhem-le-Désert dans l'Hérault : 67,50 m de portée.

3- Artécadre® pour des ouvrages de transparence environnementale sur l'autoroute A89.

4- Dalle sur sommier pour franchissement des cours d'eau sans modification du lit à La Clusaz.

5- Capteco® : des cuves de stockage pour la récupération des eaux de pluie.

des hommes, des espaces et des habitats qu'à la préservation des faunes et la gestion des eaux pluviales :

→ Les ouvrages préfabriqués pour la réalisation de galeries souterraines et des trémies d'accès des gares de péage autoroutier ;

→ Les ouvrages hydrauliques équipés de passage de petite faune, positionnés afin que les espèces puissent circuler en période de crue, en cadres préfabriqués de 3 m x 3 m avec banquette monobloc, contribuant à préserver les zones humides ;

→ Les ouvrages de transparence hydrauliques assurant les continuités écologiques en cadres préfabriqués de 2,50 m x 2,25 m, avec double banquette monobloc ;

→ Les dalles sur sommier pour le franchissement des cours d'eau sans modification du lit, par exemple à La Clusaz ;

→ Les ouvrages Artécadre®, systèmes constructifs de transparence environnementale, préfabriqués en usine et prêts à poser pour les passages de grande faune, les rétablissements hydrauliques et les passages inférieurs, par exemple sur l'autoroute A89.

LE GROUPE CONSOLIS EN BREF

Présent dans une trentaine de pays, Consolis est un groupe industriel européen qui intervient dans les secteurs de la construction, des Travaux Publics et des infrastructures ferroviaires.

Spécialisé dans la conception d'ouvrages et de bâtiments hautes performances, Consolis emploie 10 500 personnes et a réalisé en 2012 un chiffre d'affaires de 1,3 milliards d'euros.



© BONNA SABLA

6



7



8

PRÉSERVER LES RESSOURCES EN EAU

En France, les réseaux de distribution d'eau potable (856 000 kilomètres) présentent des pertes par fuite de 25% en moyenne. L'objectif pour un réseau bien entretenu est d'atteindre un taux de fuite de 15%. Bonna Sabla intervient sur ce thème avec plusieurs maîtres d'ouvrage.

Rennes Métropole investit dans une nouvelle ligne de métro et construit 14 km en site propre, constituant une alternative à la voiture.

Pour répondre aux obligations du maître d'ouvrage pour les ouvrages de dévoiement - réseau d'assainissement durable, étanche et évolutif - Bonna Sabla répond à la problématique du maître d'œuvre de réaliser des travaux à grande profondeur dans la nappe phréatique, par des tuyaux en béton haute performance qui assurent l'étanchéité de l'ouvrage et sa pérennité. À Montpellier, le Conseil d'agglomération a lancé un plan climat territorial avec différentes parties prenantes. Dans le cadre de la construction de l'Éco-quartier « Pierres Vives », le Conseil général de l'Hérault construit, au titre des mesures compensatoires, 9 bassins de 260 à 1 000 m³ que

6- Des bassins enterrés sous les voies de circulation pour lutter contre les inondations : ÉcoQuartier à Montpellier.

7- Ouvrage hydraulique équipé de passage de petite faune : RD 113 à Pouzauges (Vendée).

8- Ouvrage équipé de passage de petite faune avec intégration paysagère, à Saint Hilaire du Harcouët (Orne).

le maître d'œuvre dimensionne afin de réduire les surcharges hydrauliques des réseaux et réguler les débits de rejet. Dans ce projet, les contraintes foncières et paysagères imposent des bassins enterrés sous espaces circulés. La réponse de Bonna Sabla, ce sont des cadres préfabriqués de 2,50 m x 2 m assemblés sur chantier, assurant une capacité totale de stockage de 5 630 m³ pour les 9 bassins, grâce à 1 214 m de galeries et 607 pièces assemblées.

Autre exemple de la préservation des ressources en eau : Estuaire de la Seine construit l'Éco-hameau de la commune de Sainneville, en Seine Maritime. Ce programme HQE de logements

sociaux, composé de 23 maisons, gère ses eaux à la parcelle.

La solution technique Bonna Sabla : les cuves Capteco® de 1 500 litres équipées de tube anti-turbulence et filtre auto-nettoyant.

Toujours dans le cadre de la préservation de la biodiversité et de la préservation des ressources en eau, une réalisation intéressante est donnée par la communauté de communes « Pays entre Loire et Rhône » (CoPLER) pour assurer la qualité des eaux de la commune de Neulise, dans la Loire et, particulièrement, de la ZAC des Jacquins : il s'agit de traiter, en plus des eaux usées domestiques (400 EH), des effluents industriels de fort débit avec des concentrations élevées en sodium et en graisses.

Le maître d'œuvre préconisait une filière « Plantés de Roseaux » de 500 EH. La réponse de Bonna Sabla consiste en des équipements pour une Step dont les rendements épura-toires sont conformes aux règles européennes avec une solution technique constituée d'appareils préfabriqués en béton et entièrement équipés et testés en usine - déversoir d'orage, chasse à eaux brutes, chasse à eaux claires - prêts à fonctionner.

BONNA SABLA : CHIFFRES-CLÉS 2013

CHIFFRE D'AFFAIRES : 250 millions d'euros

EFFECTIF : 1 650 personnes

USINES : 43 implantations en France dont 33 sites de production

CHIFFRE D'AFFAIRES DU GÉNIE HYDRAULIQUE (ASSAINISSEMENT ET GÉNIE CIVIL) : 130 millions d'euros

EFFECTIF : 900 personnes



© BONNA SABLÀ

9



© MARC MONTAGNON

10



© BONNA SABLÀ

11



© FRANCK DELETTANG

12

DES SOLUTIONS EN BFUHP

Le BFUHP est un béton innovant mis au point en France dans les années 90. Sans entrer dans le détail de sa composition (Béton Fibré + Ultra Hautes Performances), il faut rappeler que ce matériau tire ses performances très élevées d'une grande compacité de la matrice cimentaire qui permet une très haute résistance à la compression tandis que sa résistance à la traction est obtenue par l'ajout de fibres métalliques ou organiques. L'association de ces caractéristiques en fait un matériau étanche et durable, à la porosité quasiment nulle, demandant peu d'entretien et pérenne dans le temps.

Bonna Sabla s'est évidemment intéressé au BFUHP préfabriqué qui ouvre de nouvelles possibilités en rupture avec celles des matériaux traditionnels : durabilité du béton, résistance au feu, entretien facile, matière première locale, moindre consommation de matière et d'énergie que dans le béton classique. Trois réalisations de référence récentes, et largement médiatisées au moins pour deux d'entre elles, sont à mettre à son actif : le stade Jean Bouin et

9- Des appareils entièrement équipés pour une Step à filtres plantés de roseaux à Neulise (Loire).

10- Pour le siège de la fondation Louis Vuitton, à Paris, Bonna Sabla a fourni des panneaux d'habillage en BFUHP blanc.

11- La « dentelle » de couverture du stade Jean Bouin, à Paris.

12- Panneaux de façade et résilles du stade Jean Bouin, à Paris.

le bâtiment principal du MuCEM, tous deux conçus par l'architecte Rudy Ricciotti (voir son interview dans ce numéro) et la fondation Louis Vuitton. Pour cette dernière, Bonna Sabla a fourni des panneaux d'habillage en BFUHP blanc.

Pour le stade Jean Bouin, auquel est consacré un long article dans ce numéro, rappelons donc brièvement la fourniture des panneaux d'habillage de la toiture avec des inclusions de verre et celle des panneaux de façade en résille.

Le stade Jean Bouin est entièrement enveloppé d'une résille de 20 000 m² de BFUHP. C'est la première fois que ce matériau est mis en œuvre structurellement en quantité aussi importante. Pour le MuCEM (Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée), ce sont également des panneaux de résille, alliant finesse et résistance, qui habillent l'ouvrage d'une « dentelle » de béton. Les 15 000 m² du bâtiment principal, dit J4, sont constitués de 308 poteaux en 20 versions et



© BONNA SABELA
13



14



© BONNA SABELA
15



16



© BONNA SABELA
17

de 384 panneaux de résille en béton inspirée du moucharabieh, sa marque distinctive.

Bonna Sabla fait appel au BFUHP pour d'autres applications moins médiatiques, sans doute, mais qui présentent un intérêt lié directement au quotidien de leurs utilisateurs. Il faut citer à ce sujet les panneaux de façade étanches avec isolants incorporés de la crèche Budin, la marquise du Palais du Pharo, celle du multiplexe de Rodez, les 140 balcons monoblocs et ajourés de

la résidence Clary, des passerelles à Strasbourg et à Sermaise, les escaliers du siège de Lafarge à Londres...

GÉNIE CIVIL SPÉCIFIQUE : UN DÉVELOPPEMENT STRATÉGIQUE

Ces réalisations témoignent de la diversité des domaines de compétences qui sont désormais ceux de l'entreprise sans oublier les ouvrages d'art qui nous ramènent au Génie Civil proprement dit. En développement constant, il s'agit

d'une activité stratégique pour l'entreprise innovante qui offre une alternative au coulé en place et aux autres matériaux.

Pour ce secteur, Bonna Sabla offre des solutions visant une économie globale proposée aux entreprises, avec des prestations d'études intégrées, uniques chez un industriel et de nombreuses références de solutions sur mesure : 651 dalles de 36 tonnes unitaires pour le viaduc autoroutier de la Côtière dans l'Ain, estacade de la Folie à poutres préfabriquées sur la LGV Sud Europe Atlantique, caniveaux, regards et murs de soutènement pour le tunnel de la Croix Rousse à Lyon, passages inférieurs, dalles de pont mixte, murs d'entonnement, sauts de mouton pour la LGV Bretagne Pays de Loire...

Riche de son expérience centenaire, l'entreprise diversifie depuis trois ans son portefeuille d'activités par une puissante dynamique industrielle et commerciale.

Partenaire des acteurs majeurs du BTP en France, elle crée des solutions techniques innovantes qui contribuent à la réalisation de projets de référence. □

13- Panneaux de résilles du MuCEM, à Marseille.

14- Le MuCEM à Marseille : des panneaux alliant finesse et résistance.

15- L'escalier du siège de Lafarge Cement, à Birmingham : 70 marches, 3 paliers.

16- Résidence de logements Clary : 140 balcons monoblocs et ajourés en BFUHP.

17- Des solutions sur mesure : les écrans acoustiques.



STADES

1- Le « galet lumineux » attire les supporters du LOSC pour le match de Ligue des Champions contre le FC Bate Borisov, le 19 Septembre 2013.

1- The "luminous pebble" attracts LOSC fans for the Champions League match against FC Bate Borisov, on 19 September 2013.

© ELISA - VALODE ET
PISTRE ARCHITECTES -
ATELIER FERRET
ARCHITECTURE -
MAX LEROUGE

LE STADE PIERRE MAUROY : UN STADE URBAIN MULTIFONCTIONNEL

AUTEURS : JEAN-CLAUDE MUTEL, DIRECTEUR GRANDS PROJETS, EIFFAGE - DENIS VALODE ET PIERRE FERRET, ARCHITECTES

LE 17 AOÛT 2012, LE PREMIER DES NOUVEAUX STADES QUI ACCUEILLERONT L'EURO 2016 ÉTAIT MIS EN SERVICE. CET OUVRAGE REGORGE DE DÉFIS : IL PEUT ÊTRE COUVERT EN MOINS DE 30 MINUTES, LA MOITIE DE SA PELOUSE SE DÉPLACE POUR CRÉER UNE ARÉNA DE 28 000 PLACES. ET L'ENSEMBLE A ÉTÉ CONÇU ET RÉALISÉ EN MOINS DE 5 ANS PAR UNE ÉQUIPE MOBILISÉE PAR EIFFAGE AUTOUR DES DEUX ARCHITECTES DENIS VALODE ET PIERRE FERRET.



2 © ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE



3 © ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - FRANCIS BOCCUET

UN PROJET COMPLEXE, UNE AVENTURE D'ÉQUIPE

Le projet d'Eiffage, associé aux agences d'architecture françaises Valode et Pistre Architectes et l'Atelier Ferret Architecture, d'un stade emblématique de 50 000 places a été retenu par Lille Métropole dans le cadre d'un contrat de 31 ans en PPP signé le 15 octobre 2008 (figure 1).

Allant au-delà du cahier des charges de la consultation, le projet propose un équipement multifonctionnel avec deux caractéristiques innovantes : d'une part la toiture mobile, permettant la fermeture complète du stade en une demi-heure et d'autre part le plateau mobile transformant en moins de 20 heures l'enceinte de grand jeu en une aréna de

2- Image architecturale jointe à l'offre finale du 21 décembre 2007.

3- Vue aérienne de l'ouvrage terminé 11 septembre 2012.

2- Architectural picture attached with the final tender on 21 December 2007.

3- Aerial view of the completed structure on 11 September 2012.

30 000 places, la plus grande en France. Toutes les branches d'Eiffage ont été mobilisées dans l'équipe de conception réalisation avec les architectes pour imaginer et réaliser cet équipement hors normes, offrant pour son exploitation et son rayonnement une palette de possibilités très étendue, allant bien entendu du football et du rugby aux sports en salle, aux compétitions de natation ou sports de glace, aux concerts de tous types, tout cela en faisant le choix de l'excellence dans tous ces domaines. Ces choix multiples conduisent à une opération complexe, associant les techniques des grands ouvrages d'art à celles de la mécanique et de la manutention lourde, à celles du bâtiment, de la gestion informatisée des installations

et des nouvelles technologies de l'information et de la communication, dans le plus grand respect de l'environnement. Des équipes pluridisciplinaires intégrées ont été réunies sur le site pour ce faire. Elles ont toujours travaillé ensemble, trouvant les voies et les moyens pour apporter les solutions concourant à la réussite finale.

Pour s'en convaincre, la comparaison des documents de la vision initiale des concepteurs (figure 2) à l'ouvrage réalisé (figure 3) montre que le pari a été gagné.

Cette opération importante, en milieu urbain contraignant, se devait d'apporter le moins de perturbations possible au voisinage et donc aussi d'informer et de communiquer avec celui-ci. ▶



4

Pour cela, outre les réunions régulières d'information et de suivi tenues avec les parties intéressées, un pavillon d'accueil sur place a été ouvert au public pendant toute la durée des travaux. Plus de 80 000 visiteurs, grands et petits, ont pu suivre l'avancement du projet, avec visite et explications. Au final cet objectif de permettre l'appropriation du projet par le public a été tenu. Merci donc à tous ceux qui y ont contribué en s'associant à cette opération et en particulier au plus de 6 600 femmes et hommes qui sont intervenus directement sur le site et à ceux tout aussi nombreux, qui ont œuvré dans les ateliers, bureaux et services extérieurs, sans qu'aucun accident grave ne soit à déplorer. Ainsi, après différents décalages du planning, dus aux délais accrus d'obtention des autorisations administratives, aux suspensions et arrêts suite aux recours contre le projet et après 28 ½ mois de construction, le stade Pierre Mauroy a été livré le 17 août 2012 et le LOSC y a joué son premier match de Ligue 1 à Lille, dans un stade comble.

PORTRAIT INÉDIT D'UN STADE AVANT-GARDISTE : URBANISME - DESIGN - MULTIFONCTION

L'architecture du stade Pierre Mauroy se situe au carrefour de préoccupations multiples :

- Urbaines (le stade est le germe d'un nouveau quartier de Lille Métropole)
- Programmatiques (plus qu'un stade multisports c'est une salle totalement polyvalente) ;
- Spatiales (le stade est compact et convivial malgré sa capacité de plus de 50 000 places) ;
- Esthétiques (son design symbolise l'innovation qui le caractérise, et en fait un emblème de la communauté urbaine lilloise) ;
- Constructives (ses structures mobiles - toitures - pelouses et la conception de son enveloppe sont de véritables défis technologiques).

UN STADE URBAIN

Le projet du stade Pierre Mauroy s'inscrit dans la politique architecturale et urbaine menée par Lille Métropole



5

© ELISA - VALOÏE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRIER ARCHITECTURE - MAX LEROUX

4- Une façade urbaine : plus de 2 000 m² de façade animée par des barrettes de LEDs.

5- Un stade urbain qui rayonne à l'échelle de toute la métropole.

4- An urban facade: more than 2,000 m² of facade animated by LED arrays.

5- An urban stadium which radiates on the scale of the whole metropolis.

depuis plusieurs années et qui a fait émerger de nouveaux quartiers d'une très grande qualité comme Euraille. Le stade est situé dans le quartier de la Borne de l'Espoir, territoire à cheval sur les communes de Villeneuve d'Ascq et de Lezennes, à une dizaine de kilomètres du centre de Lille.

LA FAÇADE NORD PENSÉE COMME CELLE D'UN IMMEUBLE SUR RUE

Le premier enjeu était que le nouveau stade trouve sa place dans ce site en cours d'urbanisation. Il devait en être l'élément essentiel et rayonner à l'échelle de toute la métropole (figure 5). La parcelle est triangulaire. Elle est longée par le boulevard de Tournai au nord, et le boulevard du Breucq à l'est. La première étape de notre travail a consisté à implanter le stade

au nord-ouest de ce triangle. Un grand parvis est ainsi dégagé sur les trois autres faces de l'édifice. Cet espace annulaire a pour vocation de devenir la place centrale du nouveau quartier qui se développe autour du stade.

Une façade urbaine, plane et alignée sur le boulevard de Tournai, coupe la forme ovoïde du bâtiment. La façade et son emmarchement constituent un événement sur ce boulevard, une entrée lisible qui permet d'orienter le spectateur et affirme la vocation multifonctionnelle du stade (figure 4).

La nuit elle devient un écran lumineux interactif, vitrine du stade sur la ville.

6- Tel un filtre, l'enveloppe laisse deviner les circulations intérieures.

7- Une lanterne magique.

6- Like a filter, the shell suggests the presence of interior passageways.

7- A magic lantern.



© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - MAX LEROUGE

UN STADE SANS CLÔTURES - ENCEINTE DU STADE ET CONTRÔLE D'ACCÈS AU DROIT DE LA FAÇADE

Un stade est généralement entouré d'une enceinte fermée, permettant le contrôle d'accès. La plupart des stades sont conçus au sein d'un périmètre clos qui condamne ses abords pendant et en dehors des matchs.

Nous avons donc imaginé un stade dont l'enceinte est intégrée dans sa façade. Pendant ou en dehors des matchs, que l'on ait un billet ou pas, on peut déambuler autour de ce bâtiment dont la vocation est de générer des rêves et de l'émotion ; on aperçoit d'ailleurs derrière son enveloppe, la pelouse qui apparaît à travers les accès aux gradins de la volée basse. Le parvis remplit ainsi son rôle de place urbaine permanente.

UNE PRÉSENCE URBAINE DÉLICATE ET SANS MONUMENTALITÉ

Le gigantisme d'un équipement comme un stade engendre très facilement une certaine monumentalité (la pelouse d'un stade fait déjà à elle seule 1 ha). L'intégration du stade au cœur d'un futur tissu urbain nécessitait un travail sur l'échelle du bâtiment. ▶



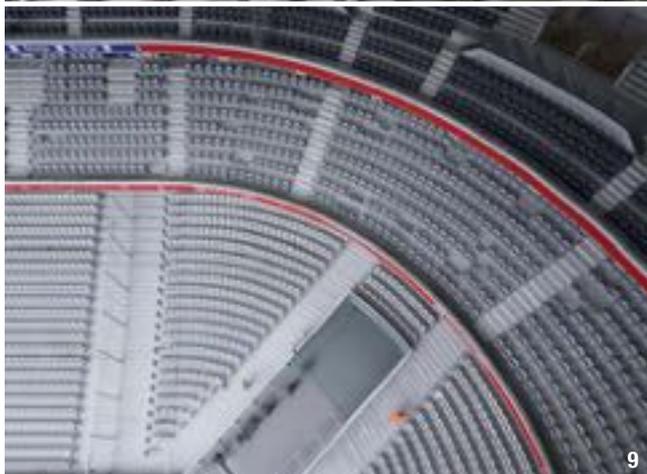
© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - JULIEN LANOÛ

7

© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - HERVÉ LEFEBVRE



8



9

© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - JULIEN LANOÛ



9

10

© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - MAX LEROUQUE

Nous avons donc encastré dans le sol la première volée des gradins. La hauteur du bâtiment est ainsi réduite à 38 m.

L'enfouissement du niveau 0 (niveau pelouse), qui regroupe tous les espaces non accessibles au public (vestiaires, stockages, voie de desserte interne, locaux techniques et de sécurité, locaux media...) libère le niveau du sol qui devient un immense déambulateur annulaire, espace de transition visuellement ouvert à la fois sur l'espace public et la pelouse.

UN DESIGN ÉLÉGANT ET EMBLÉMATIQUE

FORME - ARÈNE

Le dessin de l'arène est la traduction architecturale d'une série d'objectifs essentiels :

- Une visibilité optimale pour tous les spectateurs ;
- Une proximité maximum du spectacle pour chacun ;
- Une forte ambiance à l'intérieur du stade ;
- Une fonctionnalité efficace dans une sécurité absolue.

La compacité du bâtiment issue essentiellement d'un travail d'optimisation des courbes de visibilité assure au spectateur d'être toujours à moins de 140 m du point le plus éloigné du terrain (190 m autorisés dans la réglementation).

L'arène est ovoïde. Elle est composée d'une volée basse grand public accessible depuis le niveau du parvis du stade, d'un balcon VIP et business avec salons et loges attenantes accessibles depuis le déambulateur du niveau 1 et d'une volée haute grand public accessible depuis le déambulateur du niveau 2. Le forme arrondie, continue, resserrée et enveloppante autour du terrain génère un haut niveau d'ambiance et de convivialité dans le stade.

ENVELOPPE - FAÇADE

Les enceintes sportives sont des équipements publics très populaires et médiatiques, à ce titre ils deviennent les emblèmes des métropoles. Le stade Pierre Mauroy sera également un lieu à vocation culturelle. Nous avons donc développé une forme lisible et mémorable, qui symbolise le regroupement

8- Détails des structures supportant les tubes polycarbonate.

9- Les sièges présentent un dégradé de gris, mettant en évidence la pelouse.

10- La grande dimension de la signalétique facilite le repérage du piéton dès son arrivée sur le parvis.

8- Details of the structures carrying the polycarbonate tubes.

9- The seats are grey-shaded, highlighting the field.

10- The large signage makes it easier for pedestrians to find their way as soon as they arrive on the square.

des spectateurs autour d'un spectacle. C'est une vaste enveloppe ovoïde dont la peau transparente interagit avec la lumière du jour et la lumière artificielle. Cette enveloppe curviligne a nécessité une mise au point géométrique et technique complexe. Elle fonctionne comme un filtre qui laisse plus ou moins pénétrer le regard (figure 6). Elle est constituée de 32 km de tubes creux en polycarbonate extrudé. Ils ont un diamètre de 21 cm et sont assemblés par des pièces en aluminium moulées thermolaquées. L'écartement des tubes de 21 cm en partie basse augmente lentement au fur et à mesure de l'élévation de la façade. Ce système offre une façade en mouvement constant selon l'angle de vue. Sa tonalité évolue au cours de la journée et selon les saisons. Le jour, la translucidité et la réflexion des tubes en polycarbonate harmonisent le bâtiment avec le ciel et l'environnement et le transforme en un immense galet poli. La nuit, sa présence est révélée par la diffraction de la lumière dans les tubes, le stade apparaît alors comme une grande lanterne magique (figure 7).



11

© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - MAX LEROUGE

STRUCTURE DE L'ENVELOPPE

L'enveloppe du stade repose sur une succession de grands arcs élanés en acier qui rythment le déplacement des spectateurs dans le grand déambulateur. Les couleurs de ces structures (différents niveaux de gris) mettent en valeur les tubes de l'enveloppe (figure 8). Seule exception, les « méga lettres » de la signalétique, qui reprennent le code couleur choisi (cercle chromatique) pour l'ensemble du bâtiment (figure 10). En dehors de la signalétique, la seule couleur marquante dans le stade est donc celle de la pelouse (figure 9).

11- Match inaugural le 17 Août 2012, LOSC - Nancy, 1-1.
12- Premier concert en mode Arena, Rihanna le 20 Juillet 2013.

11- Inaugural match on 17 August 2012, LOSC vs Nancy, 1-1.
12- First concert in arena mode, Rihanna on 20 July 2013.

UN STADE MULTIFONCTIONNEL

Pour rentabiliser son exploitation, un stade doit aujourd'hui être utilisé en dehors des 25 matchs de football annuels (figure 11), pour d'autres compétitions sportives, ou des spectacles à grande échelle. Il ne suffit pas d'installer une scène de concert ou un terrain de tennis de Coupe Davis sur la pelouse d'un stade, car le spectateur est trop loin de l'action. Il fallait inventer un nouveau modèle architectural, qui permette une multifonctionnalité réelle et qualitative.

L'enjeu était de concevoir un dispositif spatial dans lequel le spectateur se sente aussi bien pour regarder un match de football, de basket, un concert, un opéra de Bizet, ou encore une chorégraphie d'Angelin Preljocaj (figure 12). Le projet met ainsi en œuvre, avec un grand réalisme technique et économique, trois objectifs ambitieux :

- 1-** La couverture de la totalité de l'arène, gradins et pelouse,
- 2-** La protection de la pelouse,
- 3-** La proximité immédiate du public avec le spectacle dans toutes les configurations.

PRÉCURSEUR - UN STADE QUI FAIT JURISPRUDENCE

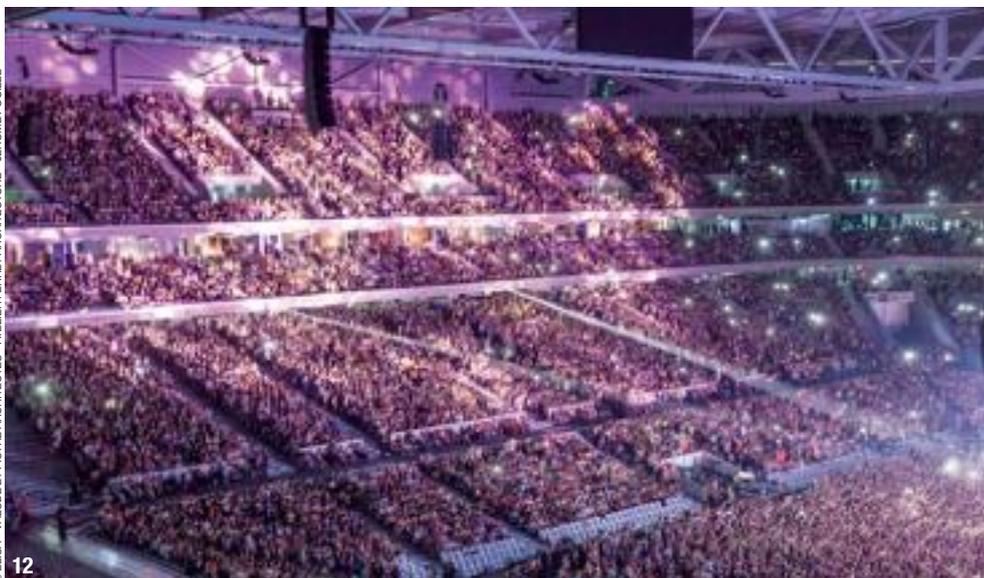
Même en terme de sécurité incendie, ce projet a impliqué de repenser et d'adapter la réglementation en vigueur qui ne prévoyait pas la possibilité de réaliser un bâtiment qui soit à la fois un stade et une salle de spectacle. De cette réflexion est née une nouvelle réglementation, régissant les Grands Établissements à Exploitation Multiple. Le stade Pierre Mauroy fait jurisprudence.

LA TOITURE MOBILE

La toiture mobile, d'une grande technicité, est un élément essentiel du design du bâtiment. Elle s'ouvre dans le sens longitudinal en deux moitiés. Chaque moitié est composée de deux « toitures gigognes » qui se rangent l'une sur l'autre en position ouverte. ▷

12

© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - JÉRÔME POUILLE

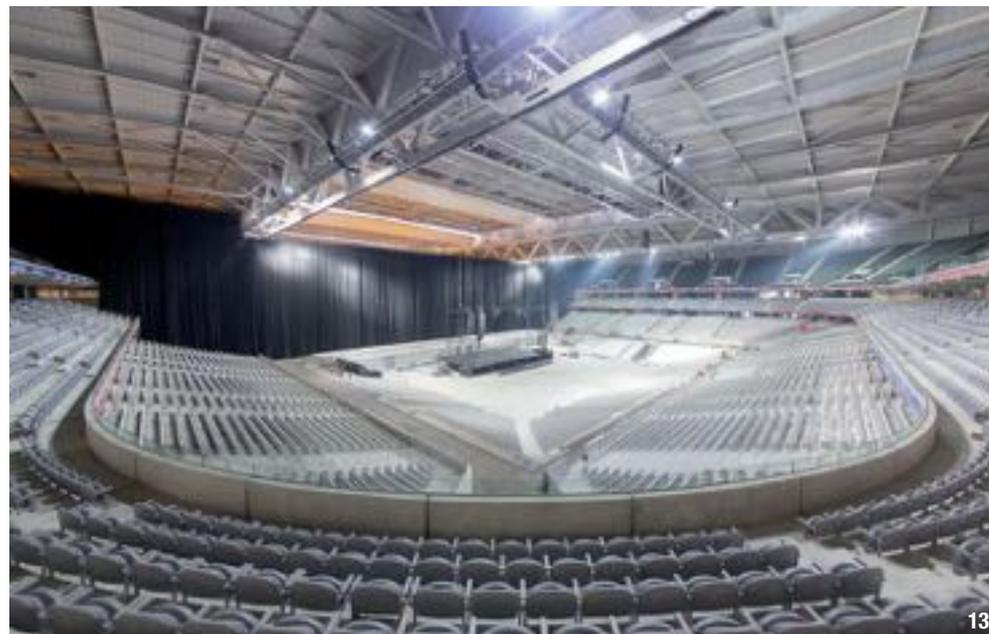


Elles viennent alors chapeauter la silhouette du bâtiment et participent ainsi à la physionomie emblématique du stade. Les quatre parties de la toiture mobile coulisent sur deux mégapoutres, en forme de fuseau, qui surplombent les grands côtés de la pelouse. Ces puissantes poutres en acier, très dessinées et présentes, sont un hommage à la tradition sidérurgique régionale. Ce dispositif gigogne est une première mondiale, les couvertures mobiles existantes étant conçues jusqu'à ce jour en deux moitiés composées chacune d'une seule toiture. Ainsi, en position ouverte la toiture du stade reste dans l'épure volumétrique de l'ensemble. Le revêtement parfaitement lisse de la toiture mobile, en membrane PVC, propose une enveloppe épurée. La composition de la toiture a été pensée pour être acoustiquement très performante. Le temps de réverbération moyen (entre 2 et 3 secondes) ainsi atteint malgré les dimensions de l'édifice permet d'organiser des spectacles de qualité.

UNE INNOVATION ARCHITECTURALE MAJEURE - « LA BOÎTE À SPECTACLES »

L'invention de la boîte à spectacles est la réponse architecturale à deux objectifs :

- 1- Protéger la pelouse, mais sans sortir l'intégralité de celle-ci sur le parvis comme cela existe ailleurs ;



13

© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - MAX LEROUGE

- 2- Situer le spectateur au plus proche de l'action dans toutes les configurations. Faire coulisser la totalité de la pelouse à l'extérieur du stade aurait neutralisé le parvis public pendant toutes les exploitations du stade autre que le foot et le rugby et condamné sa vocation urbaine.

Nous avons imaginé de nicher une arène de 7 000 places supplémentaires sous la moitié nord de la pelouse (figure 13). Elle est constituée de quatre

13- Vue d'ensemble de l'Arena.

14- Le plateau mobile en phase de translation.

13- General view of the Arena.

14- The moving platform in the translation phase.

tribunes télescopiques qui peuvent être en totalité ou en partie déployées dans l'exacte continuité de la volée basse. La moitié nord de la pelouse se soulève par des vérins sur 6 m de haut puis coulisce par un système de rails sur la moitié sud de la pelouse (figure 14). Ainsi l'ensemble des éléments mobiles reste confiné dans l'enceinte du stade. De la même manière que dans les théâtres, un rideau en velours noir fixé sur des « patiences » (poutres mobiles)



14

© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - MAX LEROUGE

est hissé par câbles jusqu'à la toiture. Il se déploie dans l'axe transversal du terrain, isolant la partie sud du stade non utilisée de la partie nord qui constitue à présent une aréna ou un zénith de 30 000 places. La surface du plateau d'évolution lorsque les quatre tribunes télescopiques sont déployées est légèrement supérieure à celle d'un terrain de handball (le plus grand terrain de tous les sports collectifs de salle). On peut aussi bien imaginer jouer au tennis, au basket, au volleyball, ou au handball, organiser un championnat de natation, de patinage artistique, de gymnastique ou d'escrime. En configuration spectacle, la tribune télescopique dos au rideau n'est pas déployée, et une scène de 40x20 m peut y être installée. Cette innovation architecturale majeure, inédite dans l'histoire de la conception des stades et des salles de spectacles engendre réellement un renouvellement

de l'usage du stade. Le stade Pierre Mauroy, c'est donc trois bâtiments en un : un stade, une aréna, un zénith. Dans les trois configurations, la proximité indispensable à la naissance de l'intimité et de la convivialité entre « le spectateur » et « l'acteur » est optimale. Ce n'est finalement plus un stade de foot dans lequel on fait des spectacles mais une salle de spectacles dans laquelle on joue au football, sport qui, comme beaucoup d'autres, est devenu un véritable spectacle (figure 15). □

15- Concert de Rihanna, 20 juillet 2013.

15- Concert by Rihanna, 20 July 2013.



© ELISA - VALODE ET PISTRE ARCHITECTES - ATELIER FERRET ARCHITECTURE - JÉRÔME POUILLE

15

PRINCIPALES QUANTITÉS

CAPACITÉ EN MODE FOOTBALL - RUGBY :

50 184 places

CAPACITÉ EN MODE SPORT INDOOR (BASKET - HAND) :

30 000 places

CAPACITÉ EN MODE CONCERT :

- 56 000 places en configuration stade

- 28 000 places en configuration aréna

CAPACITÉ DE STATIONNEMENT SUR SITE :

3 500 voitures, 21 bus, 500 motos, 1 200 vélos

SURFACE TOTALE DES PLANCHERS :

250 000 m² y compris parkings

SURFACE UTILE DU STADE : 56 000 m²

BÉTONS DE STRUCTURE : 100 000 m³

CHARPENTES MÉTALLIQUES : 10 500 t

TUBES POLYCARBONATE : 32 km

COÛT TOTAL DE CONSTRUCTION : 324 M €

PRINCIPAUX INTERVENANTS

COLLECTIVITÉ PUBLIQUE PARTENAIRE :

LMCU Lille Métropole Communauté Urbaine

PARTENAIRE PRIVÉ MAÎTRE D'OUVRAGE :

ELISA Eiffage Lille Stadium Arena

GROUPEMENT CONCEPTEUR - CONSTRUCTEUR :

Eiffage TP - Eiffage Construction Métallique - Eiffage Energie -

Valode et Pistre Architectes - Atelier Ferret Architecture

BUREAU DE CONTRÔLE : Socotec

COORDINATION SSI : Casso

MAÎTRISES D'ŒUVRE TECHNIQUES :

Egis Batiment Nord (Structure béton - Plomberie - Ascenseurs -

Synthèse fluides) - Arcora (Conception charpente métallique) - Berim

(VRD) - Osmose Ingénierie (Aire de jeu) - Ateim (Mécanismes du plateau)

CONTRÔLE EXTÉRIEUR DES ÉTUDES DE STRUCTURE : Seco

CONTRÔLE EXTÉRIEUR PROCÉDURES ENVIRONNEMENT : Kalies

ABSTRACT

PIERRE MAUROY STADIUM: A MULTI-PURPOSE URBAN STADIUM

JEAN-CLAUDE MUTEL, EIFFAGE - DENIS VALODE ET PIERRE FERRET, ARCHITECTES

The Pierre Mauroy Stadium was designed and built in less than five years by a team deployed by Eiffage around its two architects, Denis Valode and Pierre Ferret. This stadium adds to the town of Villeneuve d'Ascq by contributing a new public space, surrounding an emblematic, federating landmark: the luminous pebble. The stadium is designed to host numerous forms of live entertainment. It has a moving roof, and its field moves to make way for an arena. This innovative structure also provided an opportunity to validate new public safety regulations with the first-aid services. □

EL ESTADIO PIERRE MAUROY: UN ESTADIO URBANO MULTIFUNCIONAL

JEAN-CLAUDE MUTEL, EIFFAGE - DENIS VALODE ET PIERRE FERRET, ARCHITECTES

El estadio Pierre Mauroy fue diseñado y construido en menos de 5 años por un equipo movilizado por Eiffage en torno a sus dos arquitectos Denis Valode y Pierre Ferret. Este estadio completa la ciudad de Villeneuve d'Ascq aportando un nuevo lugar público, que rodea un elemento emblemático y unificador: el canto rodado luminoso. Por otra parte, este estadio ha sido diseñado para acoger múltiples formas de espectáculos en vivo: está provisto de un techo móvil y su césped se desplaza para dejar espacio a una Arena. Esta obra innovadora también ha permitido validar una nueva normativa para la seguridad del público con los servicios de emergencia. □

STADE PIERRE MAUROY À LILLE

STRUCTURES DE GÉNIE CIVIL

AUTEUR : ÉVELYNE OSMANI, DIRECTEUR DU BUREAU D'ÉTUDES STRUCTURES D'EIFPAGE CONSTRUCTION

IMPLANTÉ AU CŒUR D'UN SITE URBAIN, LE STADE PIERRE MAUROY À LILLE EST UN ÉQUIPEMENT MULTIFONCTIONNEL POUVANT ACCUEILLIR JUSQU'À 50 000 SPECTATEURS. LA GRANDE MODULARITÉ ARCHITECTURALE DE L'ÉQUIPEMENT PERMETTRA D'ORGANISER ALTERNATIVEMENT DE GRANDES COMPÉTITIONS SPORTIVES EN CONFIGURATION STADE, DE GRANDS CONCERTS EN CONFIGURATION ARÉNA ET DES SÉMINAIRES D'ENTREPRISES EN CONFIGURATION SALLE DE CONGRÈS. LES STRUCTURES DE GÉNIE CIVIL ONT ÉTÉ CONÇUES ET DIMENSIONNÉES POUR SATISFAIRE TOUTES CES CONTRAINTES.

LE PROJET

Le stade Pierre Mauroy est formé d'une enveloppe en charpente métallique, d'une toiture comportant des parties mobiles roulant sur des mégapoutres métalliques simplement appuyées à leurs extrémités sur 4 mégapoteaux en béton armé insérés dans les structures de génie civil des tribunes et des locaux connexes (figure 1).

LES ESPACES UTILISÉS

Les espaces utilisés du Stade Pierre Mauroy comprennent :

→ Les zones de gradins et de loges

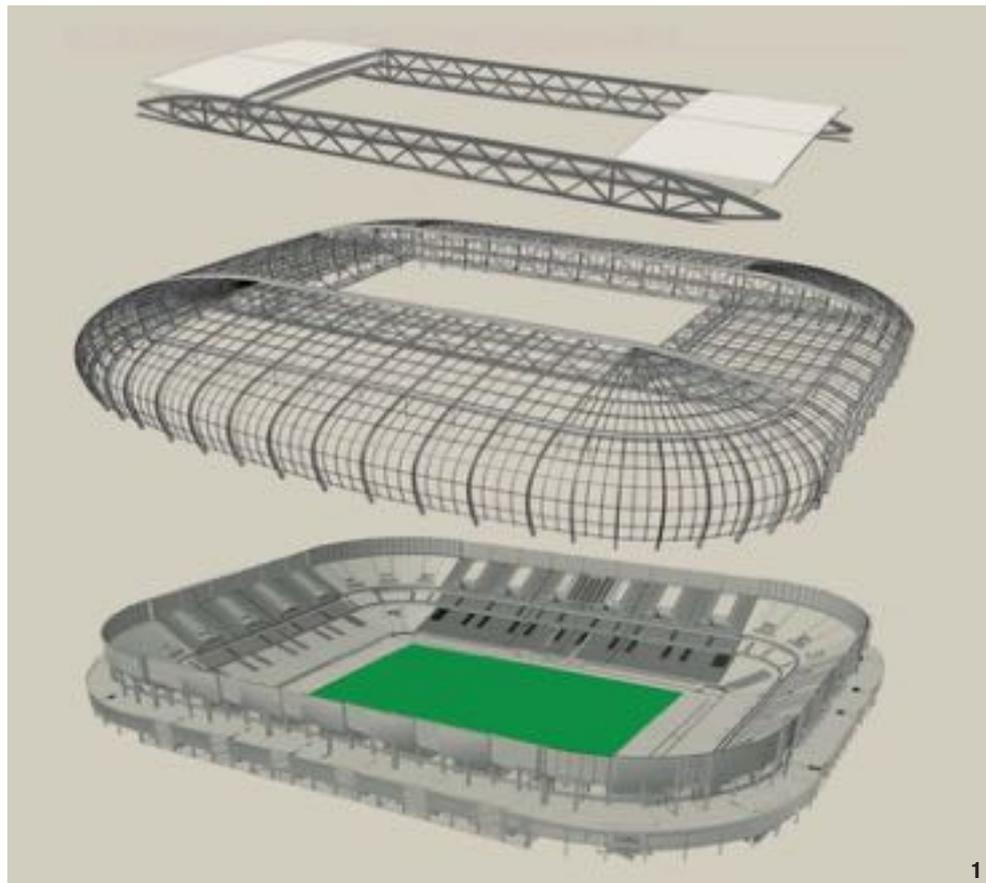
Les zones de gradins sont réparties sur 3 niveaux, de la pelouse pour la tribune basse jusqu'au niveau de la toiture pour la partie supérieure de la tribune haute. Les loges et les espaces VIP occupent la tribune intermédiaire.

→ Des parties communes nobles

Les parties communes nobles sont réparties sur 3 niveaux et regroupent les déambulateurs, les buvettes, les sanitaires sur tous les niveaux, les salons VIP et un restaurant au niveau intermédiaire, les salles de presse au niveau haut et un auditorium au sous-sol.

→ Des zones de service et des zones techniques

Les zones de service et les zones techniques occupent le sous-sol du stade au niveau de la pelouse et regroupent la voie de desserte intérieure accessible aux poids lourds, les vestiaires des joueurs, les locaux du personnel du stade et les divers locaux techniques. Le stade Pierre Mauroy comporte ainsi



au total 4 niveaux : infrastructure, niveau 0 - parvis et accès aux tribunes basses, niveau 1 - loges et niveau 2 - accès aux tribunes hautes (figure 2). L'ensemble est constitué d'une structure en béton armé, localement précontraint.

1- Éclaté du stade Pierre Mauroy.

1- Exploded view of Pierre Mauroy Stadium.

Cette structure est formée de 96 portiques dont 12 doubles aux joints de dilatation.

Ces portiques supportent les planchers courants et se transforment en crémaillères pour porter les gradins. Les cages d'ascenseurs sont formées

de noyaux en béton, les escaliers publics sont ouverts sur les déambulateurs.

PRINCIPE DE STABILITÉ GÉNÉRALE

La construction comprend 12 blocs indépendants (figure 3).

Les 8 blocs droits sont contreventés :
→ Longitudinalement par des murs et des noyaux ;

→ Transversalement par 48 portiques dont 8 doubles sur JD.

Les 4 blocs d'angle sont contreventés par des portiques dans les deux directions, des voiles et des noyaux.

Les efforts de vent appliqués à la charpente et à la toiture sont ramenés essentiellement par 4 palées de contreventement sur les blocs centraux nord, sud, est et ouest puis redistribués entre



2 © ELISA / VALODE & PISTRE ARCHITECTES / ATELIER FERRET ARCHITECTURES / MAX LEROUGE

les structures de ces blocs par l'intermédiaire des planchers et des gradins formant diaphragmes (figure 4).

De même, les efforts de vent appliqués directement à la façade et sur les gra-

2- Repérage des différents niveaux du projet.

3- Repérage des 12 blocs de la structure.

4- Contreventement de la charpente et efforts transmis aux structures de génie civil.

5- Profil géotechnique du site du stade Pierre Mauroy.

2- Identification of the various project levels.

3- Identification of the 12 blocks of the structure.

4- Wind bracing for the frame and forces transmitted to the civil engineering structures.

5- Geotechnical profile of the site of Pierre Mauroy Stadium.

dins ainsi que la poussée dissymétrique des terres appliquée sur la hauteur de 6 m du sous-sol sont également redistribués par les planchers et les gradins. Ils sont ensuite redescendus jusqu'aux fondations par les éléments de contreventement : les portiques à la trame de 6,72 m et quelques voiles complémentaires.

Les efforts de vent ont été extraits des résultats des essais en soufflerie sur maquette.

Les variations dimensionnelles de la toiture sont gérées à partir d'un point fixe situé au centre de chaque face et d'appuis libres à chaque extrémité des mégapoutres, grâce à l'utilisation d'appareils d'appuis conçus pour ne pas transférer d'efforts horizontaux aux mégapoteaux.

LE SOL - LES FONDATIONS

Le terrain est constitué essentiellement de remblais, évacués et réutilisés sous formes de remblais paysagés, assis sur de la craie présentant des zones d'exploitations de carrières et des zones de catiches exploitées sauvagement (figure 5).

Les carrières et catiches ont été comblées gravitairement.

Le comblement des carrières a nécessité la réalisation de 3 035 forages et 900 inspections par caméra.

Le remplissage a été réalisé à l'aide de coulis à base de limon (3 950 m³) (figure 6) et de coulis à base de cendres (63 250 m³) (figure 7).

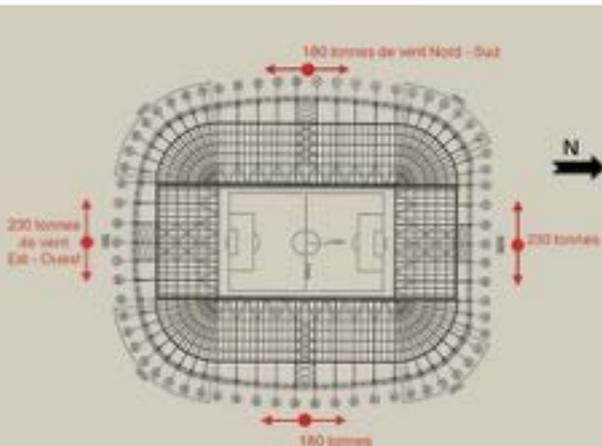
Les fondations sont des pieux injectés basse pression type Starsol fichés dans la craie marseuse ou dans les marnes (figure 8).

Ils sont de diamètres 52 cm, 62 cm, 72 cm et 92 cm et au nombre de 1 796 pour l'ensemble du projet (stade, ▷

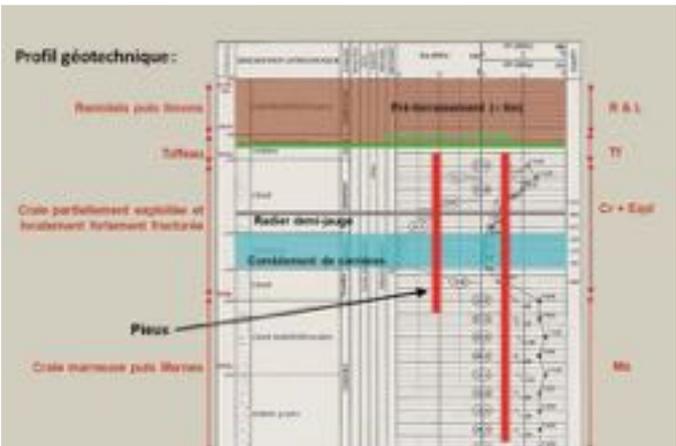
REPÉRAGE DES 12 BLOCS DE LA STRUCTURE



3



4



5



© PHOTO THÉQUE EIFFAGE TP

6- Remplissage gravitaire des carrières à l'aide d'un coulis de limons.

7- Remplissage gravitaire des carrières à l'aide d'un coulis de cendres.

8- Foreuse pour pieux injectés basse pression et cage d'armatures.

9- Vision d'ensemble des gradins.

6- Gravity filling of quarries with a silt grout.

7- Gravity filling of quarries with an ash grout.

8- Driller for low-pressure injection-moulded piles and concrete reinforcing cage.

9- Overall view of the terraces.

parking attenant au stade et parking silo hors emprise du stade).

La longueur des pieux courants varie de 11 à 20 mètres en fonction de la charge.

Ils sont calculés et ferrailés en fonction des efforts horizontaux ramenés par les éléments de contreventement éventuellement redistribués à l'aide de longrines et de dalles portées.

Les pieux sont armés au minimum jusqu'à la base des carrières

Les charges des mégapoteaux sont reprises par des groupes de 8 pieux Ø92 cm de 23 m de longueur pour chaque mégapoteau.

LES GRADINS

Les éléments de gradins préfabriqués sont solidarisés mécaniquement entre eux et aux crémaillères pour former diaphragme (figure 9).

L'ensemble des tribunes est constitué 18 familles types de gradins représentant 2 524 éléments et 11 575 m.

Le nombre d'éléments a été réduit en préfabriquant sur un même élément 2 rangées de gradins (figure 10).

Ils sont solidarisés aux crémaillères par tiges filetées M14 et des boîtes de liaison. Ils sont solidarisés entre eux par douilles incorporées à la pré-

fabrication et boulons scellés à la mise en œuvre.

Les boulons et tiges filetées sont dimensionnés pour assurer le passage des efforts de membrane et l'ensemble est conçu pour éviter la mise en résonance des gradins sous effet de foule (match de foot, concert de rock...).

LES PORTIQUES

La préfabrication a été privilégiée pour les éléments « horizontaux » des portiques (poutres, crémaillères basses et intermédiaires) en raison des contraintes de planning (GO 18 mois / TCE 30 mois) (figure 11).



© PHOTO THÉQUE EIFFAGE TP

10- Élément préfabriqué de gradins de la tribune basse.

11- Schéma de principe de la préfabrication des crémaillères intermédiaires.

12- Détail de ferrailage d'un élément préfabriqué constituant une crémaillère intermédiaire.

13- Vue d'ensemble des crémaillères intermédiaires réalisées avec leur étaie de sécurité.

14- Console préfabriquée pour les crémaillères hautes.

10- Prefabricated terrace element of the lower grandstand.

11- Schematic diagram of the prefabrication of intermediate stair carriages.

12- Detail of reinforcing bars for a prefabricated element forming an intermediate stair carriage.

13- General view of intermediate stair carriages executed with their safety propping.

14- Prefabricated bracket for upper stair carriages.



© PHOTO THÉQUE EIFFAGE TP

Les crémaillères intermédiaires ont été préfabriquées en 2 éléments :

- La console constituée d'un élément plein intégrant les armatures supérieures ;
- La travée d'équilibrage constituée d'un élément évidé (figure 12).

Les poteaux ont été coulés en place à l'aide d'outils recevant les poutres et crémaillères préfabriquées.

Cette méthodologie permet de gagner du temps tout en assurant les dispositions d'encastrement correctes et vérifiables aux nœuds

poteaux - poutres. L'outil de coffrage des poteaux assure quant à lui une qualité de clavetage optimale sans retrait différentiel, sans nid de cailloux. Ce point est fondamental pour le bon fonctionnement des encastresments.

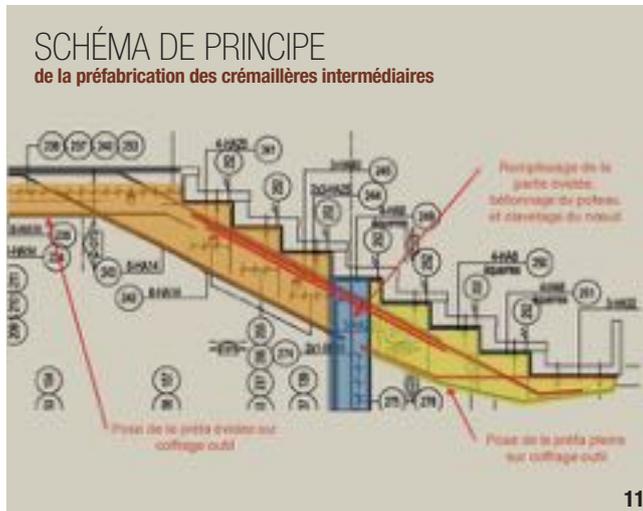
Les temps unitaires sont également optimisés grâce à cet outil spécifique (figure 13).

Les crémaillères hautes n'ont pas pu être préfabriquées en raison de leur poids, bien qu'évidées.

Seule la partie basse en console a été préfabriquée et clavetée *in situ*. Cette console est également constituée d'un élément préfabriqué plein intégrant les aciers supérieurs (figure 14).

Les détails d'armatures ont nécessité de nombreuses mises au point pour les rendre compatibles avec la méthodologie.

Des outils spécifiques de coffrage de ces crémaillères ont été conçus pour le chantier de manière à optimiser les cadences de réalisation du dernier niveau de portique (figure 15). ▷



11



12



13



14

LES MÉGAPOTEAUX ET LEURS FONDATIONS

8 000 des 10 000 tonnes de la charpente et de la toiture reposent sur 4 mégapoteaux.

Le reste des charges de la charpente repose via des potelets et des fléaux bas sur la structure béton armé des tribunes.

L'effort horizontal en tête des mégapoteaux est quasiment nul par principe de conception et se réduit à un effet de frottement minime lié à l'appui conçu pour répondre aux exigences de la structure béton armé.

Les 8 pieux Ø92 cm de fondation des mégapoteaux sont surmontés d'un massif de dimensions 7,60 m × 7,60 m × 2,80 m de hauteur (soit 162 m³) comportant chacun environ 40 tonnes d'acier.

Le ferrailage des massifs de mégapoteaux tient compte également des phases provisoires et intègre en particulier les attentes et les platines du système de hissage de la toiture (figure 16). Les massifs de mégapoteaux ayant été réalisés dès le début



15

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE TP

15- Vue d'ensemble de plusieurs étapes d'avancement des crémaillères hautes dans un virage des tribunes.

16- Coffrage et ferrailage supérieur d'un massif de mégapoteaux avec mise en place des platines de fixation du système de hissage.

15- General view of several stages of progress on upper stair carriages in a grandstand curve.

16- Formwork and top reinforcing bars for a mega-column structure with installation of hoisting system fastening plates.

du chantier, il a fallu définir très en amont la méthodologie de hissage de la toiture afin de prévoir ces éléments. Les mégapoteaux ont la forme d'un U en première phase afin de servir de guides aux mégapoutres pendant le hissage de la toiture (figure 17).

En fin de hissage la partie laissée vide

est armée et bétonnée avec mise en place en tête des appareils d'appuis et des pieds de potelets des mégapoutres. Ils ont été exécutés par levées successives à l'aide d'un coffrage grim pant. Les 4 mégapoteaux et leurs fondations ont été réalisés dès le début du chantier afin de libérer l'emprise servant à



16

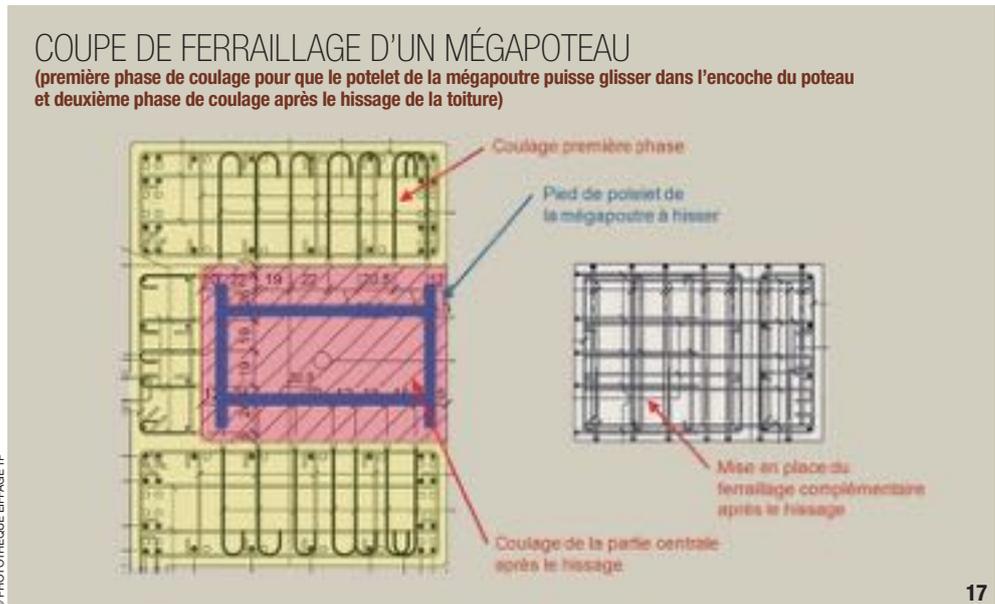
© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE TP

17- Coupe de ferrailage d'un mégapoteau (première phase de coulage pour que le potelet de la mégapoutre puisse glisser dans l'encoche du poteau et deuxième phase de coulage après le hissage de la toiture).

18- Différentes étapes de la réalisation des mégapoteaux.

17- Cross section of reinforcing bars of a mega-column (first phase of pouring so that the mega-beam stud may slide into the column slot and second phase of pouring after hoisting the roof).

18- Various stages in execution of the mega-columns.



© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE TP

17

l'assemblage au sol de la charpente / toiture.

En effet, l'emprise au sol de la zone d'assemblage de la charpente empêchait l'exécution de la partie inférieure de la tribune basse (figure 18).

Les appareils d'appui des mégapoutres en tête des mégapoteaux ont été conçus et fabriqués spécialement pour le projet.

Ils sont capables d'absorber un déplacement longitudinal de 15 cm chacun

sans retransmettre d'efforts horizontaux notables en tête des mégapoteaux. Ces derniers ont été calculés pour un coefficient de frottement de 4 %, le coefficient de frottement réel des appuis fabriqués a été ramené à 2 %. □



© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE TP

18

ACTEURS DU PROJET PPP

PARTENAIRE PUBLIC : Lille Métropole

MAÎTRE D'OUVRAGE : Elisa

GROUPEMENT CONCEPTEUR CONSTRUCTEUR, MANDATAIRE : Eiffage TP, cotraitant responsable de la charpente métallique et de la couverture ; Eiffage Construction Métallique

ARCHITECTES : Valode et Pistre Architectes, associé à Pierre Ferret, Atelier d'Architectures

BUREAU D'ÉTUDES CONCEPTION INITIALE DU GÉNIE CIVIL : Egis associé au Bureau d'Études Structures Eiffage Construction

BUREAU D'ÉTUDES DÉVELOPPEMENT CONCEPTION ET EXÉCUTION DU GÉNIE CIVIL : Bureau d'Études Structures Eiffage Construction

BUREAU DE CONTRÔLE : Socotec

CONTRÔLE EXTÉRIEUR DES ÉTUDES : Seco pour les mégapoteaux et leurs fondations uniquement

ABSTRACT

PIERRE MAUROY STADIUM IN LILLE CIVIL ENGINEERING STRUCTURES

ÉVELYNE OSMANI, EIFFAGE

The Pierre Mauroy Stadium, located in an urban area close to the city of Lille, is a multi-purpose facility with a capacity of 50,000 spectators. Its architectural design provides it with great flexibility. In its stadium configuration it can receive major sports events, and in its arena configuration, big concerts. It also includes a conference centre for corporate use. All the civil engineering structures were designed to meet the specifications and requirements for these various uses. □

EL ESTADIO PIERRE MAUROY DE LILLE ESTRUCTURAS DE INGENIERÍA CIVIL

ÉVELYNE OSMANI, EIFFAGE

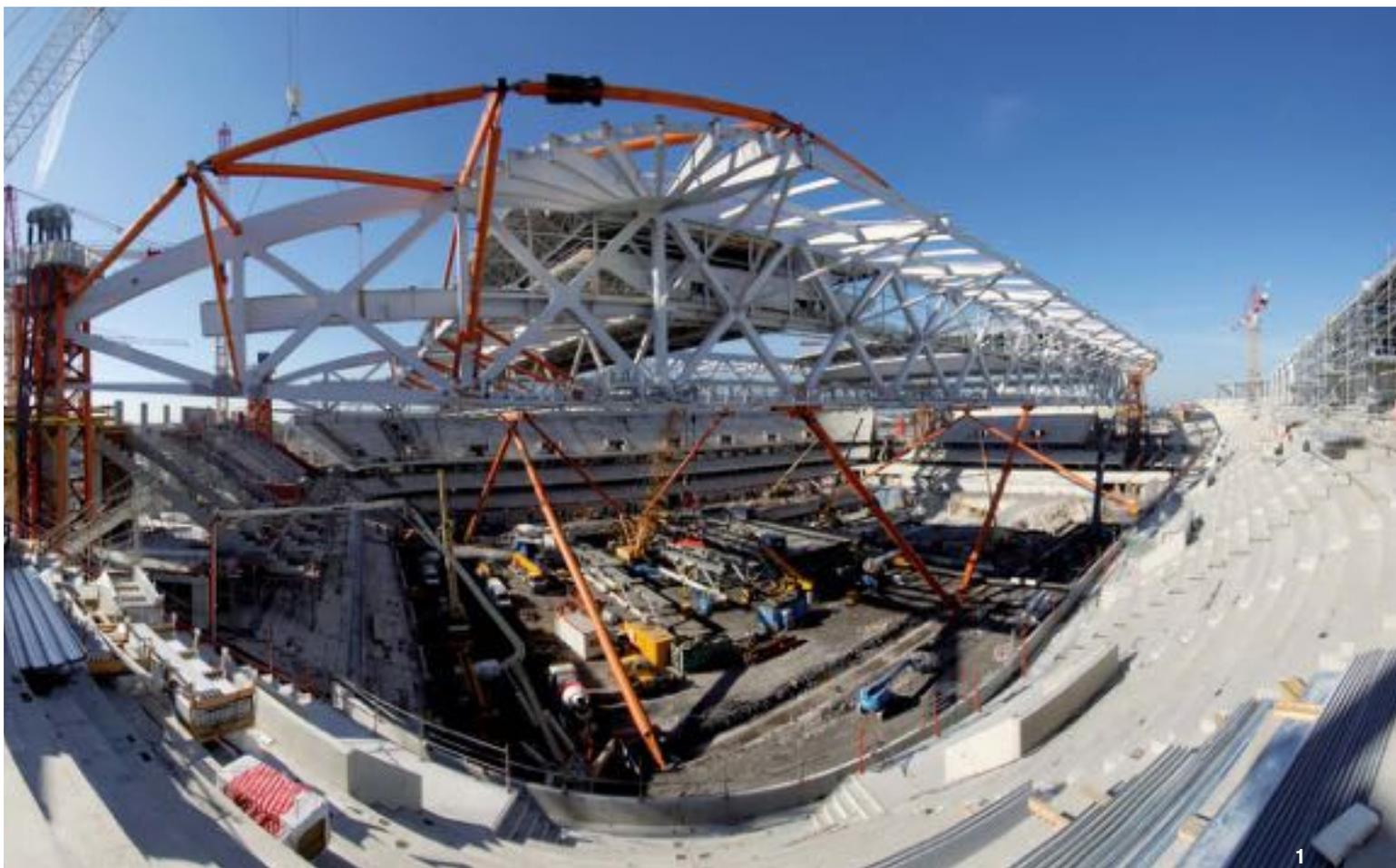
Situado en zona urbana, cerca de la ciudad de Lille, el estadio Pierre Mauroy es un equipamiento polivalente con capacidad para 50.000 espectadores. Su diseño arquitectónico le confiere una gran flexibilidad. En su configuración de estadio, puede albergar importantes eventos deportivos, mientras que su configuración de auditorio es idónea para los grandes conciertos. Finalmente, dispone de un centro de conferencias a disposición de las empresas. Todas las estructuras de ingeniería civil han sido diseñadas para satisfacer los pliegos de condiciones correspondientes a estos distintos usos. □

STADE PIERRE MAUROY À LILLE

LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

AUTEUR : VALÉRIE BONIFACE, DIRECTEUR OUVRAGES SPÉCIAUX, EIFFAGE CONSTRUCTION MÉTALLIQUE
 PHOTOGRAPHES : MAX LEROUGE ET GÉRARD TORDJMAN

LA COUVERTURE DU GRAND STADE DE LILLE EST UNE CHARPENTE MÉTALLIQUE EN FORME DE GALET PLAT DE 10 000 TONNES ENVIRON. LA TOITURE PRINCIPALE QUI CEINT LES GRADINS REPOSE SUR 2 MÉGAPOUTRES DE 205 M DE PORTÉE, PRÉCONTRAINTE. CES POUTRES PRINCIPALES SONT ASSEMBLÉES DE MANIÈRE NON TRADITIONNELLE PAR AXES POUR OPTIMISER LES DÉLAIS D'ASSEMBLAGE SUR SITE. QUATRE PANNEAUX DE TOITURES MOBILES EN STRUCTURE TREILLIS TRIDIMENSIONNELLE PERMETTENT D'OUVRIER OU DE FERMER LE STADE, EN FONCTION DES ÉVÈNEMENTS.



© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

INTRODUCTION

La couverture est une charpente métallique en forme de galet plat de 10 000 tonnes environ. La toiture principale qui ceint les gradins repose sur des mégapoutres de 205 m de

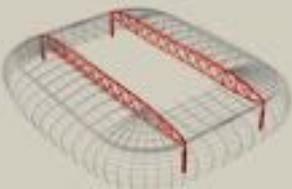
portée, alors que 4 panneaux de toitures mobiles permettent d'ouvrir ou de fermer le stade, totalement ou partiellement, en fonction des événements. La couverture est assurée par un système de membrane en toiture

1- 5 octobre
2011 - Hissage.

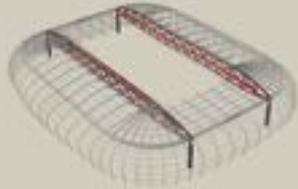
1- 5 October
2011 - Hoisting.

et un système combiné de plaques et tubes polycarbonates en façade. L'objet de cet article est de décrire la genèse de cette structure métallique exceptionnelle, de sa conception à son exécution.

STABILITÉ PRIMAIRE



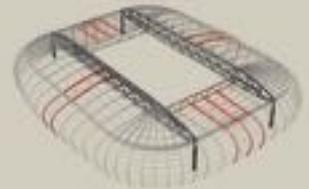
Mégapoutres et mégapoteaux



Poutres de roulement de toitures mobiles



Poutres transversales



Palées de stabilité

2

CONCEPTION

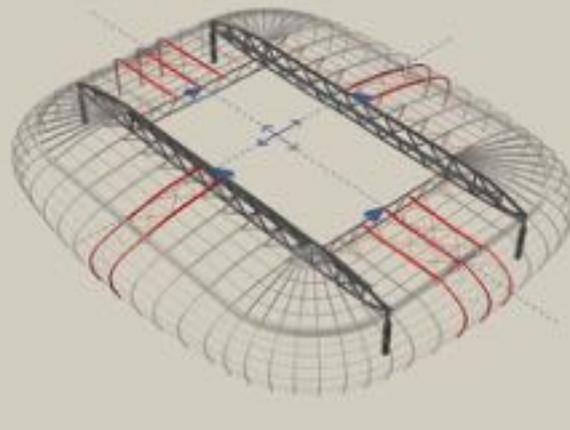
LA TOITURE FIXE : CONCEPTION GÉNÉRALE

Le principal défi pour concevoir une structure de couverture d'un stade de 50 000 places est bien évidemment sa taille. Les dimensions d'une telle enceinte et l'exigence de la non présence de la structure dans le champ de vision des spectateurs en n'importe quel point du stade, impose une structure de très grande portée, pouvant être classée dans la catégorie des structures exceptionnelles plus que dans celle des ouvrages de bâtiments standards. Le concept structural a été développé par le Bureau d'études Greish, bureau d'études renommé pour sa maîtrise de la conception et du calcul des ouvrages complexes et de grandes portées, appuyé par les équipes internes d'études et de méthodes (fabrication et montage) d'Eiffage Construction Métallique.

Le choix structurel pour respecter la forme architecturale a été de créer une colonne vertébrale : 2 mégapoutres principales de 205 m de portée (16,35 m de hauteur structurelle et 1 800 tonnes chacune) et 2 poutres transversales de 80 m de portée (8 m de hauteur structurelle) formant cadre avec les premières. Ce cadre repose sur 4 mégapoteaux et est stabilisé horizontalement par des poutres au vent s'appuyant sur les gradins, les charges étant ensuite descendues par des portiques dans la structure béton.

SCHÉMA STATIQUE

reprise efforts horizontaux



3

© PHOTOTHÈQUE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

2- Stabilité primaire.

3- Schéma statique - reprise efforts horizontaux.

4- Structure secondaire support de couverture.

2- Primary stability.

3- Static diagram - absorption of horizontal forces.

4- Secondary roof support structure.

La stabilité primaire de la structure de couverture est donc formée de ces éléments (figure 2).

Compte tenu des charges importantes descendantes verticales sur les mégapoteaux (de l'ordre 3 500 tonnes) et de leur configuration il n'était pas question de les solliciter avec des charges horizontales.

La structure de la toiture est globalement isostatique et stabilisée par son milieu, seul les efforts de frottement des appareils d'appuis sont transmis aux poteaux. Cette configuration présente également l'avantage de répartir équitablement sur chaque appui les déformations liées aux effets de la

température (dans le sens longitudinal, ces déplacements sont de l'ordre de +/- 6 cm) (figure 3).

Une série de fléaux relie ce cadre au sol et portent la couverture via des pannes horizontales (figure 4).

LES MÉGAPOUTRES

Les poutres principales (mégapoutres et poutres transversales) sont des poutres treillis.

Les mégapoutres sont de conception très inhabituelle, née d'une contrainte non négociable : le temps ! La durée totale du projet depuis le démarrage des études à la livraison de l'ouvrage terminé est de 4 ans.

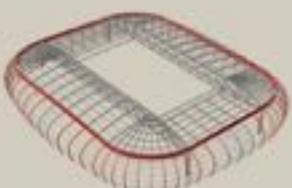
Une conception traditionnelle impliquerait la réalisation sur le chantier d'assemblages boulonnés de grandes envergures compte tenu des efforts importants, et d'assemblages soudés très consommateur de temps (soudage + contrôles + éventuelles réparations) compte tenu des épaisseurs d'acier en jeu à ces échelles de structure. Ce mode de construction traditionnel n'était pas compatible avec les délais du chantier.

Il a donc été choisi d'utiliser et de combiner 3 concepts différents :

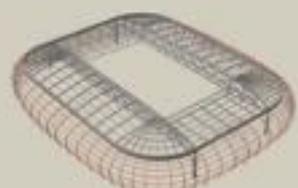
→ Utilisation d'axes comme éléments primaires d'assemblage des barres du treillis (diagonales et membrure tendue), à la manière d'une chaîne de vélo. Cette solution présente l'avantage d'un assemblage rapide et précis sur chantier (figure 5).



STRUCTURE SECONDAIRE SUPPORT DE COUVERTURE



Fléaux bas et poutre chéneau



Pannes basses



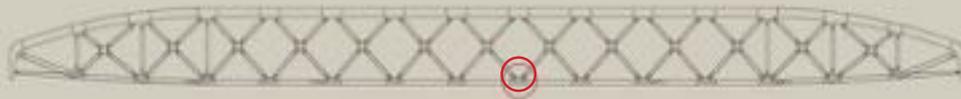
Fléaux hauts



Pannes hautes

4

PRINCIPE DES AXES



5

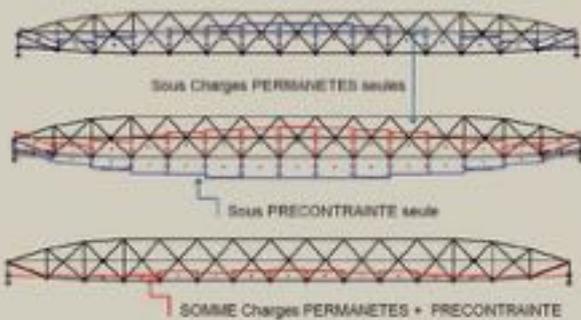
PRINCIPE DES ASSEMBLAGES EN CONTACT



6

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

PRINCIPE DE PRÉCONTRAÎNTE



Efforts dans la membrure inférieure

7

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

- 5- Principe des axes.
- 6- Principe des assemblages en contact.
- 7- Principe de précontrainte.
- 8- Modèle 3D d'un nœud bas.
- 9- Prototype usine.

- 5- Schematic of the axes.
- 6- Schematic of assembly joints in contact.
- 7- Prestressing schematic.
- 8- 3D model of a lower truss joint.
- 9- Factory prototype.

permet de réduire sensiblement la section d'acier de la membrure inférieure et le diamètre des broches. L'ensemble est plus élancé et moins présent visuellement (figure 7).

Les câbles utilisés sont de types haubans, 37 T15 et 55 T15.

Les câbles sont au nombre de 5 au centre de la poutre. Ils sont ancrés progressivement le long de la poutre et seuls 2 câbles parcourent la totalité de la poutre pour venir s'ancrer à ses extrémités ;

Ces solutions ont pu également être imaginées grâce aux capacités industrielles de l'entreprise Eiffage Construction Métallique, et en particulier sa maîtrise des usinages mécaniques et ses machines permettant d'usiner très précisément des surfaces pour assurer le fonctionnement des axes et les reprises d'efforts par contact entre pièces métalliques.

Elles traduisent également une volonté industrielle de préfabriquer au maximum

→ Pour la membrure comprimée, utilisation de la compression résultant des efforts globaux pour précontraindre les assemblages entre les différents éléments composant la membrure et passer une grande partie de l'effort directement par contact (figure 6).

→ Pour optimiser le fonctionnement global, mise en place de câbles de précontraintes dans la membrure inférieure : l'effort interne de précontrainte est auto équilibré par la diminution de l'effort de traction résultant dans la membrure inférieure (diminution des efforts d'environ 1/3). Cette disposition



8

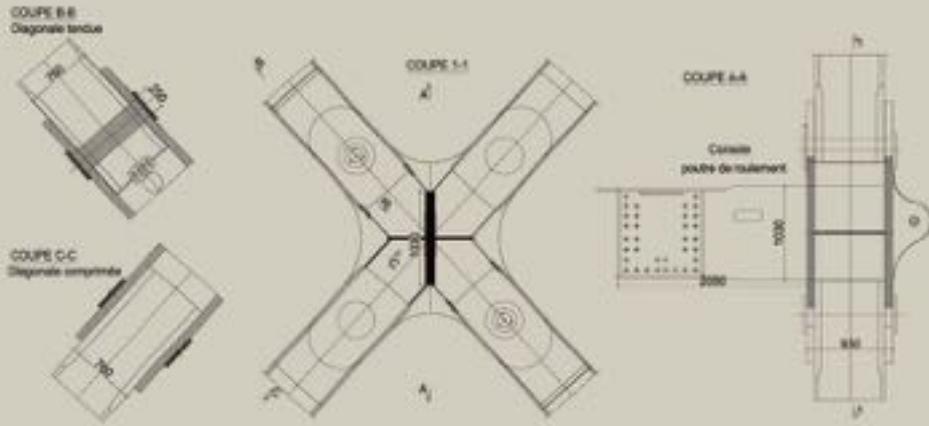


9

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

DÉTAIL D'UN NŒUD CENTRAL

intégrant le support de la voie de roulement des toitures mobiles



10

les éléments en usine afin de mieux maîtriser la qualité et les délais de fabrication et de simplifier le processus d'assemblage. En particulier, réaliser un treillis en forme de X permet de réaliser des éléments plutôt courts, plus faciles à préfabriquer et à transporter par rapport à des éléments de treillis en N classique (les diagonales sont formées de 2 demi-diagonales assemblées ▶

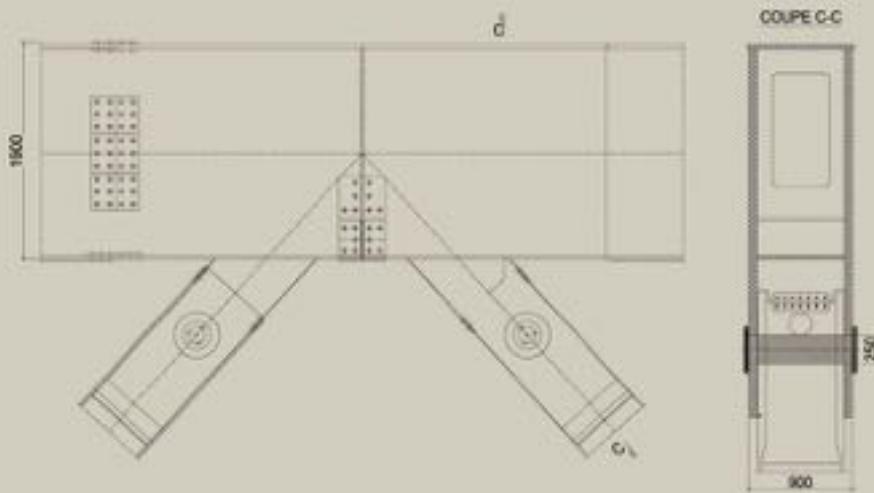
10- Détail d'un nœud central intégrant le support de la voie de roulement des toitures mobiles.

11- Détail d'un nœud haut.

12- Configurations des toitures mobiles : ouvert / fermé.

13- Coupe longitudinale des toitures mobiles.

DÉTAIL D'UN NŒUD HAUT



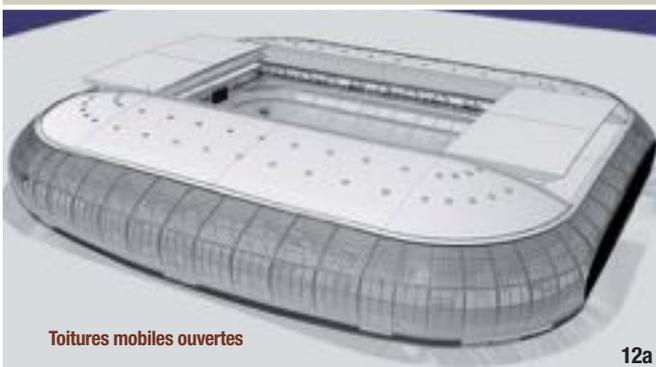
11

10- Detail of a central truss joint including mounting for the moving roof track.

11- Detail of an upper truss joint.

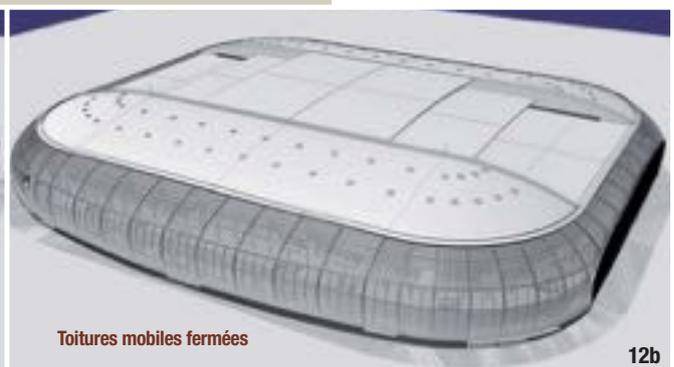
12- Moving roof configurations: open/closed.

13- Longitudinal section of moving roofs.



Toitures mobiles ouvertes

12a



Toitures mobiles fermées

12b

COUPE LONGITUDINALE DES TOITURES MOBILES



13



14



15



16



17



18



19



20



21

14- Vue en phase de chantier : la structure et ses appuis motorisés avant couverture.

15- Toiture fermée, vue intérieure.

16- Butons de stabilisation de la poutre de roulement.

17- Fabrication des nœuds à Lauterbourg.

18- Pièce d'angle de toiture.

19- Poutre treillis transversale.

20- Transport par barge.

21- Transport exceptionnel d'un élément de poutre transversale (8 m).

14- View in the site works phase: the structure and its power-operated supports before roof covering.

15- Closed roof, interior view.

16- Runway beam stabilising struts.

17- Truss joint production at Lauterbourg.

18- Roof angle part.

19- Transverse lattice beam.

20- Transport by barge.

21- Exceptional transport of a transverse beam element (8 m).

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

22- 5 juillet 2010 - Mise en place des appareils pour montage des mégapoutres.

23- 23 juillet 2010 - Mise en place pour montage des appareils toitures mobiles.

24- 23 juillet 2010 - Montage des mégapoutres.

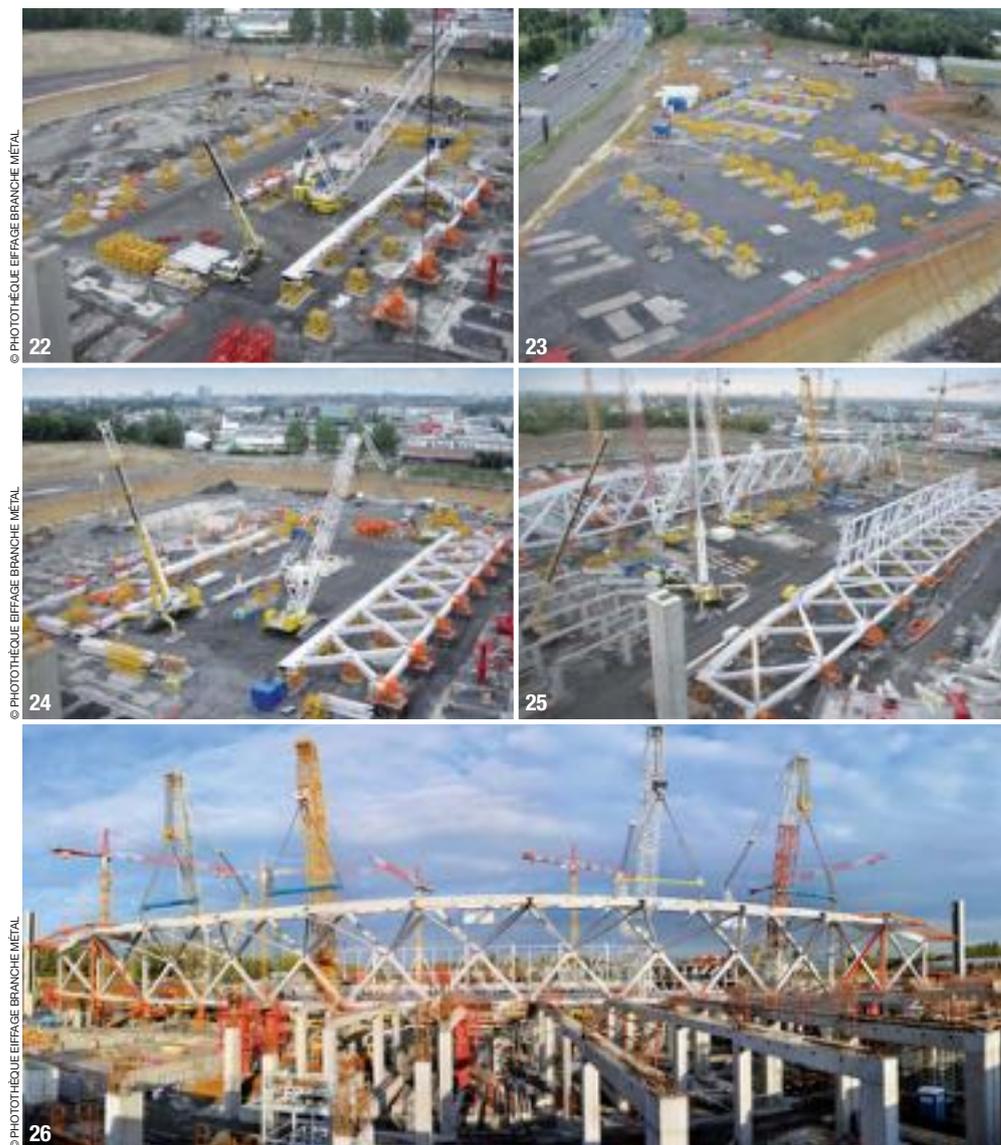
25 & 26- 22 octobre 2010 - Relevage des mégapoutres.

22- 5 July 2010 - Installing tackle for erection of mega-beams.

23- 23 July 2010 - Installing tackle for erection of moving roofs.

24- 23 July 2010 - Mega-beam erection.

25 & 26- 22 October 2010 - Raising the mega-beams.



© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

© PHOTO THÉÂTRE EIFFAGE BRANCHE MÉTAL

en leur centre), permet de créer un nœud rigide pour la stabilisation de la poutre de roulement des toitures mobiles et, compte tenu du recouvrement par le bardage de la partie supérieure, donne une certaine légèreté à la demi-poutre apparente.

Les sections des éléments résultant dans les détails sont données dans les figures 8 à 11.

→ Nœud inférieur :

À noter les tubes dans lesquels passent les câbles de précontraintes. Le diamètre des broches va de 250 mm à 300 mm (figures 8 & 9).

→ Nœud des diagonales :

À noter que pour des raisons de stabilité, les broches des diagonales comprimées sont des éléments soudés pour éviter la formation d'un mécanisme (figure 10).

→ Nœud haut : figure 11.

Les aciers utilisés sont des aciers S460 et S355 pour les barres, et 42CrMo4 pour les axes.

La conception et le dimensionnement ont été effectués suivant les Eurocodes. Des essais en soufflerie ont permis de déterminer les efforts engendrés par le vent. Voir article spécifique sur les essais au vent.

LES TOITURES MOBILES

Les toitures mobiles sont formées de 4 panneaux motorisés de manière indépendante en structure treillis de 80 m x 35 m (500 tonnes chacun) permettant d'occulter l'espace central, situé au-dessus de l'aire de jeu, par leur translation sur les voies de roulement connectées aux mégapoutres. La conception des structures et des mécanismes a été intégralement réalisée par les bureaux d'études

internes d'Eiffage Construction Métallique (figures 12 & 13).

Plusieurs positions sont envisageables en fonction de l'exploitation du stade. En position d'ouverture, les panneaux se superposent en zigzag.

La structure treillis tridimensionnelle est relativement élancée (hauteur structurelle de 3,5 m pour une portée de 80 m) et elle est composée de profilés laminés I et H et de tubes.

Chaque panneau de toiture est globalement isostatique.

Cette condition est primordiale car les panneaux s'appuient sur des structures supports (en l'occurrence les mégapoutres) qui peuvent se déplacer sensiblement sous charges, où que soient les panneaux sur la toiture (en position de garage ou en position fermée). Les efforts dans la structure ne dépendent donc pas de ces déplacements.

Chaque panneau est un semi-portique avec 2 pieds encastrés sur une file et 2 pieds pendulaires sur l'autre file (figure 14).

Les poutres de roulement, fixées aux mégapoutres sur les nœuds des diagonales, sont stabilisées par des butons formant une poutre triangulaire avec les structures hautes de la toiture fixe (figures 15 & 16).

Le système mécanique permet de passer de la position complètement ouverte à complètement fermée en moins de 30 minutes.

Chaque panneau de toiture mobile est équipé avec 4 bogies motorisés (1 par pied) soit par file 2 moteurs asynchrones, 2 réducteurs, 2 galets motorisés et 2 galets fous. Les bogies sont équipés de verrous motorisés pour maintenir la toiture en position en cas de fortes sollicitations climatiques. ▷



27



28



29



30



31



32



33



34

27- 5 novembre 2010 - Montage des toitures mobiles.

28- 18 novembre 2010 - Relevage treillis toiture mobile pour préparation l'introduction dans la toiture fixe par chemin de roulement provisoire.

29- 11 février 2011 - Toitures mobiles sur chemin de roulement provisoire.

30- Introduction des panneaux de toitures dans la toiture fixe.

31- Panneaux mobiles introduits dans la toiture fixe et préparation au hissage.

32- Préparation au hissage des vérins avaleurs de câbles.

33- Mise en place des fléaux hauts.

34- Mise en place des fléaux hauts par des systèmes de « chausse-pieds ».

27- 5 November 2010 - Erection of moving roofs.

28- 18 November 2010 - Raising a moving roof lattice to prepare for insertion in the fixed roof by temporary roller track.

29- 11 February 2011 - Moving roofs on temporary roller track.

30- Inserting roof panels in the fixed roof.

31- Moving panels inserted in the fixed roof and preparation for hoisting.

32- Preparation of cable reel jacks for hoisting.

33- Installing upper cantilever sections.

34- Installing upper cantilever sections by "shoe horn" systems.

Chaque élément de toiture a été rendu « communicant » à l'aide d'une intelligence embarquée sur chaque élément mobile reliée à un automate centralisateur pour la gestion de la commande automatique pour :

→ Mesurer et contrôler le déplacement de chaque élément.

→ Réguler et synchroniser les moteurs de chaque file afin d'éviter le déhanchement des éléments mobiles

compte-tenu de la grande portée et de sa grande souplesse, corriger la dérive de marche en biais sur toute la course (les panneaux sont des éléments de grandes portées, réalisant des courses importantes : l'un des enjeux a été de gérer et de contrôler la mise en crabe des toitures mobiles : elles sont très longues en travers du terrain, 80 m et le moindre décalage entre les bogies d'un côté ou de

l'autre peut entraîner des efforts très grands dans la structure, et dans une moindre mesure des dégrafages du bardage).

→ Surveiller, détecter, ralentir, positionner, arrêter, verrouiller pour garantir un contrôle correct du déplacement de chaque élément et pouvoir agir à distance en cas d'anomalie.

La solution de communication retenue est le CPL (courant porteur de



35



36

ligne) par contact glissant en utilisant les gaines d'alimentation électrique (un réseau de communication sans fil « WIFI » n'était pas envisageable compte tenu de l'environnement et de la structure gigogne des éléments qui présentait un risque important de perte de contrôle ; également la solution Distancemètre laser ne pou-

vait pas remplir la fonction compte-tenu de l'environnement du stade brouillard/fumigène qui risquait de perturber la mesure). Une marche dégradée et indépendante est prévue et peut être sélectionnée sur chaque toiture en cas de défaillance du mode automatique. Celle-ci est gérée par l'automate embarqué.

35- Montage de la façade en tubes polycarbonate.

36- Montage de la façade en tubes polycarbonate.

35- Erection of the polycarbonate tube facade.

36- Erection of the polycarbonate tube facade.

TRANSPORT

Les éléments des mégapoutres et les nœuds spécifiques ont été transportés par barge directement de l'usine de Lauterbourg jusqu'au port de Lille (figure 20).

Cela a permis de minimiser le nombre de camions et de maximiser la taille des colis transportés. Le reste a été transporté de manière traditionnelle par camion (figure 21).

MONTAGE

Les méthodologies et le montage ont été réalisés par les équipes d'Eiffage Construction Métallique (figures 22 à 36).

CONCLUSION

10 000 tonnes de charpente, conçues, étudiées, fabriquées, montées en 4 ans : un exploit réalisable grâce à un travail d'équipe, un réel partenariat aussi bien avec le client ELISA qu'avec nos sous-traitants et une vraie maîtrise et réflexion globale sur les stratégies de conception, de fabrication et de montage. □

INTERVENANTS - CHARPENTE MÉTALLIQUE

GROUPEMENT CONCEPTEUR CONSTRUCTEUR, MANDATAIRE :

Eiffage TP, cotraitant responsable de la charpente métallique et de la couverture : Eiffage Construction Métallique

ARCHITECTES : Valode et Pistre Architectes, associé à Pierre Ferret, Atelier d'Architecture

BUREAU D'ÉTUDES CONCEPTION INITIALE TOITURE FIXE : ARCORA

BUREAU D'ÉTUDES DÉVELOPPEMENT CONCEPTION ET EXÉCUTION TOITURE FIXE : BE Greisch

BUREAUX D'ÉTUDES CONCEPTION ET EXÉCUTION TOITURE MOBILE Y COMPRIS MÉCANIQUE : Eiffage Construction Métallique

BUREAU DE CONTRÔLE : Socotec

CONTRÔLE EXTÉRIEUR DES ÉTUDES : Seco

EXÉCUTION

FABRICATION

Les structures métalliques ont été fabriquées dans plusieurs usines du groupe : Lauterbourg, Maizières, Eiffel Iberica et ETCM pour ne citer que les plus importantes. En tout un dizaine de sites de production ont été sollicités (figures 17, 18 & 19).

ABSTRACT

PIERRE MAUROY STADIUM IN LILLE: THE STEEL STRUCTURE

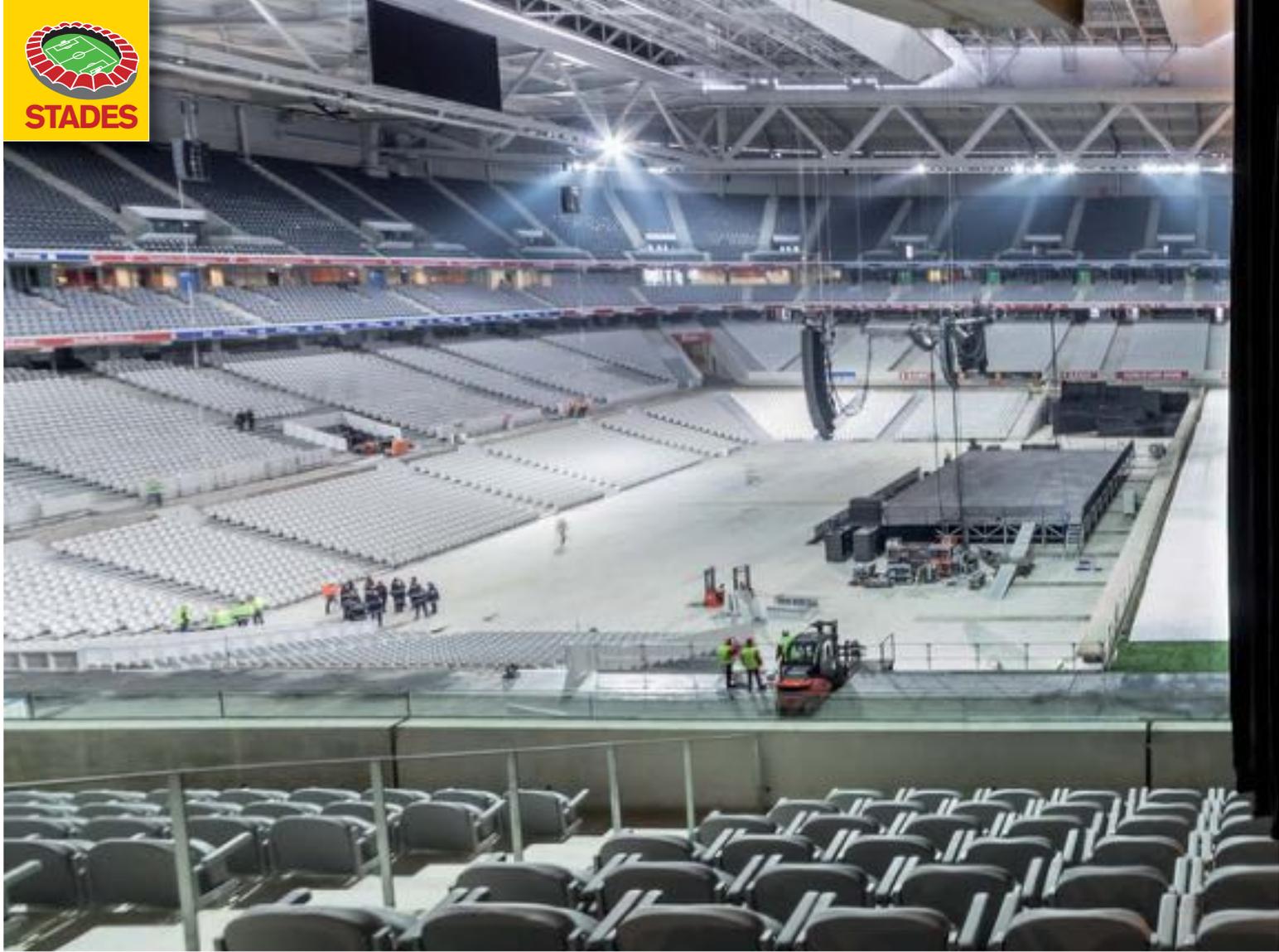
VALÉRIE BONIFACE, EIFFAGE

The roof of the Grand Stade de Lille, on top of the stadium's infrastructure, is a flat pebble-shaped steel structure weighing about 10,000 tonnes. The main roof covering the terraces rests on two mega-beams of 205-metre span, prestressed in order to minimise forces in the components and assemblies. These main beams are assembled in an unconventional manner, by axes, to optimise assembly times on site. Four moving roof panels of three-dimensional lattice structure allow the stadium to be opened or closed, fully or partially, depending on the event. The primary roof structure and the moving roofs were raised in a single package. Covering is provided by a membrane system on the roof and a combined plate and polycarbonate tube system on the facade. □

ESTADIO PIERRE MAUROY EN LILLE: LA ESTRUCTURA METÁLICA

VALÉRIE BONIFACE, EIFFAGE

La cubierta del Gran Estadio de Lille, que corona la infraestructura del estadio, es una estructura metálica en forma de canto rodado de 10.000 toneladas aproximadamente. El techo principal que rodea las gradas se apoya en 2 megavigas de 205 m de luz, pretensadas para minimizar los esfuerzos en los elementos y los ensamblajes. Estas vigas principales están unidas de una forma no tradicional, mediante ejes, para optimizar los tiempos de ensamblaje in situ. Cuatro placas de techado móviles de estructura de enrejado tridimensional permiten abrir o cerrar el estadio, total o parcialmente, en función de los eventos. La estructura primaria de techo así como los techados móviles se izaron en un solo bloque. La cubierta está realizada con un sistema de membrana en techo y un sistema combinado de placas y tubos de policarbonato en la fachada. □



LE STADE PIERRE MAUROY À LILLE LA « BOÎTE À SPECTACLE »

AUTEURS : STÉPHANE DANDROY, DIRECTEUR TECHNIQUE, EIFFAGE TP NORD - JEAN-BERNARD DATRY, DIRECTEUR, SETEC TPI - JEAN-CLAUDE MUTEL, DIRECTEUR GRANDS PROJETS, EIFFAGE - AUDREY ZONCO, INGÉNIEUR PRINCIPAL, SETEC TPI

DU CONCEPT ARCHITECTURAL AUX ÉTUDES D'EXÉCUTION, COMMENT PASSER D'UN STADE DE FOOTBALL DE 50 000 PLACES À UNE SALLE DE CONCERT DE 28 000 PLACES, PLUSIEURS FOIS PAR AN ET EN MOINS DE 24 HEURES ? POUR PIMENTER LE TOUT, LE SYSTÈME DOIT ÊTRE DÉVELOPPÉ, CONSTRUIT ET MIS EN SERVICE DANS LE MÊME DÉLAI QUE L'ENSEMBLE DE L'OUVRAGE. EIFFAGE TP A FÉDÉRÉ LES PARTENAIRES PERTINENTS EN INGÉNIERIE, EN CONSTRUCTIONS CIVILES ET EN SYSTÈMES INDUSTRIELS POUR RÉALISER UN ÉTABLISSEMENT À EXPLOITATIONS MULTIPLES UNIQUE AU MONDE.

LA DÉFINITION DU BESOIN

Comme l'écrivent Denis Valode et Pierre Ferret, « la proximité (est) indispensable à la naissance de l'intimité et de la convivialité entre le "spectateur" et "l'acteur" ».

Il faut toutefois que tous les spectateurs, même ceux situés dans les gra-

dins un peu plus éloignés de l'espace d'activité (le terrain de sports en salle ou la scène du spectacle), puissent disposer d'une vue agréable.

Le souci d'optimisation des courbes de visibilité, qui a présidé à la disposition des gradins du stade de football, a été identique pour déterminer l'alti-

tude optimale de cet espace d'activité. La figure 2 indique le tracé des courbes de visée en tribune nord (la plus contrainte) et montre que pour que les spectateurs de la volée basse puissent voir les lignes de touche de hand-ball sans être gênés par les spectateurs assis dans la partie basse, il est néces-

saire que l'aire d'évolution se situe environ 4 m plus bas que la pelouse.

Le stade Pierre Mauroy accueille en priorité tous les matches du club résident, le LOSC.

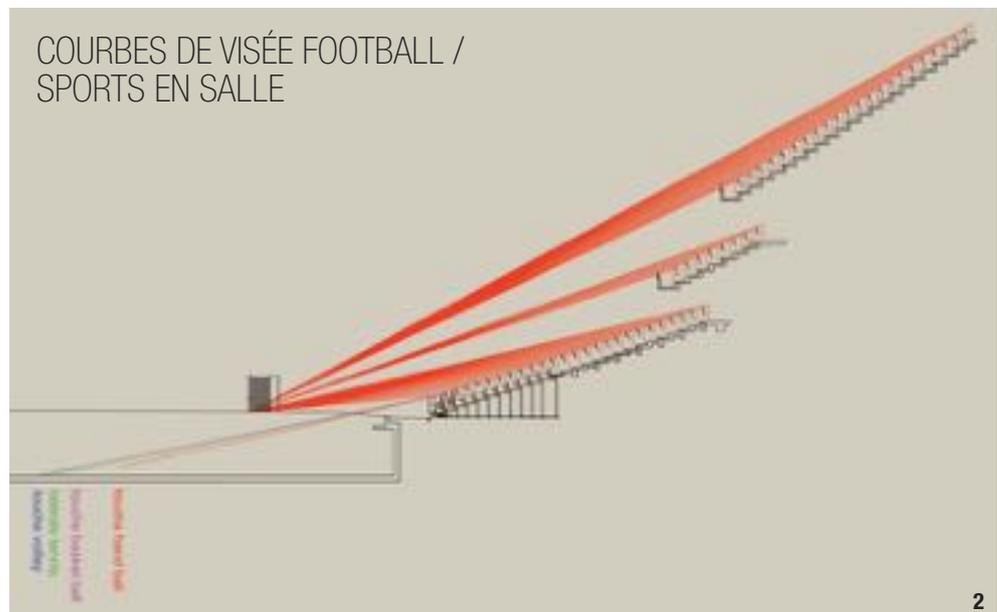
Il faut donc pouvoir prévoir les séquences d'ouverture et de fermeture entre les différentes rencontres spor-



© ELISA / VALODE ET PISTRE ARCHITECTES / ATELIER FERRET ARCHITECTURE / JÉRÔME POUILLÉ

1- Éclairage de compensation photosynthétique allumé derrière le rideau de fond de scène. 20 mars 2013.
2- Courbes de visée football / sports en salle.

1- Photosynthetic compensation lighting illuminated behind the stage background screen. 20 March 2013.
2- Football/indoor sports sighting curves.



© ELISA / VALODE ET PISTRE ARCHITECTES / ATELIER FERRET ARCHITECTURE

tives. De cette particularité découlent plusieurs contraintes :

→ Les mécanismes doivent être rapides, afin d'assurer les changements de configuration en moins de 24 h de travail continu.

→ Les systèmes doivent être fiables, pour éviter toute annulation d'évène-

ment (sportif ou autre) qu'entraînerait un incident de fonctionnement.

→ Lors du retour en position, le système doit garantir que l'aire de grand jeu ainsi reconstituée respecte toutes les exigences pour assurer l'homologation sportive du stade par les instances du football et du rugby.

→ Enfin, le revêtement de l'aire de grand jeu reste aujourd'hui une pelouse naturelle, dont le développement doit se poursuivre plateau ouvert ou fermé. Le plateau mobile doit donc comporter les sous-systèmes de chauffage, arrosage, éclairage, ventilation nécessaires à la culture de la pelouse (figure 1).

UN PROCESSUS D'INGÉNÉRIE CONCOURANTE

Le mode de contrat public retenu pour tout l'ouvrage est celui d'un Partenariat Public-Privé. La conception et la construction sont confiées à un groupement associant les différentes branches travaux d'Eiffage et les architectes, dont ▷



3



4

© PHOTO TECHNIQUE EIFFAGE TP - DR

3- Traitement par grenailage et feuille préfabriquée de l'étanchéité du plateau.

4- Vue en sous-face du plateau mobile : poutre treillis, dalle orthotrope, appareil d'appui en fond de fosse.

5- Coupe du système en configuration football, plateau fermé.

6- Coupe du système pendant le levage du plateau (garde-corps sur plateau non représenté).

3- Shot peening treatment and pre-fabricated waterproofing membrane of the platform.

4- Underside view of the moving platform: lattice beam, orthotropic slab, support system in bottom of pit.

5- Cross section of the system in football configuration, closed platform.

6- Cross section of the system during platform lifting (guard rail on platform not shown).

le mandataire est Eiffage TP. Le développement des systèmes du plateau mobile s'est donc déroulé en concomitance des phases usuelles du projet de bâtiment.

Lors des phases de concours (niveau Esquisse + en 2007) puis de mise au point du contrat (niveau APD en 2008), l'identification des principaux outils a été réalisée par des équipes internes, par analogie aux méthodes de ripage et de lançage des ouvrages d'art. Les solutions initiales associaient des vérins télescopiques embarqués dans le plateau mobile, et un déplacement actionné par des treuils.

Les revues de conception menées lors de l'APD ont montré que ces systèmes ne permettraient pas d'atteindre de façon satisfaisante les objectifs de

fiabilité, de redondance et de rapidité de manœuvre. L'équipe de Direction de Projet a alors décidé de s'adjoindre un maître d'œuvre pour sécuriser ces différents aspects. Par ailleurs, le calendrier général d'opération ne permettait pas de mener les étapes usuelles PRO - DCE - Marché. Le maître d'œuvre retenu, Ateim, a donc rédigé un cahier des charges performantiel pour encadrer un dialogue compétitif entre les sociétés ou groupements ayant manifesté leur intérêt. Cette démarche a permis d'associer les spécialistes notamment des systèmes hydrauliques dès l'automne 2009, et de retenir en mars 2010 le groupement NFM Technologies - Oligear Towler France - Douce Hydro. Leur contrat comporte une phase dite de prédimensionnement, laquelle a

permis de finaliser le nombre de vérins retenus, les efforts appliqués tant en marche normale qu'en marche dégradée, le nombre de poutres principales et les principales données d'interface. Tous ces éléments ont permis d'engager, dès juillet 2010, les études d'exécution des massifs de fondation et de la charpente métallique.

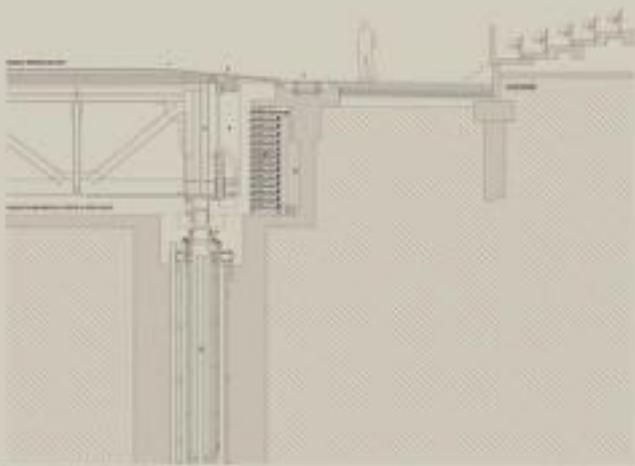
LES ÉTUDES D'EXÉCUTION

Comme tous les ouvrages de béton armé du stade Pierre Mauroy, les massifs de fondation et les voiles de la fosse ont été calculés et dessinés par le Bureau d'Études Structures Eiffage Construction. Le phasage de réalisation des pieux dès juin 2010, avant validation de l'implantation des vérins, avait conduit à une répartition forfaitaire de

© ELISA / VALODE ET PISTRE ARCHITECTES / ATELIER FERRET ARCHITECTURE

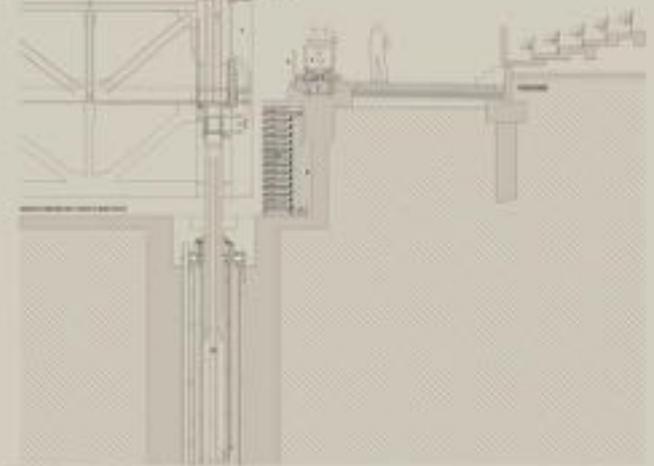
COUPE DU SYSTÈME en configuration football, plateau fermé

5



COUPE DU SYSTÈME pendant le levage du plateau (garde-corps sur plateau non représenté)

6



7- Installation des vérins équipés des appuis Maurer et des capteurs de position.

8- Groupe haute pression associé au vérin.

9- Coupe du système après transfert de charge sur les chariots et déploiement des tribunes télescopiques.

7- Installation of the jacks fitted with Maurer supports and position sensors.

8- High-pressure unit associated with the jack.

9- Cross section of the system after load transfer to the trolleys and deployment of the telescopic grandstands.



© PHOTO TECTIQUE EIFFAGE TP - DR



8

Les vérins sont isolés du sol et de la nappe phréatique par des puits métalliques étanches de 9 m de hauteur totale, mis en œuvre avec une tolérance de verticalité de 10 mm.

Pour le plateau métallique, les études d'exécution ont été confiées à Setec TPI. Les études ont été menées avec cinq configurations de calcul :

- Configuration fermée, plateau posé en fond de fosse,
 - Configuration ouverte, plateau en cours de levage,
 - Configuration ouverte, plateau en cours de translation,
 - Construction, phases d'assemblage du plateau,
 - Construction, hissage du plateau.
- En configuration fermée, la structure repose sur 6 appuis fixes et rigides

sous chaque poutre de rive, et sur 132 appuis élastiques disposés en fond de fosse, au droit des montants des poutres treillis principales situés à l'intersection avec les poutres secondaires. En configuration de levage, le plateau est soulevé par 2x6 vérins hydrauliques linéaires placés sous les deux poutres de rive. Les appuis de ces vérins sont considérés :

- Infiniment rigides pour les vérifications en résistance ;
- Élastiques avec une raideur de 63,5 MN/m pour les vérifications en déformation du plateau. Cette raideur est celle de la colonne d'huile du vérin en position haute.

En sus des charges permanentes, le calcul prend en compte des cas de charge correspondant à plusieurs scénarios de marche dégradée.

En fin de levage, 24 bras pivotants sont dépliés pour venir reposer sur des chariots rouleurs, lesquels permettent la translation sur 65 m du plateau au-dessus de la demi-pelouse sud. La portée en cours de translation est ainsi amenée à 78,7 m. Les efforts verticaux repris par chacun des 24 bras de translation sont identiques du fait de la mise en place d'un système de compensation hydraulique à l'interface bras de translation/roller, et sont imposés au modèle de calcul. Dans ce cas de levage, les cas exceptionnels de perte d'un appui sont également pris en compte.

Le phasage de construction est intégré au modèle de calcul afin de valider la résistance de la structure en cours de montage, évaluer son état en fin de construction, ainsi que les contreflèches à donner aux poutres principales.

Ces contreflèches intègrent également les effets thermiques et ceux d'une dépose totale ou partielle de la pelouse, afin de garantir un chargement minimal des 132 appuis de fond de fosse.

Enfin, une étude dynamique du plateau a été réalisée. Les deux premiers modes propres de flexion verticale du plateau sont 3,08 Hz et 3,61 Hz, ce qui est supérieur aux plages de fréquence d'excitations par la marche (1,6-2,4 Hz), par une foule dansante (1,5-3,0 Hz), par un coureur (2,0 à 3,5 Hz), ou un sauteur (1,8 Hz à 3,4 Hz). Les sollicitations dynamiques de fréquence calée sur les modes de vibration induisent des accélérations verticales maximales inférieures à 0,7 m/s², ce qui garantit un niveau de confort satisfaisant pour les usagers, sachant que les plus fortes accélérations sont obtenues pour un cas théorique correspondant à une foule de sauteurs (cas d'un concert par exemple).

LE CONTRÔLE EXTÉRIEUR

Le plateau mobile est un ouvrage atypique, qui relève à la fois des règlements applicables aux établissements recevant du public et à ceux qui régissent les machines. En plus du Contrôle Technique de Construction, confié à Socotec par le Maître d'Ouvrage Elisa, Eiffage TP a décidé de s'entourer de compétences complémentaires :

- Un contre-calcul des ouvrages métalliques a été confié au bureau Seco ;
- Une assistance à l'auto-certification CE a été confiée à Socotec Industrie ;
- Une assistance sur les analyses de fiabilité a été confiée au cabinet ICDE ;
- Enfin, des réunions régulières d'un comité d'experts ont assuré un suivi des étapes tant de justification par le calcul que de mise en œuvre.

Notamment, la démarche AMDEC (Analyse des Méthodes de Défaillance et Évaluation de leur Criticité) qui a été menée par les constructeurs des systèmes mécaniques et hydrauliques a fait l'objet d'une revue détaillée. ▷

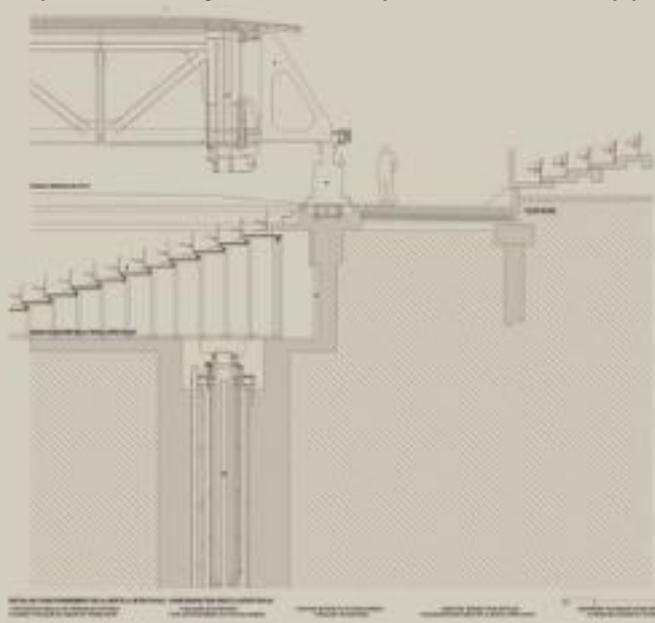
ces appuis, suivant un pas constant. Le report des efforts de poussée des vérins (1 050 tonnes) vers ces pieux a amené la création d'un massif de béton armé de 2,5 m d'épaisseur sur chaque petit côté de la boîte à spectacles, massif qui intègre les chambres des pompes et les caniveaux nécessaires.

© ELISA / VALODE ET PISTRE ARCHITECTES / ATELIER FERRET ARCHITECTURE

9

COUPE DU SYSTÈME

après transfert de charge sur les chariots et déploiement des tribunes télescopiques



MÉCANISMES ET STRUCTURES DU PLATEAU MOBILE LA GÉOMÉTRIE D'ENSEMBLE DE LA CHARPENTE

Le plateau mobile est constitué d'un platelage métallique orthotrope recevant le complexe de pelouse de dimensions 73,36 m par 57,72 m, supporté par une structure treillis métallique tridimensionnelle composée comme suit :

→ 12 poutres treillis principales de 72,31 m de portée, 3,60 m de haut en moyenne, constituées de membrures en Té, de diagonales en H et de montants en ailes de moulin ;

→ 2 poutres de rive de longueur 55 m, de hauteur 3,50 m, constituées d'un PRS à âme pleine ;

→ 9 poutres treillis secondaires transversales, perpendiculaires aux poutres principales et espacées tous les 8,1 m, constituées de diagonales et membrures inférieures en tubes métalliques. Un pion de centrage sud assure le positionnement horizontal du plateau dans les deux directions (parallèlement et perpendiculairement aux poutres principales) tandis que le pion nord n'assure le centrage que dans la direction des poutres principales.

La masse de la charpente métallique est d'environ 2 000 tonnes. Comme pour la mégastructure de la toiture, elle a été fabriquée à Lauterbourg et transportée par barges jusqu'à Lille. En revanche, elle a été entièrement soudée sur site. (figures 3 et 4).

LES MÉCANISMES DE LEVAGE (figures 5 et 6)

Lors des manutentions, le plateau recouvert de sa pelouse pèse environ 4 200 tonnes. Il est soulevé par 2 ensembles de 6 vérins simple tige double effet, de 1 050 tonnes de puissance unitaire (vérins de fabrication Douce Hydro, course 6 m, tige \varnothing 540 mm, alésage \varnothing 640 mm, revêtement spécifique Keradouce). La répartition des vérins sous la poutre de rive a été étudiée pour permettre la défaillance complète d'un vérin en cours de manœuvre : celle-ci peut donc se poursuivre avec uniquement 5 vérins par côté. Les têtes de vérins sont pourvues d'appuis sphériques Maurer, qui permettent de compenser la rotation des poutres de rive lors des transferts de charges. La position de chaque vérin est suivie par un capteur de position magnétostrictif, d'une précision de 1/100^e de millimètre. (figure 7)

À chaque vérin est associée sa pompe haute pression dédiée (figure 8). Ce choix permet de gérer les différences



10 © PHOTOTEQUE EIFFAGE TP - DR

importantes de pression entre les vérins situés aux angles et ceux situés au centre du plateau et évite ainsi la propagation de défauts en cas de défaillance d'un vérin.

Un automate de régulation (système Siemens Profinet) permet de piloter spécifiquement le fonctionnement de chaque actionneur afin de respecter les différences maximales entre appuis

(+/- 3 mm) et entre poutres de rive : lorsqu'un vérin prend de l'avance, le débit de sa pompe est divisé par 2 voire annulé jusqu'à retour dans la fourchette de régulation prévue.

L'ensemble mis en place comporte également des fonctions de suivi et d'autotest afin d'anticiper au mieux tous les besoins d'intervention.

La durée du levage proprement dit

10- Bras en cours de montage.

11- Chariot de translation : de bas en haut rouleurs SED, chassis NFM, vérin de compensation Douce Hydro, appui Maurer.

12- Ensemble de translation chariot et vérin avec sa pince (Douce Hydro).

10- Arm undergoing erection.

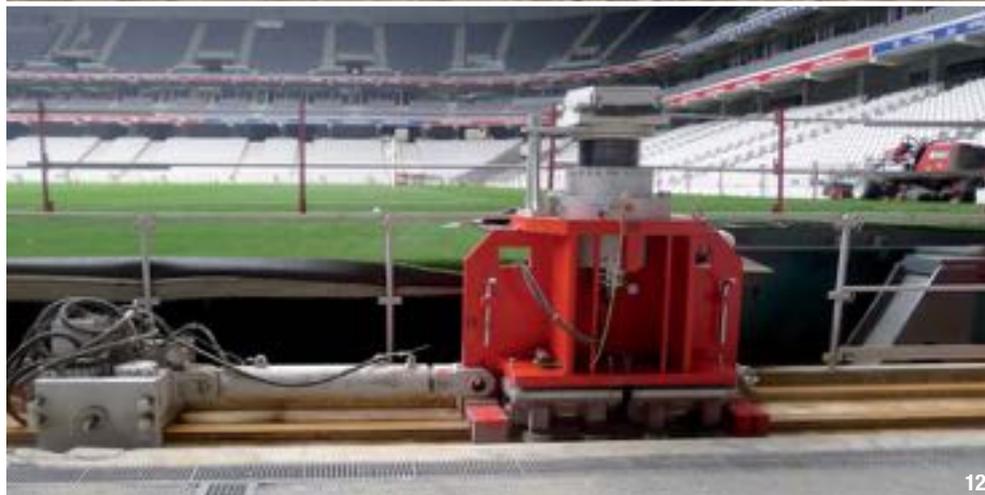
11- Translation trolley: from bottom to top, SED rollers, NFM chassis, Douce Hydro compensation jack, Maurer support.

12- Trolley and jack translation system with gripper (Douce Hydro).



11

© PHOTOTEQUE EIFFAGE TP - DR



12

© PHOTOTEQUE EIFFAGE TP - DR



13

© ELISA / VALODE ET PISTRE ARCHITECTES / ATELIER FERRET ARCHITECTURE / MAX LEROUGE

(hors travaux préparatoires) est de 80 minutes, soit une vitesse moyenne de 7 cm par minute.

LES BRAS DE TRANSFERT DE CHARGE (figure 9)

Une fois le plateau maintenu en position haute, les charges sont transférées vers les systèmes de translation décrits ci-dessous. La portée des poutres est alors augmentée de 72,31 m à 78,70 m, au moyen de bras pivotants. Ceux-ci sont fixés dans la prolongation des poutres treillis, les bras en position ouverte sont dans le plan de celles-ci. Ces bras, d'une masse unitaire de 12 tonnes, sont déplacés par l'intermédiaire d'un bracon pourvu d'une crémaillère. Comme ces bracons assurent le transfert de l'effort moteur de translation, ils sont verrouillés dans la membrure basse de la poutre de rive ; la broche est déplacée par un vérin électrique. (figure 10).

À la fin de l'assemblage de chaque bras sur la poutre de rive, celui-ci a été éprouvé à la charge maximale admis-

13- 11 Septembre 2012 : le plateau mobile ouvert en position de stockage dans les coulisses de la boîte à spectacles.

14- Groupe de puissance lors de la première installation.

15- Plateau en cours de translation.

13- 11 September 2012: The moving platform open in storage position behind the scenes of the "entertainment box".

14- Power generating set at first installation.

15- Platform during translation.

sible du vérin de compensation soit 300 tonnes.

Les bras sont commandés par groupes de 6 ; chacun des 4 groupes s'ouvre en moins de 5 minutes.

LES CHARIOTS DE TRANSLATION

Dès que les bras sont dépliés et verrouillés, le plateau est descendu sur les chariots de translation. À chaque bras a été appairé un chariot. Celui-ci est constitué d'une charpente mécanosoudée, qui repose par 4 rouleurs SED Vv-AsH (150 t de capacité unitaire) sur un caisson mécanosoudé, lui-même porté par une longrine béton armée fondée sur pieux. En partie haute du chariot, un vérin de compensation permet de corriger les différences géométriques de la voie ; comme pour les vérins de levage, les vérins de compensation sont dotés d'appuis sphériques Maurer pour compenser les rotations durant les phases de transfert et/ou de dilatation. (figure 11).

Les chariots sont liaisonnés hydrauliquement par ensembles de 6.

En phase de translation, le plateau repose donc sur 4 ensembles en équilibre hydraulique.

Ici encore, la sécurité structurelle a conduit à surdimensionner les équipements : en cas d'incident, il est possible de déposer l'un des chariots et de poursuivre la translation avec 11 chariots au lieu de 12 par côté.

LES SYSTÈMES DE POUSSÉE

Le déplacement horizontal, d'une course totale de 65 mètres, est assuré par deux ensembles de 6 vérins pousseurs par côté (figure 12), associés à des pinces. Ces vérins de 900 mm de course sont entraînés par des groupes de puissance hydraulique embarqués sur des remorques trainées par le plateau (figure 14). Le cycle de poussée se décompose en 4 temps :

- Ouverture de la pince,
- Extension (réciproquement rétraction) du vérin,
- Fermeture de la pince,
- Rétraction (réciproquement extension) du vérin.



14

© PHOTO TÔQUE EIFFAGE TP - DR



15



© ELISA / VALODE ET PISTRE ARCHITECTES / ATELIER FERRET ARCHITECTURE / JÉRÔME POUILLE

Chaque cycle dure de l'ordre de 70 secondes pour un pas de 900 mm environ ; compte tenu des recalages nécessaires pour éviter la « mise en crabe », la translation dure au total 1 h 20 minutes environ. (figure 15).

À l'issue des premiers cycles d'ouverture, il a été constaté la possibilité de revoir le fonctionnement avec 5 vérins pousseurs par côté au lieu de six, dans une plage de pressions plus favorables à la durabilité des systèmes hydrauliques. Les programmes d'automate et les réglages ont donc été ajustés en conséquence ; la redondance de la fonction translation est donc assurée maintenant par un vérin de secours par côté.

AU BOUT DU PROCESSUS

Les dispositions développées ci-avant permettent d'assurer, de façon industrielle, le transfert du plateau de la

16- 20 juillet 2013 : concert inaugural « Diamond Tour » de Rihanna.

16- 20 July 2013: Rihanna's inaugural Diamond Tour concert.

position ouverte à la position fermée dans un laps de temps n'excédant pas 24 heures de travail cumulé, mise en configuration salle incluse. Les dispositions constructives et organisationnelles choisies permettent de garantir aux producteurs des spectacles et au LOSC, club résident, de trouver, à l'heure dite, l'ouvrage disponible pour leurs besoins. (figures 13 et 16). □

INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Elisa

ARCHITECTES : Valode et Pistre Architectes ; Atelier Ferret Architecture

ENTREPRISE GÉNÉRALE DE LA « BOÎTE À SPECTACLES » : Eiffage TP

MAÎTRE D'ŒUVRE DES SYSTÈMES : Ateim

SUIVI CONFORMITÉ DIRECTIVE MACHINES : Socotec Industrie

CONTRÔLE EXTÉRIEUR DES ÉTUDES DE STRUCTURES : Seco

ÉTUDES D'EXÉCUTION BÉTON ARMÉ : Bureau d'Études Structures Eiffage Construction

ÉTUDES D'EXÉCUTION STRUCTURE MOBILE : Setec TPI

INGÉNIERIE DE DÉTAIL, CALCULS ET FABRICATION DES ÉLÉMENTS MÉCANOSOUDES, MONTAGE : NFM Technologies

INGÉNIERIE DES SYSTÈMES HYDRAULIQUES, FOURNITURE ET MONTAGE DES COMPOSANTS, AUTOMATISME ET CONTRÔLE-COMMANDE : Oilgear Towler France

CALCUL, FABRICATION ET INSTALLATION DES VÉRINS : Douce Hydro

ABSTRACT

PIERRE MAUROY STADIUM IN LILLE: THE "ENTERTAINMENT BOX"

S. DANDOY, EIFFAGE TP - J.-B. DATRY, SETEC TPI - A. ZONCO, SETEC TPI

The field of the Pierre Mauroy Stadium can be partly moved: *the northern half fits in above the southern half, freeing up enough volume to create a 28,000-seat arena. The 4,500-tonne platform is raised by 5.60 metres and moved sideways by 65 metres, in a time not exceeding 12 hours. The entire system was designed, built and commissioned in a very short period of 45 months, at the same time as work was performed on the structure as a whole. Eiffage TP pooled the expertise of engineering structure contractors as well as specialists of industrial mechanical, hydraulic and automatic control solutions to create a unique structure.* □

EL ESTADIO PIERRE MAUROY EN LILLE: EL "PALACIO DE ESPECTÁCULOS"

S. DANDOY, EIFFAGE TP - J.-B. DATRY, SETEC TPI - A. ZONCO, SETEC TPI

El césped del estadio Pierre Mauroy puede desplazarse parcialmente: *la mitad norte se superpone en la mitad sur y deja libre un volumen que crea una Arena de 28.000 plazas. La plataforma de 4.500 toneladas se eleva 5,60 m y se traslada 65 m, en un tiempo no superior a 12 horas. El conjunto del sistema ha sido diseñado, realizado y puesto en servicio en el breve plazo de 45 meses, simultáneamente a la realización de toda la obra. Eiffage TP aunó los conocimientos de los constructores de estructuras y de los especialistas en soluciones industriales mecánicas, hidráulicas y de automatismo para realizar una creación única.* □



1
© OLIVIER AMSELLEM

LE STADE JEAN BOUIN À PARIS APPLICATION MAGISTRALE DU BÉTON FIBRÉ

AUTEUR : MICHEL MORGENTHALER AVEC L'AIMABLE CONTRIBUTION DES DIRECTEURS DE LA COMMUNICATION DE L'AGENCE RUDY RICCIOTTI ET DE L'ENTREPRISE LÉON GROSSE

« C'EST UN STADE AVEC LES PIEDS DANS LA CITÉ. C'EST UN STADE QUI FAIT LA OLA. C'EST UN STADE À L'IMAGE DE L'EFFORT, DE L'HUMOUR ET DE LA SENSIBILITÉ FRATERNELLE DU RUGBY. IL N'Y EN AURA PAS DEUX COMME LUI ! » RÉSUME SON ARCHITECTE RUDY RICCIOTTI. CE STADE COMPORTE 20000 M² DE RÉSILLE ARCHITECTONIQUE EN BÉTON FIBRÉ ULTRA HAUTE PERFORMANCE FORMANT UNE SURFACE GAUCHE QUI CONSTITUE LES FAÇADES ET LA TOITURE ÉTANCHE. CET ÉQUIPEMENT DE 20000 PLACES SERA POUR L'ESSENTIEL UTILISÉ PAR L'ÉQUIPE DE RUGBY DU STADE FRANÇAIS.

LE PARTI ARCHITECTURAL

L'implantation du stade est sensible à l'échelle du XVI^e arrondissement de Paris car il complète un dispositif d'équipements sportifs de haut niveau : Parc des Princes, hippodrome de Longchamp, Roland Garros, piscine Molitor. Également, il jouxte l'immeuble du 24, rue Nungesser-et-Coli,

construit par Le Corbusier en 1932 et classé monument historique en 1972 (figures 2 et 3).

Le stade Jean Bouin questionne de fait son environnement.

Dans ce contexte, quelle attitude adopter ? Un parti mettant le stade à distance ? Une symétrie parfaite du complexe sportif - allégorie naïve de la

rigueur sportive - au risque d'être en inadéquation avec un contexte urbain de qualité ?

Le parti architectural choisi préfère la poésie et le corps au dictat du fonctionnalisme et de l'effort.

L'asymétrie, l'ondulation ainsi que le fruit des façades sont synonymes de mouvement, d'effort qui ne sauraient

prendre corps au sein d'une enveloppe figée. Le bâtiment est sa propre clôture. L'absence de grille libère le stade d'une frontière physique et mentale en réconciliant le complexe sportif de haut niveau et son espace public.

Le contraste élégant entre volume bâti et délicatesse de la fine résille en béton laisse apparaître un véritable paysage



2

© OLIVIER AMSELLEM

1- Parement de résille BFUP en façade posée sur charpente métallique, vu depuis le déambuloire intérieur.

2- Vue depuis la pelouse de la tribune sud en fin de chantier.

3- Vue aérienne du stade Jean Bouin avec le Parc des Princes au bas de la photo.

1- UHPFRC lattice cladding on the facade placed on the steel structure, seen from the interior ambulatory.

2- View from the field of the southern grandstand at the end of the works.

3- Aerial view of the Jean Bouin Stadium with Parc des Princes at the bottom of the photo.



© AIR IMAGES
3

de toiture garant d'une relation sereine avec son environnement (figure 4). Les prospectifs, les gabarits, les accès, les services ont identifié une nouvelle typologie de stade à des altitudes variées et constituent un corps. La maille enveloppe le corps, en épouse la forme juste ; sans emphase. « La forme - selon l'architecte - n'est donc pas inspirée

mais révélée ; comme la fameuse photographie de Man Ray d'un corps nu enveloppé d'un textile translucide révèle un érotisme légitime ».

Au final, le projet de l'architecte Rudy Ricciotti est une « pièce urbaine structurante » s'intégrant parfaitement dans l'espace urbain. Offrant 20 000 places aux spectateurs, elle abrite 1 000 m²

de bureaux, 7 400 m² de commerces et un parking de 500 places (figure 6). L'ouvrage est habillé d'une résille en béton fibré BFUP (Béton de Fibres à Ultra Hautes Performances) de 20 000 m² supportée par une imposante charpente métallique. C'est la première fois au monde que le BFUP est mis en œuvre dans de telles quantités.

LE GROS ŒUVRE

Les fondations du parking enterré ont été réalisées à l'abri d'une paroi berlinoise complexe.

L'ouvrage compte de nombreux voiles de grande hauteur, des poteaux inclinés, des poutres précontraintes, 12 km de gradins préfabriqués, des escaliers et de nombreux planchers. ▷



4

© AGENCE RUDY RICCIOTTI

Les gradins sont supportés par 74 crémaillères en béton. En partie est, le bâtiment est réalisé en encorbellement au-dessus du périphérique. Pour la fourniture des bétons, le chantier a choisi d'installer deux centrales foraines qui produisaient 80 % des bétons de type C40 procurant une excellente qualité de parement.

LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

La charpente métallique est constituée de 74 fléaux en acier S355 galvanisé, disposés en auvent au-dessus des gradins (figures 7 et 8). Ils sont formés d'une partie quasi horizontale en treillis Warren et d'un poteau caisson prenant appui sur une poutre crémaillère qui participe à la stabilité des fléaux en faisant office de jambe de force. Ces fléaux sont tous différents (aucune répétitivité, sauf 5). Les travaux de montage de la charpente ont été réalisés à l'aide d'une grue treillis de 200 t de capacité. Les interférences entre les cinq grues à tour et la grue mobile étaient gérées par le système anti-collision AGS, unique au monde. La réalisation de la charpente a demandé une précision extrême avec des tolérances de l'ordre du millimètre pour l'implantation des platines de pré-scelllement et la pose des poteaux caissons et des fléaux.

LA PEAU EN BFUP, UNE PREMIÈRE MONDIALE DANS LES GRANDES LIGNES

Le stade Jean Bouin est entièrement enveloppé d'une résille de 20 000 m² de BFUP (figure 1).

C'est la première fois que ce matériau est mis en œuvre structurellement en quantité aussi importante. Le BFUP est un béton innovant mis au point en France dans les années quatre-vingt-dix. Il présente une granulométrie parfaite mélangée à des fibres métalliques, complétée par un fort dosage en ciment adjuvanté. Les bétons fibrés affichent des caractéristiques exceptionnelles

à divers titres : une résistance à la compression supérieure à 130 MPa, une résistance à la flexion supérieure à 40 MPa, une parfaite étanchéité à l'eau et une durée de vie de 100 ans.

PRINCIPES TECHNIQUES

C'est le bureau d'études Lamoureux & Ricciotti ingénierie qui a assuré, de 2007 à 2013, la conception et l'étude technique de la couverture et des façades du stade Jean Bouin.

4- Vue d'artiste en phase concours.

5- Résille BFUP de façade.

4- Artist's view in the design contest phase.

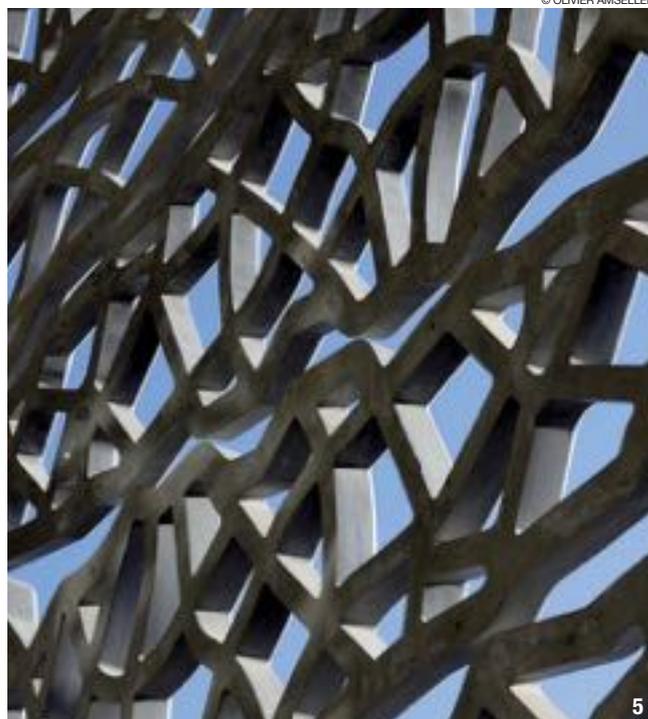
5- Facade UHPFRC lattice.

Les problématiques classiques de la couverture de stade (peau architectonique, morphologie à double courbure variable, transparence, étanchéité, drainage et récupération des eaux, acoustique, économie, durabilité) ont toutes été abordées ici de façon innovante : dans le choix des matériaux et des procédés constructifs, mais aussi au travers des méthodologies de calcul et de conception, avec des validations théoriques et expérimentales (figure 9). Ces principes innovants sont toujours restés fidèles aux objectifs essentiels de sécurité du travail tant pour la construction que pour l'entretien, avec un respect des performances économiques et une optimisation des impacts environnementaux et sociaux.

Concrètement, la mise au point d'un composant constructif élémentaire en BFUP et en verre a permis d'aboutir à une résolution "monolithique" et donc très homogène de ces différents objectifs (figure 10). La charpente métallique forme une structure primaire uniquement. L'ensemble de la couverture est constitué d'une seule épaisseur constructive, intégrant de façon monolithique les différentes fonctions de l'enveloppe, à savoir : la structure secondaire et tertiaire, le verre, l'imperméabilité et le drainage des eaux, ainsi que la peau acoustique et architectonique finie.

L'ambition architecturale de l'enveloppe du stade peut se résumer ainsi : une nappe à double courbure, autoportante, imperméable et drainant les eaux, permettant de confiner les chants du public à l'intérieur du stade tout en formant une résille architectonique en dentelle filtrant la lumière.

Dès le démarrage des études, le choix de matériau s'est porté sur l'utilisation raisonnée des bétons de fibres à ultra hautes performances (BFUP) en tant que matériau de structure mais aussi en matériau d'enveloppe (figure 5). Initialement, ce matériau trouve son



© OLIVIER AMSELLEM

5

LA RÉSILLE EN BÉTON FIBRÉ

La résille en béton fibré du nouveau stade Jean Bouin ouvre, dans un espace concentré, un dialogue entre trois générations d'architectes. LE CORBUSIER a choisi le béton armé pour son immeuble de la rue Nungesser-et-Coli en 1932, ROGER TAILLIBERT a retenu le béton précontraint pour le Parc des Princes en 1972 et aujourd'hui, en 2013, c'est avec du béton fibré que RUDY RICCIOTTI recouvre le stade Jean Bouin.

intelligence dans l'optimisation de la granulométrie. La base cimentaire et granulaire présente ainsi un empilement très compact annulant statistiquement toute connexion des pores. Le premier corollaire de cette propriété fondamentale est la très grande résistance à la compression du béton. L'ajout de fibres métalliques permet l'obtention d'un matériau à la fois ductile et résistant en compression et en traction. Le deuxième corollaire est la porosité nulle rendant le matériau étanche dans sa masse, impénétrable aux agressions chimiques courantes et donc extrêmement durable même sans protection complémentaire.

6- Stade Jean Bouin, Parc des Princes, Tour Eiffel.

7- Gradins couverts - tribune sud.

8- Pose des triangles en BFUP constituant le toit imperméable.

6- Jean Bouin Stadium, Parc des Princes, Eiffel Tower.

7- Covered terraces - southern grandstand.

8- Placing of UHPFRC triangles forming the waterproof roof.



© AIR IMAGES

LES TRIANGLES

Sur le projet, en termes morphologiques, la résolution géométrique du mouvement de "Ola" du stade se présente sous la forme d'un maillage à facettes triangulaires régulières

d'environ 10 m². Chaque facette plane repose sur ses trois sommets et peut ainsi s'appuyer sur n'importe quelle génératrice de surface à double courbure, absorbant naturellement tous les défauts de fabrication et de pose. Le

squelette primaire de l'enveloppe a été imaginé en acier : 74 fléaux quasi-radiaux en poutres treillis à inertie variable (figure 11).

Leur entraxe varie de 6 à 11 mètres. Ils sont équipés d'un chéneau principal de récupération des eaux pluviales formant mécaniquement l'aile supérieure de la poutre treillis. Les panneaux de couverture et de façade s'appuient sur ce support via une statique minimale. Toutes les translations et rotations relatives sont libérées à cette interface, de façon à déconnecter tous mouvements parasites (vent, pose, réglages, effets thermiques) entre l'enveloppe et la charpente : autrement dit, que la peau et le squelette restent durablement compatibles. Cet isostatisme de la peau est obtenu en fixant les panneaux triangulaires sur la charpente primaire par trois biellettes antagonistes en inox qui permettent d'absorber toutes les déformations différentielles du support. Sur cette base, le bureau d'étude et l'architecte ont décomposé et calepiné l'enveloppe en 3 450 panneaux triangulaires couvrant sur 11 000 m² les tribunes et habillant sur 10 000 m² la façade du stade.

Ces triangles quasi-isocèles ont un angle au sommet fixé à 8°, 10°, 12° et 16° tout en conservant une base toujours inférieure à 2,40 m pour permettre le transport à plat des éléments (figure 12). Ce principe a permis la réduction du nombre de moules en faisant varier uniquement la jouée de moule coffrant la base des triangles. ▷

© OLIVIER AMSELLEM

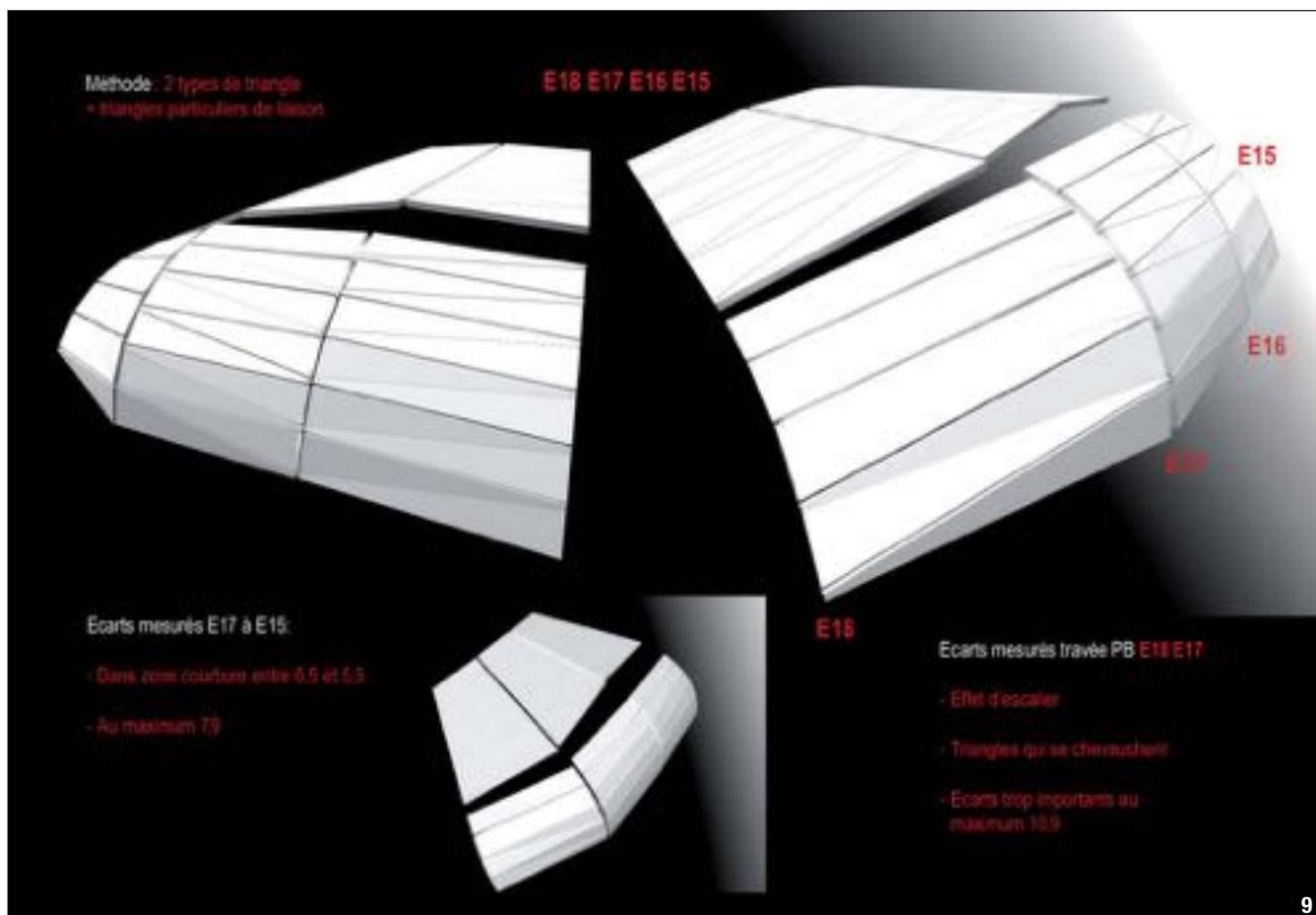


7

© LÉON GROSSE



8



© AGENCE RUDY RICCIOTTI

Également, il a permis un raffinement du maillage naturel pour les zones à fortes courbures. Les 1 428 panneaux de façade sont des panneaux de brins d'épaisseur variant de 8 cm à 20 cm selon l'inclinaison, la portée et la force du vent. Les 330 panneaux de transition, situés entre la façade et la toiture dans une zone à forte variation de courbure dans les 3 directions, sont des plaques de 35 mm d'épaisseur, nervurées et percées d'ouvertures. Ces ouvertures sont de formes intermédiaires entre les évidements de la façade et ceux de la couverture (figure 13).

Enfin, les 1 596 panneaux de toiture qui ont un rôle plus complexe, protègent les spectateurs de la pluie et drainent les eaux jusqu'au caniveau des fléaux métalliques. Ils sont constitués en un seul coulage d'une plaque de 10 m² environ, d'épaisseur 35 mm, et nervurée en périphérie avec une retombée de 165 mm. À l'instar des panneaux de transition, les plaques sont percées. Les alvéoles de verre, de 9 types différents, sont incorporées avant le coulage, l'épaisseur du vitrage étant intégrée dans celle de la plaque avec un nu

aligné sur le nu extérieur des panneaux (figure 14).

Pour assurer la compatibilité parfaite entre verre et béton (résilience mécanique et thermique, barrière chimique entre silices et alcalins, étanchéité à l'eau) un joint élastomère a été spécialement conçu (epdm puis silicone) s'apparentant à une "chambre à air" et enveloppant la périphérie des alvéoles de verre. Grâce à la définition

mécanique très précise des liaisons cinématiques de l'enveloppe, ce joint entre verre et béton devient parfaitement opérant sur toute la surface de l'enveloppe. Une feuillure en sous-face de verre est réservée naturellement par la différence d'épaisseur entre verre (18 mm) et BFUP (35 mm) pour permettre le changement éventuel d'une alvéole, en utilisant cette fois les techniques VEC (Vitrage Extérieur Collé).

IMPERMÉABILITÉ ET DRAINAGE

Pour drainer les eaux superficielles et assurer la jonction géométrique entre panneaux, les nervures ont été structurées au coulage en forme de chéneaux mâle et femelle emboîtables tout en conservant des inerties à la flexion équivalentes. Le BFUP étant étanche, l'entoilage des plaques nervurées forme alors un réseau de drainage et de récupération des eaux à section hydraulique



10 © BERIM

9- Assemblage de triangles en phase de conception.

10- Triangles en BFUP avec inclusions de verre.

9- Assembly of triangles in the design phase.

10- UHPFRC triangles with glass inclusions.



© LÉON GROSSE
11

spécifiquement calculée pour toutes les situations de pente et de courbure. Une étude hydraulique complète a été réalisée pour concevoir le drainage général de la couverture : chéneaux des panneaux BFUP, caniveaux principaux métalliques sur les fléaux et en périphérie côté pelouse, boîtes à eau de récupération en tête de façade. À la pose, des joints compressibles et des cales ont permis une imbrication

contrôlée des panneaux de proche en proche à l'instar d'une couverture de tuiles, tout en réservant un joint de 25 mm constant permettant l'entretien des chéneaux.

ESSAIS ET VALIDATION

Face cette conception innovante, maître d'ouvrage et maître d'œuvre ont fait le choix d'éprouver, dès la phase de l'avant projet, la réalité technique et

réglementaire du projet. Une ATEEx (Appréciation Technique d'Expérimentation) de conception auprès du CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) a ainsi été menée en amont de la consultation des entreprises, de manière à en soustraire un maximum d'aléas techniques, réglementaires et économiques ou encore liés au planning. Cette ATEEx portait sur la conception générale de la toiture avec

un focus particulier sur le système d'inclusion des verres au coulage. En plus d'un dossier d'études complet (plans, notes de calculs, études de mouvements, hydraulique), le laboratoire du CSTB a réalisé une batterie d'essais sur des prototypes de triangles nervurés à l'échelle 1/1 (8,2 m x 2,4 m) : essais de fatigue au vent (78 000 cycles de flexion), chocs thermiques et mécaniques, vieillissement accéléré par gel/dégel avec variation d'hygrométrie, décapsulage des verres et enfin ruine des panneaux. Chaque essai a été suivi d'une mise en eau sur 10 cm de hauteur pour valider l'imperméabilité. L'ATEEx obtenue ainsi en amont a permis de garantir, outre la confiance des entreprises, l'assurabilité de l'ouvrage tout en simulant 50 à 100 ans de vieillissement. En phase chantier, l'ATEEx a été reconduite à l'identique, par l'entreprise Léon Grosse et son pré-fabricant Bonna Sabla, avec les mêmes conclusions favorables.

Conceptuellement, l'intégration de toute la complexité du programme de l'enveloppe en un seul composant, permet de limiter le nombre d'interfaces, d'assemblages et donc de points faibles. ▷

11- Vue aérienne du chantier - tribune sud.

12- Manutention d'un triangle de 10 m².

11- Aerial view of the works - southern grandstand.
12- Handling a 10 m² triangle.



© LÉON GROSSE
12



13

© NANICK GUIHODO

BILAN TECHNIQUE, ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTAL

D'un point de vue environnemental, on tire pleinement bénéfice des performances mécaniques des BFUP en utilisant moins de 1 000 m³ de ce matériau pour la totalité du stade, soit moins de 43 mm par m² de couverture.

En conséquence, les indicateurs environnementaux simplifiés (gwp, énergie grise, eau) permettent de valider l'efficacité environnementale de cette conception au regard des solutions plus classiques.

Le décalage est d'autant plus grand que l'on intègre la durée de vie en œuvre de l'ouvrage sans maintenance lourde. De même, l'efficacité écono-



14

© OLIVIER ANSELLEM

13- Vue du chantier - tribune sud-ouest face au Parc des Princes.

14- Vue rapprochée des triangles, de leurs inclusions en verre et des anneaux de manutention.

13- View of the works - South-west grandstand opposite Parc des Princes.

14- Close-up view of the triangles, their glass inclusions and the handling rings.

CALCULS ENVIRONNEMENTAUX COMPARATIFS SUR 3 SOLUTIONS DE COUVERTURE

1. STRUCTURE ACIER / VERRIERE

Charpente en HEA 180 en remplacement des nervures BFUP (1 par triangle)
 Profilés d'armature en aluminium pour fixation des verres.
 Verres sérigraphiés en remplacement des panneaux BFUP de 35 mm

Structure acier/verrière

	Quantité (m3)	Quantité (t)	Energie Primaire (GJ)	Consommation Eau (m3)	GES* (kg eqv CO2)
Charpente acier HEA180	132	1021	2840	2841	800960
Profilés Aluminium	32	85,30	2182	830	87912
Verre	906	1290	1969	22375	158700
TOTAL			6991	31516	967572

2. STRUCTURE ACIER / BARDAGE ACIER / VERRE

Charpente en HEA 180 en remplacement des nervures BFUP (1 par triangle)
 Couverture double peau en bardage métallique thermolaqué
 Verres inclus dans des cadres aluminium rapportés

Structure acier + cadres aluminium

	Quantité (m3)	Quantité (t)	Energie Primaire (GJ)	Consommation Eau (m3)	GES* (kg eqv CO2)
Charpente acier HEA180	132	1021	2840	2841	800960
Bardage acier de couverture	32	176	4066	460	81500
Cadres autour verre	13	34	852	379	34787
Verre	112	160	497	5113	36600
TOTAL			8255	3873	938547

3. STRUCTURE BFUP / VERRE SOLUTION RETENUE

Panneaux BFUP nervurés de forme triangulaires (2 nervures par triangle)
 Inclusion de verre directement au collage ou bien par collage sur feuillure

Structure seule BFUP

	Quantité (m3)	Quantité (t)	Energie Primaire (GJ)	Consommation Eau (m3)	GES* (kg eqv CO2)
BFUP	1261	3127,9	8281,62	12810	286600
Acier armature	173395/1262	138	1613,67888	3487,27684	48787,0811
Verre	112	280	4267,2	3012	220600
TOTAL			14162	20108	348540

COMPARAISON DES SOLUTIONS

Cette étude comparative met très clairement en exergue l'intelligence environnementale du BFUP. En effet, on constate que l'énergie primaire nécessaire à la réalisation de la solution BFUP est 3 fois moins importante que celle nécessaire à la solution bardage acier et 5 fois moins importante que celle utilisée par la solution verrière. De plus les consommations d'eau et les émissions de CO2 sont entre 1,5 à 2 fois moins importantes pour la solution BFUP.

On peut synthétiser ces résultats par l'indice de pollution des 3 solutions :

Indices de pollution

	Solution BFUP/verre	Solution Charpente acier/Bardage Acier/verre	Solution Charpente acier/verrière
Energie primaire	1	3,3	4,9
Consommation Eau (m3)	1	1,8	3,7
GES* (kg eqv CO2)	1	1,4	1,8

L'efficacité environnementale est améliorée de 40 à 500% suivant les critères, cette amélioration ne prend de plus pas en compte la notion de durée de vie en œuvre sans maintenance lourde, d'avantage favorable à cette conception de couverture.

mique (600 €/m² pour tout le complexe hors fléaux de charpente métallique) est d'autant plus décisive que la durée de vie en œuvre est grande et que ces matériaux ne nécessitent pas de réfection d'étanchéité ou de protection anti-corrosion. Enfin, les filières de construction actives pour ce chantier ne sont pas basées principalement sur l'importation des matériaux ou des techniques. Elles sont, au contraire, des filières locales, régionales, avec des dépenses de travaux territorialisées dans un rayon de 50 km. Ces techniques sont de plus portées par des métiers et des savoir-faire de haut niveau qui promettent d'être pérennes et d'échapper à la délocalisation. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

- MAÎTRE D'OUVRAGE :** Ville de Paris, Direction de la Jeunesse et des Sports
- CONDUCTEUR D'OPÉRATION :** Ville de Paris, Direction du Patrimoine et de l'Architecture
- MAÎTRISE D'ŒUVRE :** Cabinet Rudy Ricciotti, architecte mandataire / chef de projet : Christophe Kayser / architecte « enveloppe » : Attila Varga / Directeur des travaux : Gérard Le Goff
- BET INGÉNIERIE TCE :** Berim
- BET ENVELOPPE :** Lamoureux & Ricciotti Ingénierie
- BET CHARPENTE MÉTALLIQUE :** Groupe Alto
- ENTREPRISE :** Léon Grosse titulaire du macro-lot structure (terrassements, soutènements, fondations, béton armé et précontraint, charpente métallique, couverture BFUP, étanchéité des gradins)
- SOUS-TRAITANT BFUP PRÉMIX :** Lafarge Ductal
- SOUS-TRAITANT BFUP PRÉFABRICANT :** Bonna Sabla
- SOUS-TRAITANT CHARPENTE :** Cabrol

CHIFFRES

- CAPACITÉ :** 20 000 places
- MARCHÉ PUBLIC EN LOTS SÉPARÉS :** 93 millions d'euros HT
- MACRO-LOT STRUCTURE :** 58 millions d'euros
- DÉLAI :** 30 mois
- SHOB :** 70 000 m²
- TERRASSEMENTS :** 100 000 m³
- ACIERS HA :** 2 565 t
- ACIERS TS :** 872 t
- BÉTON :** 33 000 m³
- CHARPENTE :** 2 500 t
- BFUP :** 20 000 m²
- GRADINS :** 12 km

ABSTRACT

JEAN BOUIN STADIUM IN PARIS MASTERLY APPLICATION OF FIBRE-REINFORCED CONCRETE

MICHEL MORGENTHALER

The Jean Bouin Stadium is contained in a shell consisting of more than 20,000 m² of panels in UHPFRC (ultra-high-performance fibre-reinforced concrete). This shell in the form of a warped surface is structural, forming both the facade and the watertight roof. The design is based on efficient exploitation of the properties of UHPFRCs, which permit real simplification of the construction processes for such a complex surface. The UHPFRC shell combines several functions in a single layer: primary structure, secondary structure, skin and architectonic appearance. The panels are fully prefabricated in factory and then installed in a single operation. An innovative technique for the inclusion of glass parts in the UHPFRC panels during prefabrication was validated by the French building scientific and technical research centre CSTB. Finally, the reduction in the total volume of material due to the high performance of UHPFRCs results in an exceptionally small environmental footprint. □

EL ESTADIO JEAN BOUIN DE PARÍS APLICACIÓN MAGISTRAL DEL HORMIGÓN FIBRADO

MICHEL MORGENTHALER

El estadio Jean Bouin está contenido en un envoltorio formado por más de 20.000 m² de paneles de hormigón de alto rendimiento reforzado con fibras (UHPFRC - Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes). Este envoltorio en forma de superficie alabeada es estructural, formando a la vez la fachada y la cubierta estanca. El diseño procede de una explotación eficaz de las propiedades de los UHPFRC, que simplifican notablemente los procesos de construcción de una superficie de tal complejidad. El envoltorio de UHPFRC combina varias funciones en una única capa: estructura primaria, estructura secundaria, piel y aspecto arquitectónico. Todos los paneles vienen prefabricados de origen y se instalan en una sola operación. Se ha empleado una técnica innovadora de inclusión de piezas de vidrio en los paneles de UHPFRC durante la prefabricación, previamente validada por el Centro Científico y Técnico francés de la Construcción (CSTB). Finalmente, la reducción del volumen total de material fruto del alto rendimiento de los UHPFRC se traduce en una huella medioambiental excepcionalmente baja. □



ALLIANZ RIVIERA À NICE UN STADE VERT SUR LA GRANDE BLEUE

AUTEURS : GENEVIÈVE FEIDT, MAÎTRE D'OUVRAGE, DIRECTRICE DE PROGRAMMES, ADIM CÔTE D'AZUR - LAURENT CHABAUD, DIRECTEUR DE PROJET, DUMEZ CÔTE D'AZUR - VINCENT RIGOUX, DIRECTEUR DE PROJET CHARPENTE VINCI CONSTRUCTION FRANCE - AURÉLIEN GAYRARD-BOUZEREAU, DIRECTEUR DE TRAVAUX DANS LE SOUS-GROUPEMENT GÉNIE CIVIL, GTM SUD

PREMIER DES TROIS STADES MIS EN CHANTIER PAR VINCI DANS LA PERSPECTIVE DE L'EURO-UEFA 2016 DE FOOTBALL, LE GRAND STADE DE NICE, DEVENU ALLIANZ RIVIERA EN 2012, A ÉTÉ RÉALISÉ DANS LE CADRE D'UN PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ (CONTRAT DE PARTENARIAT). VINCI, QUI EN A ASSURÉ LE FINANCEMENT, LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION DANS LE DÉLAI TRÈS COURT DE 33 MOIS (DÉCEMBRE 2010-FIN AOÛT 2013) A DÉSORMAIS LA CHARGE DE SON EXPLOITATION ET DE SA MAINTENANCE SUR 27 ANS. LA LIVRAISON DE L'OUVRAGE PUIS SON INAUGURATION LE 22 SEPTEMBRE DERNIER ONT MARQUÉ LE TERME D'UNE EXCEPTIONNELLE MOBILISATION DES HOMMES ET DES MOYENS.

1- Charpente composée de 3 630 t de métal et 4 000 m³ de poutres en bois lamellé-collé.

2- Vue d'ensemble de l'Allianz Riviera.

1- Frame formed of 3,630 tonnes of metal and 4,000 m³ of glued laminated timber beams.

2- General view of the Allianz Riviera.



2
© FRANCIS VIGOUROUX

ement, la construction, l'exploitation et la maintenance pendant 27 ans du stade proprement dit et la réalisation du Musée national du sport et d'un programme immobilier d'accompagnement (PIA).

Une exigence centrale du cahier des charges portait sur l'exemplarité du projet en termes de développement durable. Au-delà de sa mission première - remplacer le vieux stade du Ray, soutenir les ambitions sportives de l'OGC Nice (Olympique Gymnaste Club), accueillir en 2016 les matchs de la 15^e édition du championnat d'Europe des Nations, le futur grand stade est en effet l'un des projets phares de l'Éco Vallée de la plaine du Var. Ce programme d'aménagement, l'un des 13 ayant reçu dans l'Hexagone le label opération d'intérêt national (OIN), est porté par la métropole Nice Côte d'Azur, le conseil régional Provence Alpes Côte d'Azur, le conseil général des Alpes-Maritimes et les deux intercommunalités de la plaine du Var. Il porte sur un territoire de 10 000 ha où il a l'ambition d'appliquer exemplairement les orientations du Grenelle de l'environnement, c'est-à-dire concilier protection de l'environnement et de la biodiversité, économies d'énergie, développement de l'activité et création d'emploi, dans un schéma d'aménagement maîtrisé. ►

La capacité de 35 000 places du grand stade de Nice (figures 2 et 3) était une condition de son éligibilité à l'Euro-UEFA. Ceci posé, la première chose que l'on en a su, lorsque Christian Estrosi, le député-maire de la ville, a relancé le projet en octobre 2008, c'est qu'il devrait être livré « au plus tard à l'été 2013. » Pour les candidats, la brièveté du délai s'est ainsi imposée comme la donnée d'entrée du projet. Puis celui-ci s'est précisé.

En octobre 2009 a été lancé l'appel d'offres pour la conception, le finan-

LE MODÈLE ÉCONOMIQUE

Le contrat de partenariat, forme contractuelle retenue par la ville de Nice pour l'Allianz Riviera, protégera NES (VINCI Concessions) contre les risques d'exploitation caractéristiques des ouvrages en concession, puisqu'elle va de pair avec le versement d'une redevance pendant toute la durée du contrat. Celle-ci se chiffre la première année à 11 M€, dont 4 M€ apportés par l'OGC. VINCI encaissera par ailleurs une redevance annuelle de 1,8 M€ au titre du contrat de naming signé avec Allianz France pour une durée de neuf ans. Pour équilibrer ses recettes, NES devra réaliser 5 M€ de résultat opérationnel sur les spectacles et les manifestations qu'il organisera.



3

© FRANCIS VIGOUROUX

Comme d'autres programmes (quartiers d'affaires Grand Arenas ; technopole urbaine Nice Meridia, etc.), le stade, qui est implanté à Saint-Isidore, un quartier de l'arrière-pays distant de 5 km de l'aéroport international Nice - Côte d'Azur, a donc vocation à générer activité et développement (figure 4). Ce sera la mission première de l'exploitant, avec l'organisation de spectacles, de manifestations culturelles, d'événements d'entreprise, etc., et c'est aussi le rôle dévolu au PIA, qui prévoit l'aménagement d'un centre de commerces, de loisirs et de restauration de 29 000 m² (30 commerces) situé pour partie sous le parvis d'accès au stade et sur deux niveaux, en prévision de la construction, en bordure du stade, du futur écoquartier de la plaine du Var (10,6 ha).

UNE CHARPENTE 3D DANS UN CHAUDRON

Le projet proposé par Vinci associé à l'architecte Jean-Michel Willmote s'est attaché à répondre à haut niveau à toutes ces exigences. Afin de faire de l'ouvrage un « fragment de ville » et de l'intégrer dans le paysage, l'architecte l'a établi à cheval sur la vaste esplanade qui sera l'axe structurant du nouveau quartier. Il y inscrit d'autant mieux son profil compact, « en chaudron », qu'il revêtira une enveloppe d'ETFE (éthylène tétrafluoroéthylène) laissant transparente sa charpente tridimensionnelle. Outre sa contribution majeure sur le

plan esthétique, celle-ci répond directement à l'exigence de réduction du bilan carbone du projet, puisqu'elle associe, en première mondiale à cette échelle, 3 630 t de métal et 4 000 m³ de poutres en bois lamellé-collé (figure 5) représentant une économie de 3 000 t d'émissions de CO₂. Autres illustrations de la démarche d'écoconception appliquée au projet : l'installation de 8 500 m² de panneaux photovoltaïques sur la toiture du stade, qui permettront au stade de produire environ trois fois plus d'énergie qu'il n'en consomme

3- Une capacité de 35 000 places.

4- Le stade Allianz Riviera, la mer n'est pas loin.

3- A seating capacity of 35,000.

4- The Allianz Riviera Stadium, not far from the sea.

© FRANCIS VIGOUROUX



4

(figure 6) ; son dispositif de récupération des eaux pluviales pour l'alimentation des sanitaires et l'arrosage de la pelouse ; son système de climatisation exploitant les vents dominants du site et son chauffage par géothermie. Après avoir été déclaré attributaire prescrite le 11 octobre 2010, la société de projet Nice Eco Stadium (NES), composée de Vinci Concessions (50%), de la Caisse des dépôts (25%) et de SEIEF-Dexia (25%), s'est officiellement vu confier le projet dans le cadre d'un contrat de partenariat entré en vigueur le 10 février 2011 - « un succès principalement dû à la façon dont nous avons structuré la démarche de conception autour des enjeux environnementaux qui étaient l'attente prioritaire de la ville », juge Xavier Lortat-Jacob, le directeur général de NES. Il restait donc 31 mois pour « mettre le projet en musique » (mener les études de conception, réaliser et faire valider les plans d'exécution, lancer les demandes d'autorisations auprès des organismes concernés, obtenir les homologations) - et construire.

UNE TASK FORCE POUR FACILITER ET ACCÉLÉRER LES DÉCISIONS

Telles ont été les missions d'Adim, structure de développement immobilier de Vinci Construction France, dans le rôle de promoteur et de maître d'ouvrage, et d'un groupement travaux divisé en trois sous-groupements res-



© FRANCIS VIGOUROUX

pectivement chargés du génie civil et principalement constitué d'entreprises de Vinci Construction France (Dumez Côte d'Azur, GTM Sud, Campenon Bernard TP Côte d'Azur, Triverio Construction, GTM TP Côte d'Azur, Garelli) ; de la charpente (Fargeot Lamellé-Collé, SMB Constructions métalliques) ; et des lots techniques (Vinci Énergies).

« Le premier travail a consisté à mettre sur pied une véritable task force et à nous organiser », indique Laurent Chabaud, le directeur de projet. La présence sur le site de tous les acteurs - maîtrise d'ouvrage, architecte, bureaux d'études, bureaux de contrôle, équipes travaux - a été la clé de prises de décisions rapides, indispensables puisque l'exécution a été lancée en moins de sept mois, le 1^{er} août 2011, alors que le « PRO » n'était pas entièrement finalisé. Or l'opération se révélait complexe tant en conception qu'en réalisation. La trame choisie par l'architecte (10 m au lieu de 7,50 m pour ce type d'ouvrage) a eu un fort impact sur le dimensionnement des ouvrages, les quantités de matériaux et les méthodes. Le délai - encore lui - a imposé des dispositions particulières pour parvenir à l'objectif de bétonnage de 90 000 m³ en 12 mois. Enfin, c'est toute la mise au point de la charpente, initialement prévue entièrement en bois, qu'il a fallu reprendre pour tenir compte des sollicitations courantes (vent, pluie, neige), et plus encore des contraintes sismiques liées au site.

5- La charpente métal-bois apparaît sous la couverture transparente en ETFE (éthylène tétrafluoroéthylène).

6- Sur la toiture du stade, 8 500 m² de panneaux photovoltaïques.

5- The steel-timber frame can be seen under the transparent ETFE (ethylene tetrafluoroethylene) covering.

6- On the roof of the stadium, 8,500 m² of photovoltaic panels.

© FRANCIS VIGOUROUX



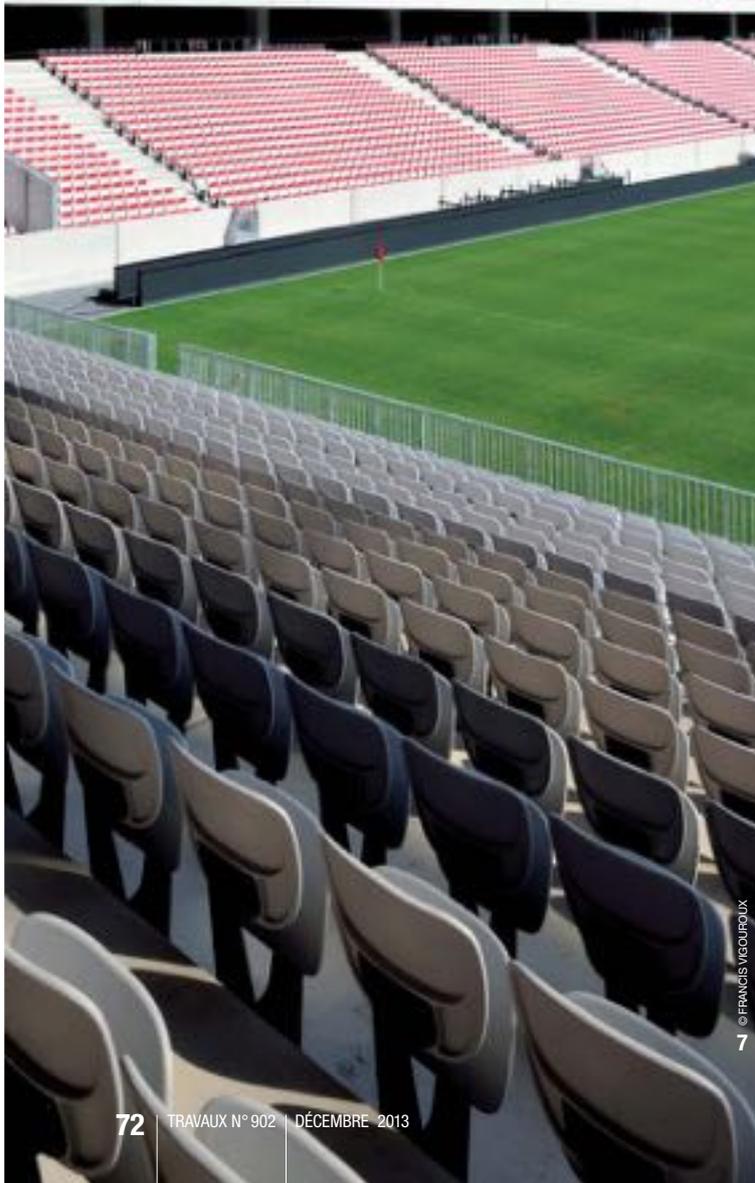
S'agissant du génie civil, la brièveté du délai et l'importance des volumes de béton à produire ont conduit à prendre plusieurs types de dispositions, « car dans un schéma d'organisation classique, il aurait fallu au moins deux ans et non pas un pour réaliser le chantier », souligne Aurélien Gayraud-Bouzeureau, directeur de travaux dans le sous-groupement génie civil.

Le chantier a donc été découpé en six sous-chantiers, chacun mené de façon indépendante sous une grue à tour par une équipe dédiée, en deux postes et, à partir de mars 2012, en trois postes, vingt-quatre heures sur vingt-quatre. Deuxième série de mesures : l'utilisation d'un béton spécifié offrant en plus d'une teinte claire uniforme une forte

résistance au jeune âge, afin d'accélérer les phases de décoffrage, et le choix de confier sa fabrication (d'après une formulation établie par François Cussigh, l'expert béton de Vinci Construction France) à trois fournisseurs locaux, seule solution permettant de répondre au besoin, car au pic d'activité, le volume quotidien moyen de bétonnage a atteint jusqu'à 450 m³ (minimum 7 000 m³ mensuels sur neuf mois consécutifs). Enfin, une large place a été faite à la préfabrication : poutres, gradins, coursives de tribunes, escaliers et emmarchements (figure 8).

VOILES, PLANCHERS, POUTRES CRÉMAILLÈRES, ATLAS ET CARROUSEL

À ces six sous-chantiers s'apparentant à des opérations de bâtiment et menés à de hautes cadences (100 m² de plancher par jour et par grue) alors qu'ils portaient sur des voiles droites et courbes de grande hauteur (de 4 à 7 m) et de forte épaisseur (40 et 30 cm principalement) s'en ajoutait un, mené par des équipes dédiées, depuis le centre de l'arène : la réalisation des 60 poutres crémaillères destinées à supporter les tribunes du niveau intermédiaire et des vomitoires suspendus associés, suivis de la pose et du clavage des méga-coursives et des 2 311 gradins préfabriqués sur l'ensemble des trois niveaux de tribunes développant 22 km droits et courbes (figure 7).



Compte tenu de leurs dimensions monumentales et de la complexité des nœuds de liaison, les poutres crémaillères intermédiaires ont été réalisées en place et non préfabriquées... en seulement trois mois. Leur exécution s'est déroulée en parallèle des chantiers périphériques et par série de trois poutres, chacune à un stade différent : ferrailage, coffrage, bétonnage.

Le génie civil englobait enfin la réalisation de deux ouvrages si spécifiques qu'ils ont été baptisés « Atlas » et « Carrousel ». Il s'agit de deux poutres (respectivement en métal et en béton), qui ceinturent le stade et sont, l'une, ancrée au niveau du parvis bas (à 4,50 m du sol et à 1,50 m de la structure béton), et l'autre, appuyée au niveau haut du stade, sur les 60 poteaux de trame, à une hauteur variant de 5 à 11 m (d'où son nom). Toutes deux sont destinées à supporter la toiture, chacune avec un fonctionnement différent : Atlas sert d'ancrage articulé à l'extrémité basse des portiques (et travaille plutôt en traction), Carrousel renvoie la charge de la toiture et des sollicitations dans les fondations par l'intermédiaire de 120 appareils d'appui en Néoprène frettés, du même type que ceux qui sont utilisés pour supporter les tabliers d'ouvrages d'art.

7- Une capacité de 35 000 places.

8- Grand escalier de la tribune ouest.

7- A seating capacity of 35,000.

8- Large stairway of the western grandstand.



© FRANCIS VIGOUPOUX

GRANDS CHIFFRES

168 M€ : montant des travaux

35 000 places : capacité de l'ouvrage en configuration stade

44 000 places : capacité de l'ouvrage en configuration concert

90 000 m³ : volume des bétons du génie civil

10 000 t : quantité des armatures dans le béton armé

49 500 m² : développé de la couverture

4 000 m³ : volume de bois brut de la charpente en lamellé-collé

4 636 pièces de bois lamellé-collé (longueur moyenne : 8,50 m)

3 630 t : poids de la charpente métallique

46 m : valeur du porte-à-faux des portiques de charpente au-dessus des tribunes (à 30 m au-dessus du terrain)



© FRANCIS VIGOURoux

9

PRINCIPALES DATES

2009

Octobre : appel à candidature

2010

Avril : offre initiale

Septembre : offre finale

Octobre : désignation du titulaire

2011

Janvier : signature du contrat de partenariat

Juillet : délivrance du permis de construire

Août : démarrage des travaux

2012

Octobre : début du montage de la charpente sur l'ouvrage

Décembre : fin du génie civil

2013

Mai : achèvement de la charpente

Août : livraison

22 septembre : inauguration

grer dans le planning de réalisation (figure 1). Six entreprises de charpente métallique se sont mobilisées pour la réalisation des 3 800 éléments de l'extrados, des pyramides et des liernes (poutres métalliques, nœuds de connexion) assemblés entre eux par boulonnage HR (haute résistance), tandis que Fargeot Lamellé Collé s'attaquait à son chantier historique : la fabrication de 3 600 poutres pleines ou poutres caissons, et la mise en place de leurs ferrures d'assemblage. Tous ces éléments ont été livrés sur le site pour y être assemblés puis installés. Chacun des 60 portiques de charpente a ainsi été « pré-monté » en trois méga-éléments successivement mis en place et réglés, le premier sur la poutre Atlas, le deuxième sur l'appareil d'appui de la poutre Carrousel, et le troisième, depuis l'intérieur de l'enceinte, au-dessus des tribunes qu'il domine en un impressionnant porte-à-faux de 46 m. « L'assemblage de ces éléments s'est fait portique après portique ; puis la liaison entre portiques a été réalisée au moyen de " croix de bois " assurant la continuité de la nappe d'intrados, par brochage d'axes en aciers spéciaux. Et, autre point remarquable, souligne Vincent Rigoux, sans aucun recours à une structure intermédiaire d'étaie-ment. » Cette méthode, dont la cinématique avait été mise au point par modélisation 3D, a nécessité l'emploi d'importants moyens de levage (figure 9) (grue de 800 t, nacelles de 48 m), mais a permis d'assembler et de mettre en place la totalité de la charpente entre l'automne 2012 et le printemps 2013. Elle a ainsi permis d'atteindre l'objectif de livraison, la première chose connue du grand stade, rebaptisé entre-temps Allianz Riviera, mais aussi celle qui a parfois pu paraître la moins certaine en cours de réalisation. □

UNE STRUCTURE « ATYPIQUE, INNOVANTE, COLOSSALE ET COMPLEXE »

« S'agissant de la charpente, l'équipe de chantier est partie du dessin de l'architecte, mais la nécessité structurelle de conjuguer bois et métal est apparue dès la phase de pré-étude », explique Vincent Rigoux, le directeur du projet charpente. Le travail de conception, mené avec des outils 3D, s'est donc focalisé sur quatre sujets étroitement interdépendants : la géométrie de la

9- D'importants moyens de levages ont été nécessaires à l'assemblage de la charpente.

9- Major lifting equipment was needed for assembly of the frame.

structure (afin d'assurer sa faisabilité du point de vue industriel) ; les liaisons et les pièces de liaison (les « nœuds ») entre la charpente métal et la charpente bois à la base des pyramides (déterminant la résistance de la structure aux sollicitations) ; le respect du concept architectural, qui nécessitait de dissimuler au maximum les liaisons pour mettre en valeur le tressage des poutres de bois ; enfin les méthodes, pour que l'exécution de cette structure atypique et complexe puisse s'inté-

ABSTRACT

ALLIANZ RIVIERA IN NICE A GREEN STADIUM NEAR THE SEASIDE

GENEVIÈVE FEIDT, ADIM - LAURENT CHABAUD, DUMEZ - VINCENT RIGOUX, VINCI - AURÉLIEN GAYRARD-BOUZEREAU, GTM

The Grand Stade de Nice, which became Allianz Riviera in 2012, is the first of the three stadiums worked on by Vinci with a view to the 2016 Euro-UEFA football competition. It was built under a public-private partnership (partnership contract). Vinci, which provided financing, performed design and construction within a very short period of 33 months (from December 2010 to end-August 2013) and is now in charge of its operation and maintenance over a period of 27 years. The delivery of the structure and then its inauguration on 22 September last marked the end of an exceptional deployment of human and material resources. □

ALLIANZ RIVIERA EN NIZA UN ESTADIO VERDE EN EL MEDITERRÁNEO

GENEVIÈVE FEIDT, ADIM - LAURENT CHABAUD, DUMEZ - VINCENT RIGOUX, VINCI - AURÉLIEN GAYRARD-BOUZEREAU, GTM

Primero de tres estadios cuyas obras han sido emprendidas por Vinci en la perspectiva de la Euro-UEFA 2016 de fútbol, el gran estadio de Niza, convertido en Allianz Riviera en 2012, se ha realizado en el marco de una asociación público-privada (contrato de asociación). Vinci, que se encargó de la financiación, el diseño y la construcción en el breve plazo de 33 meses (diciembre de 2010 - finales de agosto de 2013) a partir de ahora se encargará de la explotación y el mantenimiento durante 27 años. La entrega de la obra seguida de su inauguración, el pasado 22 de septiembre, han marcado el final de una excepcional movilización, tanto humana como de medios. □



STADES



STADE OCÉANE DU HAVRE L'ALLIANCE COMPLEXE DES MATÉRIAUX, MARQUE DE NOUVEAUX STADES

AUTEUR : MARC GUERPIN, DIRECTEUR DE PROJET, VINCI CONSTRUCTION FRANCE

MARQUÉ PAR UNE ALLIANCE ATYPIQUE DES MATÉRIAUX, LE STADE OCÉANE DE LA VILLE DU HAVRE, INAUGURÉ EN JUILLET 2012, APPARTIENT À UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'ENCEINTES SPORTIVES ET CULTURELLES. ASSOCIANT BÉTON ET ACIER, PRÉCONTRAÎNTE ET POLYMÈRES, SA STRUCTURE FAIT APPEL À DES SOLUTIONS TECHNIQUES QUI RASSEMBLENT LES EXIGENCES DE L'INGÉNIERIE ET LES PROCÉDÉS CONSTRUCTIFS LES PLUS AVANCÉS. C'EST UN OUVRAGES COMPLEXE À LA CONFLUENCE DU BÂTIMENT ET DU GÉNIE-CIVIL.



© AUGUSTO DA SILVA / GRAPHIX IMAGES

LE STADE OCÉANE DU HAVRE, UNE STRUCTURE EXIGEANTE

Construit en conception-réalisation sur un terrain de 11 hectares, le stade Océane est vite devenu un emblème de l'agglomération du Havre (figure 2). Ce bâtiment multifonctionnel d'une capacité de 25 178 places (figure 3) assises inauguré le 12 juillet 2012 est très distinctif. Une membrane lisse en éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE) translucide - un matériau fluoropolymère thermoplastique très peu utilisé en France -, enveloppe l'ensemble de son enceinte modulable à structure compacte. Sérigraphiée en dégradés de bleu, elle imprime à l'ouvrage une

1 - Membrane lisse en éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE) translucide.

2 - Vue nocturne du stade Océane.

1 - Smooth membrane in translucent ethylene tetrafluoroethylene (ETFE).

2 - Night view of the Océane Stadium.

silhouette aux courbures et aux lueurs uniques (figure 1). Le stade est conçu comme une arène à l'anglaise, avec des tribunes dotées de gradins rétractables en béton et disposées au plus près de la surface de jeu, offrant une ambiance confinée en chaudron et une grande visibilité.

Le parking souterrain et les tribunes basses sont constitués d'une structure poteaux-poutres supportant le parvis général. C'est le niveau 0 du stade et l'accès au lieu. La tribune ouest abrite un bâtiment de cinq niveaux, de 80 m de longueur et 25 m de largeur, comprenant équipements techniques, loges et salons. Les concepteurs du stade

ont opté pour des solutions presque classiques : le béton pour l'assise des tribunes, une charpente métallique pour l'enveloppe en ETFE de 32 500 m². Cet assemblage est exigeant dans un contexte maritime (figure 4). Le vent peut exercer des efforts mécaniques importants sur l'enveloppe, répercutés sur la charpente métallique et le socle en béton. Une collaboration étroite entre architectes et ingénieurs a permis de mener des études exhaustives de réponse au vent dans le dimensionnement des structures, à l'aide d'une maquette numérique, pour définir les champs de pression et les dispositifs permettant d'inhiber les efforts subis. ►



3

© AUGUSTO DA SILVA / GRAPHIX IMAGES

UNE ORGANISATION RIGOREUSE EN CONCEPTION-RÉALISATION

Le cahier des charges imposait un délai de réalisation court de 22 mois de chantier. Inédite pour un ouvrage de cette importance, l'approche en conception-réalisation a permis de concilier cette exigence avec la complexité technique liée au choix de la membrane, permettant de maîtriser en amont les méthodes et la planification dès les premières esquisses, en avançant simultanément sur le concept architectural et sa traduction technique. Des modes spécifiques d'ordonnement du chantier ont été mis en œuvre afin de fiabiliser les délais sur un site enclavé, en évitant les pertes de productivité et les chutes de cadence.

L'organisation reposait sur cinq unités de production autonomes avec cinq grues à tour indépendantes (figure 5) et sur la conception d'éléments de structure, de charpente métallique et de gros équipements d'un poids inférieur à 7 t, afin de pouvoir les manutentionner par grue en tout point.

Pour les fondations, 1 129 pieux de 27 m ont été réalisés en moins de deux mois (figure 6). Le niveau sous parvis a été construit en structure poteaux-poutres en béton armé sans précontraintes avec 13 500 m² de voiles, 30 800 m² de planchers en dalles alvéolées en béton précontraint, 39 900 m² de planchers coulés sur place et 53 crémaillères préfabriquées

sur site. Les 9 670 m de gradins ont été préfabriqués en usine tandis que 11 cages d'escalier en volées étaient préfabriquées sur site.

Les dalles du parvis devaient supporter la charge des matériels nécessaires à la réalisation du chantier, dont les outils coffrants.

Une fois le stade en activité, ces dalles doivent résister à la circulation des véhicules de pompiers sur tout l'espace périphérique.

3- Une capacité de 25 178 places assises.

4- Contexte maritime.

3- A seating capacity of 25,178.

4- Maritime environment.

Le choix s'est donc porté sur des dalles préfabriquées en béton précontraint, plus simples à mettre en œuvre et assurant un gain de temps précieux tout en autorisant de grandes portées de 12,56 m.

Ces dalles de 36 cm d'épaisseur se caractérisent par un profil spécifique comportant six alvéoles oblongues affînées pour laisser passer trois armatures en acier de 15 mm de diamètre par nervure.



4

© PATRICK BOULLEN



5



6

5- Vue aérienne du chantier avec ses 5 grues à tour.

6- Foreuse de pieux.

7- Pose de la charpente et de la couverture.

5- Aerial view of the construction site with its five tower cranes.

6- Pile driller.

7- Placing the frame and roof covering.



© PATRICE LEFEBVRE

7

LES PORTIQUES, CLÉ DE VOÛTE TECHNIQUE DE L'OUVRAGE

Les 78 poteaux de portiques installés en tribunes nord, sud et est ont été réalisés en béton précontraint par post-tension. Cette solution permet de reprendre les efforts de la charpente métallique sur la structure en béton en plaçant des barres de précontrainte dans les poteaux, résistant à une traction de 250 t. Sa mise en œuvre constituait l'un des défis techniques du chantier. Des gaines incorporées dans le béton abritent les câbles de précontrainte, mis en tension avant pose de la charpente. Leur réalisation demandait une grande précision afin de pouvoir positionner

les inserts de fixation de la charpente avec une tolérance de +/-10 mm. Les poteaux bas et principaux des portiques ont été coulés sur place avec un béton de classe de résistance C 40/50 en raison des efforts importants de compression. Une crémaillère centrale relie les deux éléments. Monté en trois jours, chacun de ces portiques apparents a été réalisé avec un parement extérieur soigné, sur une hauteur de coulage de 12,70 m, effectué en deux levées de 7,10 m et 5,60 m. Pour obtenir la forme d'arc en sous-face des portiques, le fabricant de coffrages Simpra a mis au point une tour d'étalement spécifique, venant

soutenir les banches pour coffrer la face intérieure des poteaux principaux. Le chantier a également développé un banc de moulage spécial jouant aussi le rôle de retourneur pour élingage, permettant la préfabrication au sol des 224 crémaillères hautes et basses du stade, coulées à plat, levées à la grue puis liaisonnées par du béton coulé en place. L'étalement des poutres de contreventement couronnant les portiques des tribunes sud, est et nord a aussi été réalisé grâce à une passerelle coffrante spécifique. L'outil a été posé à la grue après boulonnage des suspentes des supports à l'aide d'une nacelle.

UNE CONSTRUCTION EXEMPLAIRE

La couverture des gradins et des espaces annexes est constituée d'une série de fléaux métalliques et de poutres treillis, une charpente de 2450 t présentant un porte-à-faux de 30 m.

Sa pose a demandé un réglage précis, avec 320 points de contrôles de la géométrie de la charpente, afin de respecter une tolérance de +/- 10 mm, et un relevé de 780 points pour garantir une tolérance de positionnement des points d'ancrage des panneaux de l'enveloppe en ETFE inférieure à 20 mm (figure 7).



PRINCIPALES QUANTITÉS

TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX :	87 000 m ³
PIEUX :	1 129 u
BÉTON :	43 000 m ³
ACIERS HA ET TS :	2 450 t
GRADINS PRÉFABRIQUÉS :	14 000 m
DALLES ALVÉOLAIRES :	30 800 m ²
CHARPENTE MÉTALLIQUE :	2 800 t
COUVERTURE ETFE :	32 500 m ²
PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES :	1 400 m ²
ÉTANCHÉITÉ :	15 000 m ²

8

© AUGUSTO DA SILVA / GRAPHIX IMAGES

Cette membrane fluoropolymère thermoplastique, d'une épaisseur de 0,25 mm et cent fois plus légère que le verre, a permis d'économiser 1 000 t de charpente (figure 8).

Le Stade Océane est un modèle en matière de développement durable. Bien qu'il n'existe pas encore de référentiel pour les stades, la conception et la gestion de l'équipement suivent les critères Haute Qualité Environnementale® en gestion de chantier, optimisation des déchets, limitation des nuisances, réduction des pollutions et des consommations. 40 % des déchets du chantier ont été recyclés. Les matériaux utilisés pour la construction ont été choisis pour minimiser l'empreinte environnementale. L'emploi de béton à base de ciment CEM V a permis de réduire de 20 % les émissions de CO₂ par rapport à un ciment de type CEM I. C'est le premier stade à énergie positive en France. L'électricité nécessaire au fonctionnement de l'ouvrage est

8- Détail de la charpente.

8- Detail of the frame.

produite par 1 400 m² de panneaux photovoltaïques installés en toiture, une initiative associée à des mesures d'isolation thermique des locaux, de régulation et d'optimisation des équipements.

CONCLUSION

La conception et la construction du Stade Océane du Havre répond aux enjeux de modernisation des grands stades français. Cette enceinte symbolique, polyvalente, agréable et durable est adaptées aux nouveaux besoins d'un public nombreux et d'une programmation variée. La prouesse architecturale et la complexité constructive sert in fine des fonctionnalités qui insufflent une nouvelle dynamique. □

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Communauté de l'agglomération havraise (CODAH)

MANDATAIRE GROUPEMENT DE CONCEPTION-RÉALISATION : Sogea Nord Ouest (Vinci Construction France)

MAÎTRE D'ŒUVRE : agence d'architecture SCAU

ARCHITECTE ASSOCIÉ : KSS

BUREAUX D'ÉTUDES : IOSIS Centre Ouest (fluides, SSI, SPSI), Elioth (HQE), Structures Île-de-France (structure béton), Cabinet Jailly Rouby (structure métallique), Economie 80 (Economie)

TERRASSEMENTS : Lesueur TP

VRD : Eurovia

FONDACTIONS PROFONDES : Botte Fondations - Soletanche Bachy Pieux

PRÉCONTRAÎTE : SNAAM

OUTILS SPÉCIFIQUES : Simpra

CHARPENTE MÉTALLIQUE : Cance Constructions Métalliques

ENVELOPPE ETFE : Novum

COÛT DE L'ÉQUIPEMENT HT : 86 millions d'euros

ABSTRACT

THE OCEANE STADIUM IN LE HAVRE A COMPLEX COMBINATION OF MATERIALS, THE FEATURE OF NEW STADIUMS

MARC GUERPIN, VINCI

The Océane Stadium in the Le Havre urban area belongs to a new generation of sporting and cultural arenas, marked by an atypical combination of materials. These facilities are designed as modular spaces, comfortable and convivial, enhancing the spectators' emotions. Combining concrete and steel, prestressed and polymer materials, their structures make use of technical solutions in which the most advanced engineering requirements are met by the most advanced construction processes. These demanding projects thus lend form to complex structures on the boundary between building and civil engineering. □

EL ESTADIO OCEANE DE LE HAVRE LA ALIANZA COMPLEJA DE LOS MATERIALES, MARCA DE NUEVOS ESTADIOS

MARC GUERPIN, VINCI

Marcado por la alianza poco común de materiales, el estadio Océane de la ciudad de Le Havre pertenece a una nueva generación de recintos deportivos y culturales. Estos equipamientos se diseñan en espacios modulares, cómodos y acogedores, cómplices de la emoción de los espectadores. Al asociar hormigón y acero, pretensado y polímeros, sus estructuras recurren a soluciones técnicas que reúnen las exigencias de la ingeniería y los procedimientos constructivos más avanzados. Así, en estas obras rigurosas, se da cuerpo a estructuras complejas en la encrucijada de la construcción y de la ingeniería civil. □

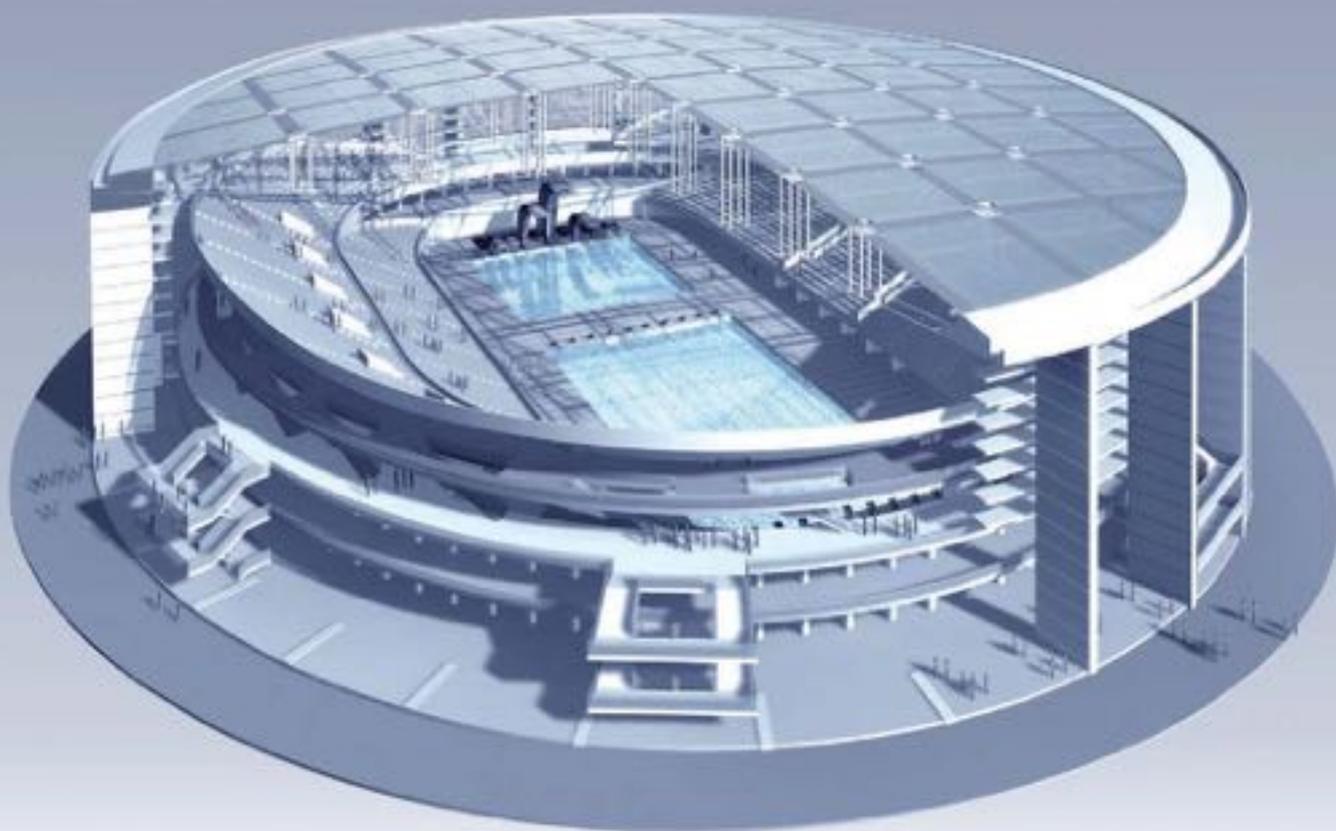
LE STADE AQUATIQUE S.P. MUKHERJEE À NEW-DEHLI : UN EXEMPLE ORIGINAL DE TOITURE SUSPENDUE

AUTEUR : DAMIEN DELBOS, PROJECT MANAGER, FREYSSINET

AVEC UNE PORTÉE DE 130 M, LA TOITURE CÂBLÉE DU STADE AQUATIQUE S.P. MUKHERJEE DE NEW DELHI EN INDE NE SE DISTINGUE PAS PAR SA TAILLE MAIS PAR SON ORIGINALITÉ, TANT DANS SA CONCEPTION QUE DANS LA TECHNOLOGIE DE SES CÂBLES ET DANS LES MÉTHODES DE MISE EN PLACE.

© GMP ARCHITEKTEN VON GERKAN, MARG UND PARTNER

1



INTRODUCTION

Dans le cadre des XIX^e Jeux du Commonwealth, tenus en 2010, la ville de New Delhi s'est équipée d'infrastructures sportives de haut niveau (stade d'athlétisme, de tir, de rugby, de boxe, ...) dont un stade aquatique d'une capacité d'un peu plus de 5 000 spectateurs. Dénommé complexe aquatique

S.P. Mukherjee (SPM), du nom d'un homme politique indien de la première moitié du XX^e siècle, le stade est situé au cœur de la forêt qui entoure le palais présidentiel.

La construction du complexe date des Jeux Asiatiques de 1982, précédente compétition sportive d'envergure tenue à New Delhi. Si un toit avait été conçu

1- Représentation 3D du stade nautique S.P. Mukherjee.

1- 3D representation of the S.P. Mukherjee aquatic stadium.

pour cette première structure, il semble qu'il ne fut jamais installé faute de trouver la méthode adéquate pour sa mise en place.

Le projet initial de rénovation proposé par le cabinet d'architecture gmp Architekten von Gerkan, Marg und Partner consistait donc essentiellement dans la construction d'une structure ►

indépendante entourant les gradins et soutenant une toiture suspendue. Au bout du compte, les gradins et les bassins furent détruits et intégralement reconstruits.

PRÉSENTATION DE LA STRUCTURE

La toiture du complexe aquatique S.P. Mukherjee a été conçue par le bureau d'étude Schlaich Bergermann Und Partners, spécialisé entre autres dans les toitures câblées et basé à Stuttgart (Allemagne) (figure 1).

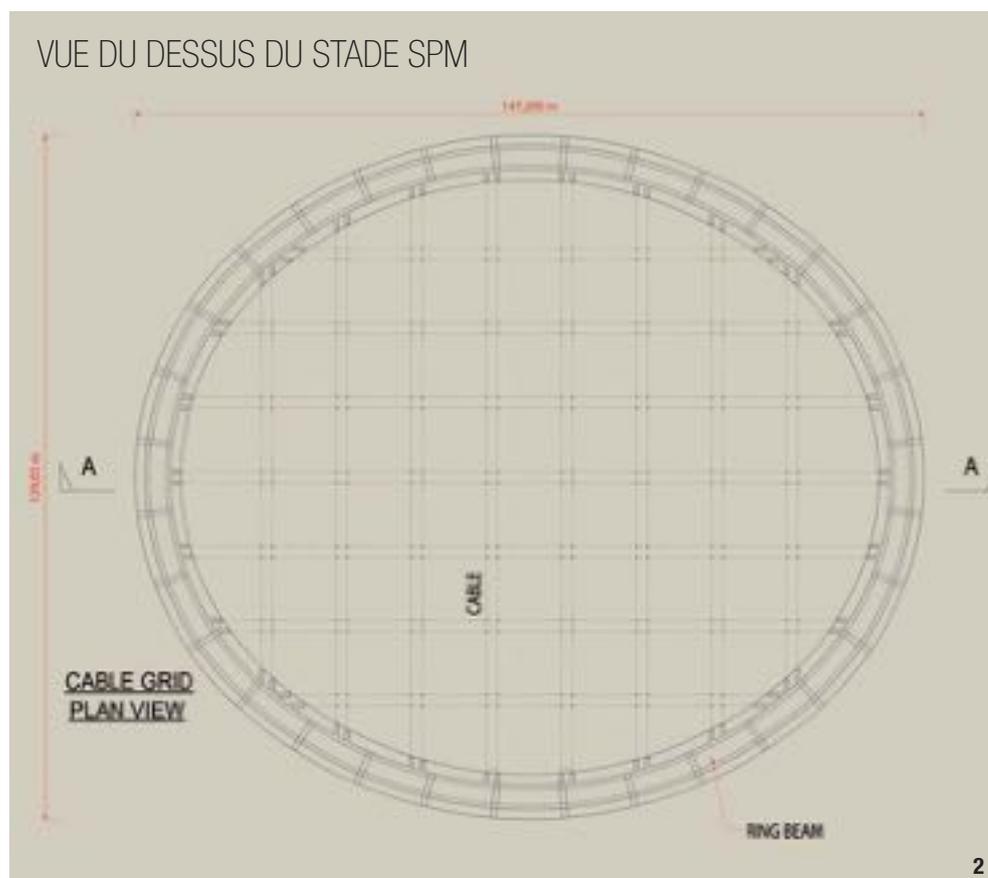
Le recours à une structure câblée pour couvrir un stade permet de repousser les supports de la toiture à l'extérieur des gradins, créant ainsi une enceinte dans laquelle aucun obstacle ne vient perturber la vision des spectateurs. Autre avantage des structures câblées, elles offrent à l'architecte assez de possibilités, de variations autour de la structure de base qui est la poutre câblée précontrainte, pour en faire une œuvre unique en son genre et un symbole de la manifestation sportive, quand ce n'est pas de la ville dans laquelle se situe la structure. À titre d'exemple on peut citer certains stades dans lesquels se sont tenus des matchs de la coupe du monde de foot en 2010 en Afrique du Sud.

Une toiture suspendue se compose de trois éléments principaux : une toiture (membrane ou panneaux métalliques) supportée par une structure câblée qui repose à son tour sur une sous structure (piles ou gradins). Dans le cas du complexe SPM, ces trois éléments sont respectivement des panneaux en aluminium isolant le stade de la chaleur extérieure, un quadrillage de poutres câblées et des murs de cisaillement orientés radialement.

Une poutre câblée repose sur deux appuis situés à ses extrémités.

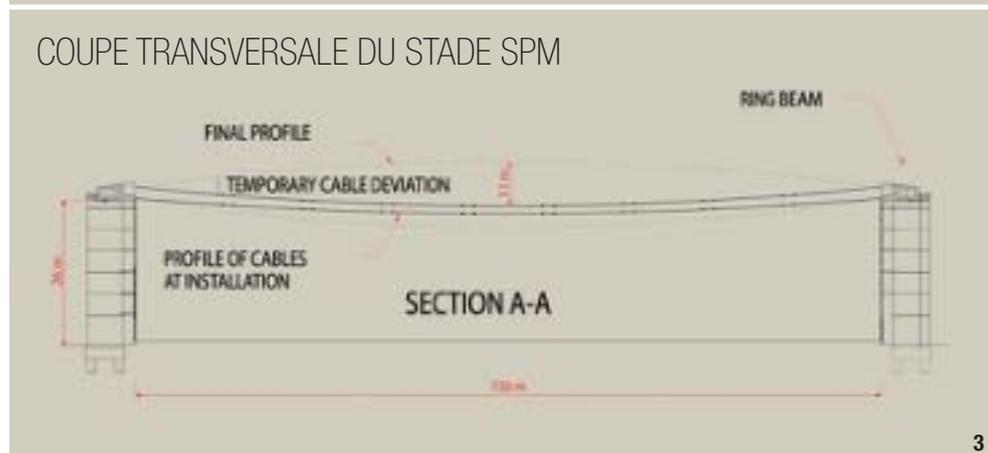
Les câbles supérieurs sont appelés stabilisateurs et forment la fibre supérieure de la poutre, tandis que les câbles inférieurs, ou câbles porteurs, en constituent la fibre inférieure.

La rigidité de la poutre tient à l'effort de précontrainte introduite dans les câbles à leur installation, autrement dit l'effort résiduel dans les câbles lorsque plus aucune action extérieure ne s'exerce sur le système de câbles. Les deux câbles ont des courbures antagonistes imposées par les éléments de liaison entre les câbles qui peuvent être des butons (éléments en compression) ou des suspentes (éléments en traction). L'action réciproque d'un câble sur l'autre assure une tension minimum



2

© FREYSSINET



3

© FREYSSINET

quel que soit le cas de charge : charges de pluie qui diminuent l'effort dans les câbles stabilisateurs ou charges de soulèvement du vent qui diminuent l'effort dans les câbles porteurs.

Les toitures suspendues sont des variations autour de cette figure de base. Dans le cas des toitures de très grande portée (stade d'athlétisme par exemple), les poutres câblées sont les rayons d'une roue de bicyclette. Ils sont tendus entre un anneau de compression qui surplombe les gradins et un anneau de traction au dessus du terrain de jeux.

2- Vue du dessus du stade SPM.

3- Coupe transversale du stade SPM.

2- Top view of the SPM stadium.

3- Cross section of the SPM stadium.

Dans le cas de la toiture du stade S.P. Mukherjee, les poutres câblées sont orientées suivant le petit et le grand axe de l'ellipse définie par la poutre de compression en béton armé. Les câbles étant ancrés de part et d'autre de la poutre, le réseau de câbles forme un quadrillage orthogonal. Le quadrillage comporte 14 axes selon le grand axe de l'ellipse et 16 selon le petit axe. On distingue donc 4 nappes de câbles (longitudinaux et transversaux, inférieurs et supérieurs). Leur espacement irrégulier délimite des carrés de 2 m de côté et d'autres de 12 m de côté. Le plus long

câble mesure 130 m, dimension du grand axe de l'ellipse (figures 2 et 3). À chaque intersection entre deux câbles de directions orthogonales se trouve un buton, dont la hauteur varie de 4 m à la périphérie de la lentille jusqu'à 11 m en son centre. La forme générale de la toiture s'apparente donc à une lentille, ce qui fait l'originalité de la structure, mais aussi sa complexité puisque la structure doit être traitée en trois dimensions, chaque point d'intersection entre un buton et le réseau câblé étant orienté selon deux angles variables.

Enfin, l'ensemble poutre de compression/réseau câblé étant auto équilibré, les murs radiaux en béton armé sont essentiellement soumis à des efforts verticaux qu'ils retransmettent aux fondations.

TECHNOLOGIE DE LA TOITURE

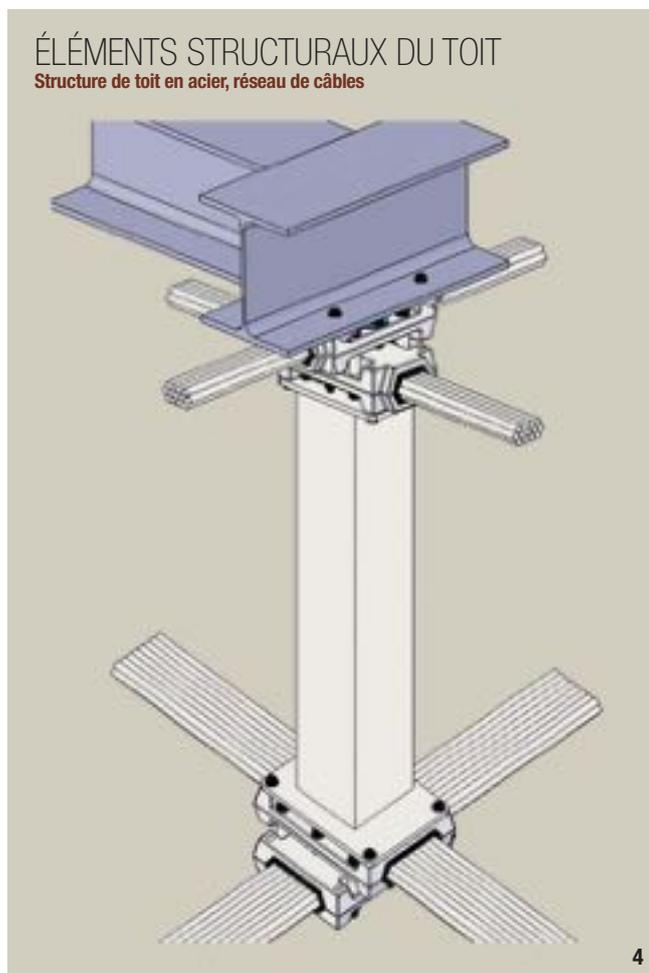
Les câbles de la toiture du complexe aquatique de New Delhi utilisent une technologie française, celle du toron Cohestrand® développée par Freyssinet à la fin des années 90 pour étendre le système des torons individuellement protégés utilisé sur les ponts à haubans aux structures suspendues (ponts et stades).

Le Cohestrand® est un toron T15,7 de classe 1860 MPa, galvanisé, injecté avec une résine polymère, et gainé avec du PEHD. La résine polymère solidarise le polyéthylène de la gaine du toron métallique, permettant ainsi le transfert des efforts longitudinaux du collier à l'acier du toron par serrage sur la gaine, sans interruption de la triple protection anti-corrosion individuelle des torons.

Par rapport aux câbles spiralés ou câbles clos généralement utilisés dans les toitures de stade, la résistance du toron Cohestrand® à l'atmosphère chlorée d'un stade aquatique est bien meilleure du fait d'une triple protection anti corrosion de l'acier des torons : enveloppe en polyéthylène haute densité (PEHD), résine de remplissage et galvanisation de l'acier.

Ces torons sont associés en faisceaux de 25 pour les câbles inférieurs (câbles porteurs) et 13 pour les câbles supérieurs (câbles stabilisateurs). Ils sont connectés à la poutre de compression par l'intermédiaire d'ancrages de la gamme H2000 utilisée par Freyssinet dans les ponts à haubans et assurant les fonctions suivantes (figure 4) :

→ L'ancrage individuel des torons par coincement conique, qui assure une résistance optimale aux phé-



4- Éléments structuraux du toit : structure de toit en acier, réseau de câbles.

4- Roof structural members: steel roof structure, network of cables.

nomènes de fatigue engendrés par les « respirations » de la toiture ;

→ L'étanchéité de la zone d'ancrage des torons, essentielle dans un stade aquatique ;

→ Le réglage des câbles pour compenser l'écart entre le comportement théorique et le comportement réel de l'ouvrage.

Cette dernière fonction est indispensable, puisque le réglage individuel des torons n'est plus possible dès lors que les colliers ont été installés sur les faisceaux de câbles. Ces derniers servent de point fixe, connectant les axes

longitudinaux et transversaux entre eux et aux butons. Les efforts longitudinaux aux câbles en provenance des butons sont encaissés par serrage des colliers sur les faisceaux au moyen de boulons à serrage contrôlé.

Pour finir, les butons sont constitués de profilés carrés de 200 mm de côté. Chaque buton est unique de par sa longueur et l'angle des platines de connexion aux colliers qui doit épouser la courbure de la lentille.

MÉTHODES D'INSTALLATION INTRODUCTION

Dans l'état final de la structure, le réseau de câbles a un effet de précontrainte positif sur la stabilité de l'anneau de compression en béton armé puisque sa résultante est à peu près radiale. Pour ne pas induire de moments de flexion dans l'anneau pendant la phase de construction, on utilise couramment la méthode du « Big Lift ». Cette méthode consiste à assembler le réseau de câbles au sol, sur le terrain et les gradins, puis à le lever en une

seule phase par l'opération synchronisée de vérins à câbles répartis tout autour de l'anneau. Ainsi la répartition des efforts lors de la construction est sensiblement la même que lors de la phase permanente.

La configuration de la structure câblée en réseau orthogonal comportant 208 interconnexions entre câbles longitudinaux et transversaux, supérieurs et inférieurs, ainsi que l'impossibilité d'utiliser l'espace au sol du fait des travaux simultanés sur les bassins et les gradins rendaient impossible l'application de cette méthode au stade SPM.

Le mérite de l'équipe chantier a été de reconnaître cette difficulté, et de proposer une méthode alternative en deux temps :

- Lancement des câbles à travers le stade et installation des colliers en l'air ;
- Insertion des butons par séparation des nappes de câble.

ÉTAPE 1 : LANCEMENT DES CÂBLES ET INSTALLATION DES COLLIERES

Alors que la conception de la toiture interdit d'utiliser la méthode classique du « Big Lift », la technologie de câble choisie ouvre de nouvelles possibilités. La modularité du système Cohestrand® permet l'installation des câbles par toron de faible poids (1,3 kg/m), permettant une manipulation plus facile, des équipements légers et une grande flexibilité dans la séquence des opérations.

Le chantier de lancement des câbles (matériaux et équipements) est installé sur l'anneau de compression lui-même pour profiter de cet espace totalement disponible, 30 m au dessus du tumulte des marteaux piqueurs et des grues qui travaillent aux gradins et aux bassins. La phase de lancement des câbles s'inspire largement de l'installation d'un câble de suspension (figure 5) :

→ Un premier toron est descendu au sol d'un côté du stade, tiré du côté opposé et remonté au niveau de l'anneau de compression. C'est un toron temporaire qui sert de support pour le lancement du toron de référence puis qui est démonté.

→ Le toron de référence, premier toron lancé depuis les airs, est tendu au vérin monotoron jusqu'à atteindre la marque faite sur chantier qui indique sa longueur théorique de réglage. Ce réglage est affiné de bon matin, alors que l'état thermique de la structure est le plus uniforme, par relevé de la flèche du toron par un géomètre. Une erreur de ►

réglage du toron, ou de positionnement des ancrages de 10 mm induit une différence de flèche de l'ordre de 50 mm, justifiant le choix de cette méthode !

→ Les autres torons du faisceau sont lancés à travers le stade par un système de va-et-vient similaire à une tringle de rideau, constitué de 2 treuils (un aller et un retour) et d'une série de berceaux roulant sur les torons déjà installés. Ils sont ajustés « à la flèche » au fur et à mesure de leur installation, par référence au premier toron.

L'installation de plus de 1 000 torons constituant la structure a duré 1 mois et demi, dont seulement 1 mois sur le chemin critique puisque les premiers câbles ont été lancés avant même le clavage de l'anneau de compression en béton armé.

Après leur lancement, les torons sont organisés en faisceaux par l'installation de colliers de compaction placés à chaque intersection entre câbles transversaux et longitudinaux. Leurs positions sont précisément repérées sur le toron de référence, puisque du bon positionnement des colliers dépendra la bonne répartition des efforts dans la structure.

La difficulté principale de cette phase, est l'accès aux zones de travail, disséminées sur toute la surface couverte par la toiture, à 30 m de haut. La solution a résidé dans la mise au point de plateformes de travail sécurisées qui enjambent deux câbles voisins de 2 m. Ces plateformes sont déposées à la grue sur le réseau supérieur de câble. L'accès des ouvriers peut ensuite se faire par l'intermédiaire d'une nacelle élévatrice. Les ouvriers sont équipés de harnais à double longe, leur permettant de travailler en sécurité.

Les 832 colliers sont installés en un mois.

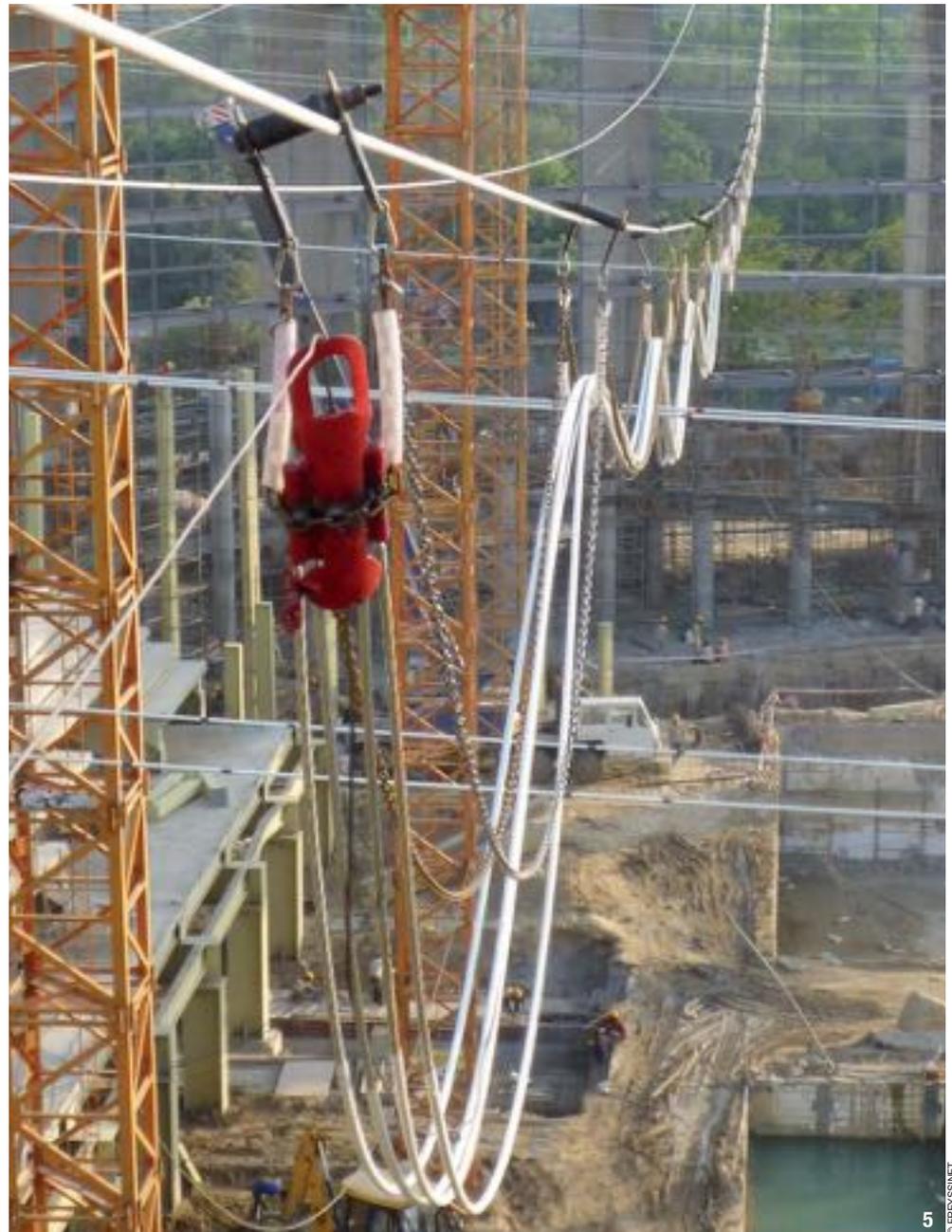
ÉTAPE 2 : INSTALLATION DES BUTONS

À la fin de la première étape, les réseaux de câbles sont suspendus sous leur propre poids, réglés à leur longueur finale.

L'étape finale de la construction de la toiture consiste à séparer les nappes de câble supérieure et inférieure et d'y insérer les butons.

C'est l'étape la plus impressionnante, celle qui révèle la forme et le sens de la structure, l'aboutissement de toutes les opérations préalables.

C'est aussi l'étape qui ne peut réussir que si toutes les autres opérations ont été correctement exécutées (figure 6). La façon la plus efficace de séparer



5
© PHOENIXNET

deux câbles, ou en l'occurrence deux réseaux de câbles, est de reproduire l'action d'un archer sur son arc, en créant une action réciproque entre les nappes supérieure et inférieure jusqu'à pouvoir insérer le bouton, puis de relâcher les nappes et de les mettre en appui sur les butons.

Cette opération est réalisée à l'aide de quatre « tours de séparation », placées symétriquement autour de l'ellipse. Chaque tour est une structure treillis métallique équipée de deux vérins avaleurs de câbles capables de fournir les 85 tonnes d'effort de séparation. Les tours sont conçues sur les modèles

5- Lançage des torons au dessus du stade.

5- Launching strands above the stadium.

des grues à tour, par l'assemblage de modules dont le nombre varie en fonction de la hauteur des butons à installer. Des échelles courent de haut en bas de la structure, donnant accès aux plateformes de travail à partir desquelles les butons sont connectés aux colliers par boulonnage. Les tours sont connectées aux câbles par un système bi-articulé (cardan) afin de s'adapter à la géométrie évolutive au cours d'une opération de séparation. On limite les moments de flexion à la fois dans les tours de séparation et dans les cassures angulaires des torons déviés par les tours de séparation.



© FREYSSINET

6

L'installation des 208 butons se déroule en 14 étapes.

À chaque étape, les 4 tours sont installées symétriquement autour de l'ellipse. La synchronisation des vérins permet d'équilibrer les efforts dans la structure métallique.

Lors de la première étape, la distance entre nappes supérieures et inférieure passe de 1,5 à 11,5 m en 3 heures. Trois semaines de travail en deux postes suffisent à réaliser l'installation de tous les butons.

6- Réseau de câbles supérieurs et inférieurs après la première étape de séparation.

6- Network of top and bottom cables after the first stage of separation.

CONCLUSION

Certaines structures appellent l'innovation. C'est le cas de la toiture câblée du complexe aquatique de New Delhi, dont la conception en forme de lentille a demandé de repenser en profondeur les méthodes classiques d'installation. Finalement, malgré des accès au sol extrêmement limité, il aura suffi de trois mois pour réaliser la structure portante. Le succès de la méthode doit beaucoup à la légèreté et la flexibilité de la technologie choisie : le Cohestrand®. □

QUANTITÉS

NOMBRE D'ANCRAGES :
60 ancrages unité 19 (avec 13 torons),
60 ancrages unité 27 (avec 25 torons)

NOMBRE DE COLLIERS :
416 colliers 13 torons
et 416 colliers 25 torons

TONNAGE DE TORONS :
172 t

ABSTRACT

S.P. MUKHERJEE STADIUM IN DEHLI, AN ORIGINAL EXAMPLE OF A SUSPENDED ROOF

DAMIEN DELBOS, FREYSSINET

In 2010, the city of New Delhi completely renovated the S.P. Mukharjee stadium where the swimming events were held for the 19th Commonwealth Games. Of the original structure built in 1982, only the structures of the two pools were kept, overhung by an elliptical concrete shell 160m long and 11m high. This shell supports a roof designed by the German designer Schlaich Bergermann Und Partner. It is complex, being formed of a steel structure clad with a synthetic material, all resting on 208 poles, all of different shapes to accommodate the positions of the cables and clamps - and these poles are supported by a cross meshing of 60 Cohestrand® cables. □

ESTADIO S.P. MUKHERJEE EN NUEVA DEHLI, UN EJEMPLO ORIGINAL DE CUBIERTA COLGANTE

DAMIEN DELBOS, FREYSSINET

En 2010, la ciudad de Nueva Delhi reformó totalmente el estadio S.P. Mukharjee donde se celebraron las pruebas de natación de los XIX Juegos de la Commonwealth. De la obra original construida en 1982, sólo se han conservado las estructuras de las dos piscinas, cubiertas por un revestimiento elíptico de hormigón de 160 m de largo y 11 m de alto, que soporta una cubierta concebida por el diseñador alemán Schlaich Bergermann Und Partner. Compleja, está constituida por una estructura metálica revestida de un material sintético y el conjunto se apoya en 208 mástiles, todos de diferente geometría para acomodar las posiciones de los cables y abrazaderas, sostenidos por una malla cruzada de 60 cables Cohestrand®. □



1
© HERZOG & DEMEURON

NOUVEAU STADE DE BORDEAUX UN DUO BÉTON - ACIER, RECONNAISSABLE ENTRE TOUS

AUTEUR : MARC GUERPIN, DIRECTEUR DE PROJET, VINCI CONSTRUCTION FRANCE

MARQUÉ PAR UNE ALLIANCE ATYPIQUE DES MATÉRIAUX, LE NOUVEAU STADE DE LA VILLE DE BORDEAUX QUI SERA LIVRÉ EN AVRIL 2015 APPARTIENT À UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'ENCEINTES SPORTIVES ET CULTURELLES. ASSOCIANT BÉTON ET ACIER, PRÉCONTRAÎTE ET POLYMÈRES, SA STRUCTURE FAIT APPEL À DES SOLUTIONS TECHNIQUES QUI RASSEMBLENT LES EXIGENCES DE L'INGÉNIERIE ET LES PROCÉDÉS CONSTRUCTIFS LES PLUS AVANCÉS. C'EST UN OUVRAGES COMPLEXE À LA CONFLUENCE DU BÂTIMENT ET DU GÉNIE-CIVIL.

À BORDEAUX, UN NOUVEAU STADE CONJUGUANT LE BÉTON ET L'ACIER

Édifié sur un terrain de 18,6 hectares dans le quartier de Bordeaux-Lac, le Nouveau Stade de Bordeaux sera livré en avril 2015. D'une capacité de 42 052 places assises, cette enceinte sportive et culturelle multifonctionnelle accueillera les rencontres de football de

l'Euro 2016. Sa réalisation mobilise six constructeurs issus des groupes Vinci Construction et Fayat, associés au sein de la société Stade Bordeaux Atlantique, maître d'ouvrage de l'opération dans le cadre d'un partenariat public-privé avec la Ville de Bordeaux. Mesurant 210 m de large, 233 m de long et 43 m de haut, le bâtiment se distingue des autres stades par sa

forme singulière, un volume presque carré, dense et épuré.

La superposition des tribunes, divisées en quatre secteurs et desservies par une coursive périphérique ceinturant l'arène au niveau 3, forme le réceptacle du jeu.

L'inclinaison des gradins et la proximité avec la surface de jeu confèrent à ce bol un effet chaudron.

Surplombée d'une toiture rectangulaire, l'enceinte est soutenue dans sa périphérie par une forêt de colonnes élancées (figures 1 et 2).

Le Nouveau Stade de Bordeaux associe béton et acier. Ses tribunes basses est et ouest et sa dalle portée sont réalisées en béton armé. Les tribunes hautes est et ouest, l'intégralité des tribunes nord et sud ainsi que les quatre



coce d'une interface pointue entre équipes de génie-civil et de charpente métallique. La mixité du bâtiment a été intégrée dès le calcul de la structure et le dimensionnement des éléments, avec validation conjointe des données techniques acier et béton en amont des études d'exécution.

Cette dualité béton-acier a également exigé la réalisation d'études de synthèse poussées, pour assurer la cohérence spatiale des éléments techniques de tous les corps d'état avec l'ossature métallique.

DES PLOTS BÉTON POUR MAÎTRISER LES INSERTS DE CHARPENTE

Le choix d'une superstructure à 70% en métal a permis de diminuer le poids du stade, construit sur d'anciens marécages.

Pour asseoir sa structure, 945 pieux d'une profondeur moyenne de 22 m ont été forés dans un sol meuble et compressible (figure 4). Les longrines ont été mise en place sur les massifs de fondations pour simplifier le nœud de ferrailage, une dalle portée de 35 000 m² coulée sur la zone d'emprise des bâtiments.

Préférée au radier général, cette solution éliminait tout risque de tassement et offrait un espace de travail sûr, favorisant le rendement des élévations et des circulations. La précision de pose des inserts de charpente

dans le béton joue un rôle crucial pour assurer l'assemblage parfait d'une superstructure métallique qui s'élance à près de 40 m de hauteur. L'utilisation de près de 800 plots massifs béton a permis de livrer au charpentier des inserts respectant une tolérance d'inclinaison maximale de +/- 2 mm.

Cette solution réalisée hors cycle avec un nœud de ferrailage simple a nécessité l'emploi de 15,4 t d'acier et de 220 m³ de béton, avec mise en œuvre d'un outil spécifique de positionnement des inserts sur les plots béton.

3 600 GRADINS PRÉFABRIQUÉS SUR PLACE

Une centrale à béton a été construite (figure 5) pour fabriquer sur place les 36 000 m³ de béton nécessaires au gros œuvre, achevé en octobre 2013 : dalle portée, gradins préfabriqués, parking enterré de la tribune ouest, RdC et R+1 des tribunes basses est et ouest. Cette démarche assure maîtrise et souplesse de la fabrication. Elle a aussi permis de diminuer l'empreinte carbone de la construction, réduisant l'impact des nuisances associées par un gain de 75 livraisons par jour en pointe, et valorisant les déchets par réutilisation des eaux usagées et du laitier.

Les constructeurs du stade ont pris le parti de fabriquer un maximum d'éléments sur place.

Les 3 600 gradins en béton du stade sont coulés sur site et mis en place au fur et à mesure de l'installation des crémaillères en béton et en métal. Cette organisation garantit la qualité de production et la cadence de livraison. Les embases des gradins hauts sont également préfabriquées, en éléments réduits, une solution moins onéreuse et plus légère que le coulage en place ou la préfabrication en éléments complets, permettant le levage par grue à tour. Les planchers font appel à des pré-dalles foraines préfabriquées sur chantier et à des pré-dalles précontraintes achetées à l'extérieur. Les poteaux sont coffrés en carré banché ou carton rond. ▷

1 & 2- Surplombée d'une toiture rectangulaire, l'enceinte est soutenue dans sa périphérie par une forêt de colonnes élancées.

1 & 2- The arena, overhung by a rectangular roof, is supported on its periphery by a forest of slender columns.

virages de l'enceinte reposent sur une superstructure métallique (figure 3). Atypique en France, le choix d'un équipement sportif mixte béton-acier dessine un stade élégant et léger, reconnaissable entre tous. Cette spécificité a exigé la mise en place pré-



© HERZOG & DE MEULON



3



4



5



6

FIGURES 3, 5 & 6 © PHILIPPE CALMES - FIGURE 4 © SOLENTACHIE BACHY PHELIX

Les poutres préfabriquées ne sont pas clavetées simultanément, compte tenu de la trop faible répétition de l'opération pour rentabiliser les outils nécessaires. Les 28 crémaillères en béton armé des tribunes basses est et ouest ont été coulées sur place par étalement, du fait de leur poids élevé de 16 t, mobilisant de grandes quantités de banches. Un temps envisagé, l'emploi d'un fond de moule métallique a été écarté, sa mise en œuvre s'avérant trop délicate (figure 6).

UN PHASAGE COMPLEXE, UNE ALLIANCE PROMETTEUSE

La pose des premiers éléments de la structure métallique dans les tribunes nord et sud et dans les virages a débuté en parallèle du gros œuvre. Celle des charpentes métalliques hautes sur les structures en béton des tribunes basses est et ouest a suivi. Les crémaillères métalliques qui soutiennent les gradins préfabriqués en béton viennent s'y fixer. L'efficacité du chantier s'appuie sur une planification rigoureuse des

interventions simultanées des équipes de gros-œuvre béton et de charpente métallique.

L'entreprise de charpenterie a diffusé dès la phase de conception, dans un cahier de phasage hebdomadaire, les plans préparatoires de ses travaux de montage de la charpente, puis participé étroitement aux plans d'installation de chantier concernant ses zones d'intervention et les plannings des grues à tour (figure 7). Sur le terrain, le travail en co-activité avec les charpentiers repose sur l'élaboration d'un phasage de travaux coopté évitant les superpositions de tâches, une analyse commune des cinématiques de montage et une concertation conjointe de toutes les équipes de travaux sur les méthodes de stockage et de levage.

Depuis juillet 2013, le chantier est progressivement livré aux charpentiers. Ces spécialistes du métal doivent monter 12 000 t de charpente, dont 644 poteaux de 70 cm de diamètre allant jusqu'à 37 m de hauteur. Pré-assemblée au sol, la charpente

3- Superstructure métallique supportant les tribunes hautes côté est.

4- Ateliers de pieux pour les fondations en sol meuble et compressible.

5- Une centrale à béton a été construite sur le site.

6- Aire de préfabrication.

3- Steel superstructure carrying the upper grandstands on the eastern side.

4- Pile equipment for foundations in loose, compressible soil.

5- A concrete mixing plant was built on the site.

6- Prefabrication area.

du toit sera levée pour être placée à 40 m de haut, avant installation de 25 000 m² de sous-face en toiture. 42 000 m² de sous-faces composites viendront ensuite habiller les gradins à l'extérieur. Ces opérations complexes et minutées, à mener en toute sécurité, vont mobiliser 150 monteurs au plus fort de l'activité.

Parties prenantes à égalité dans le projet, les équipes en bâtiment et en construction métallique du chantier ont pris le temps de se connaître et de dialoguer pour travailler ensemble en toute confiance sur le Nouveau Stade de Bordeaux.

L'alliance à grande échelle de ces deux métiers aussi différents sur le projet consacre l'émergence dans le bâtiment français d'une nouvelle culture constructive mixte béton-acier, à l'instar des ouvrages d'art.

CONCLUSION

La conception et la construction du Nouveau Stade de Bordeaux répond aux enjeux de modernisation des grands

PRINCIPALES QUANTITÉS

TERRASSEMENTS GÉNÉRAUX :
80 000 m³

REMBLAIS GNT : 130 000 t

PIEUX STARSOL : 945 unités

BÉTON : 41 000 m³

ACIERS HA : 1 350 t

ACIERS TS : 1 400 t

PRODUCTION PROPRE

GROS-ŒUVRE : 210 000 heures

GRADINS PRÉFABRIQUÉS :

24 000 m

EMMANCHEMENTS

PRÉFABRIQUÉS : 9 500 m

CHARPENTE MÉTALLIQUE :

12 000 t

HABILLAGE DE SOUS-FACE :

42 000 m²

COUVERTURE : 36 000 m²

ÉTANCHÉITÉ : 20 000 m²



7
© PHILIPPE CAUMES

stades français. Son enceinte symbolique, polyvalente, agréable et durable est adaptée aux nouveaux besoins d'un public nombreux et d'une programmation variée. La prouesse architecturale et la complexité constructive sert in fine des fonctionnalités qui insufflent une nouvelle dynamique. □

7- Sept grues à tour au service d'une intense co-activité.

7- Seven tower cranes supporting intense co-activity.

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : Stade Bordeaux Atlantique (Vinci Concessions 50%, Fayat 50%)

MAÎTRES D'OUVRAGES DÉLÉGUÉS : Adim Sud-Ouest (Vinci) et Somifa (Fayat)

GROUPEMENT CONSTRUCTEURS : GTM Bâtiment Aquitaine (mandataire), GTM Sud-Ouest TP GC, Sogea Sud-Ouest Hydraulique, SEG-Fayat, Razel-Bec, Castel & Fromaget

ARCHITECTE DE CONCEPTION : Herzog & de Meuron

ARCHITECTE DE RÉALISATION : Groupe 6

BUREAUX D'ÉTUDES : Structure Ile-de-France (structure béton), Cabinet Jailly Rouby (structure métallique), Egis bâtiments sud-ouest (fluides), Mazet et associés (économie), Ingérop (VRD), IDB (acoustique)

PAYSAGISTE : MDP

HQE : Elioth

PELOUSE : ATE

BUREAU DE CONTRÔLE : Veritas

TERRASSEMENT- VRD : Moter, Fayat TP

VRD : Eurovia

FONDACTIONS PROFONDES : Soletanche Bachy Pieux

TRAITEMENT DE SOL : Ménard

CHARPENTE MÉTALLIQUE : Castel & Fromaget

COÛT DE L'ÉQUIPEMENT HT : 183 millions d'euros

ABSTRACT

THE NEW BORDEAUX STADIUM A CONCRETE-STEEL COMBINATION STANDING OUT FROM ALL OTHERS

MARC GUERPIN, VINCI

The new stadium of the city of Bordeaux, marked by an atypical combination of materials, belongs to a new generation of sporting and cultural arenas. These facilities are designed as modular spaces, comfortable and convivial, enhancing the spectators' emotions. Combining concrete and steel, prestressed and polymer materials, their structures make use of technical solutions in which the most advanced engineering requirements are met by the most advanced construction processes. These demanding projects thus lend form to complex structures on the boundary between building and civil engineering. This stadium, under construction, will be delivered in April 2015. □

NUEVO ESTADIO DE BURDEOS UN DÚO HORMIGÓN - ACERO, RECONOCIBLE ENTRE TODOS

MARC GUERPIN, VINCI

Marcado por una alianza poco común de materiales, el Nuevo Estadio de la ciudad de Burdeos pertenece a una nueva generación de recintos deportivos y culturales. Estos equipamientos se diseñan en espacios modulares, cómodos y acogedores, cómplices de la emoción de los espectadores. Al asociar hormigón y acero, pretensado y polímeros, sus estructuras recurren a soluciones técnicas que reúnen las exigencias de la ingeniería y los procedimientos constructivos más avanzados. Así, en estas obras rigurosas, se da cuerpo a estructuras complejas en la encrucijada de la construcción y de la ingeniería civil. Este estadio, en fase de construcción, se entregará en abril de 2015. □



1
© CAMILLE MOIRENC

RECONFIGURATION DU STADE VÉLODROME DE MARSEILLE ET DE SES ABORDS : UNE RÉALISATION COMPLEXE EN SITE OCCUPÉ

AUTEUR : ROMAIN VONDIÈRE - DIRECTION TECHNIQUE - GFC CONSTRUCTION

EN NOVEMBRE 2010, AREMA ET LA VILLE DE MARSEILLE SIGNAIENT LE CONTRAT DE PARTENARIAT PUBLIC-PRIVÉ POUR LA RECONFIGURATION DU STADE VÉLODROME ET DE SES ABORDS ET SON EXPLOITATION PENDANT 35 ANS. D'UN MONTANT DE 269 MILLIONS D'EUROS, CE PROJET COMPREND LA RECONFIGURATION COMPLÈTE DU STADE ET SON EXPLOITATION, AINSI QUE CELLE DU STADE DELORT (RUGBY ET ATHLÉTISME). IL EST ACCOMPAGNÉ PAR LE DÉVELOPPEMENT D'UN VASTE ÉCO-QUARTIER DE 100 000 M² TOUT AUTOUR. UN PROJET HORS DU COMMUN MENÉ TAMBOUR BATTANT SANS AUCUNE INTERRUPTION DE LA SAISON DE FOOTBALL, POUR UNE LIVRAISON DU STADE À L'ÉTÉ 2014.

INTRODUCTION

Le Stade Vélodrome comporte 2 tribunes latérales : Jean Bouin à l'ouest et Ganay à l'est, ainsi que les 2 virages nord et sud (figure 2).

La tribune Ganay est restructurée : démolition de la partie haute et construction d'une nouvelle tribune permettant d'augmenter la capacité d'accueil

de la tribune et de créer des espaces de réception.

La tribune Jean Bouin est démolie puis reconstruite, permettant de la moderniser, d'en améliorer le confort et d'augmenter sa capacité d'accueil en espaces VIP. Les espaces réservés aux sportifs et aux officiels gagnent en confort et modernité.

1- Vue aérienne du Stade Vélodrome dans la ville au 09/09/13.

1- Aerial view of the Vélodrome Stadium in the city on 9.09.13.

Les virages nord et sud sont reconfigurés pour permettre l'accueil des supporters dans de meilleures conditions, en améliorant la circulation des personnes et leur confort.

Un parvis surélevé, réalisé en périphérie du stade, permet la circulation piétonne autour de l'enceinte. Construit sur deux niveaux, ce parvis permet la création de



2

nombreux espaces dont les parkings. La sécurité du stade est améliorée avec la création d'une voie de circulation sous l'enceinte.

Réservée aux services de sécurité, elle permet d'accéder rapidement à n'importe quelle zone du stade sans passer par l'extérieur.

LES CONTRAINTES DE SITE

Le site du Stade Vélodrome se situe dans un environnement urbain dense : commerces, habitations, espaces de congrès et d'événements du parc Chanot.

Plusieurs ouvrages d'infrastructures sont à proximité immédiate du stade :

2- Stade Vélodrome de Marseille (SCAU et Didier Rogeon Architecture).

3- Vue d'ensemble du gros-œuvre de la tribune Ganay.

2- Vélodrome Stadium of Marseille (SCAU and Didier Rogeon Architecture).

3- General view of structural work for the Ganay grandstand.

- Le tunnel du métro de la ligne 2 dont le prolongement est un viaduc aérien qui jouxte le virage sud ;
- La plus grosse station d'épuration enterrée d'Europe, sous le parvis Ganay et le stade Delort ;
- Les travaux du futur tunnel Prado Sud en cours de réalisation.

Le phasage de réalisation de l'opération doit permettre de maintenir le stade en activité pendant toute la durée des travaux avec 42 000 places. Les travaux se dérouleront entre juin 2011 et le troisième trimestre de 2014. La durée des travaux comportera 3 trêves estivales durant lesquelles le stade sera fermé au public.

LES TRAVAUX DANS L'EXISTANT

TRIBUNE GANAY

La tribune Ganay est conservée dans son ensemble, seule la partie de gradins dépassant en porte-à-faux du voile arrière a été démolie.

Des locaux sont créés dans les zones non démolies, et notamment dans les ouvrages « historiques » du vélodrome construits en 1935 : locaux techniques, vestiaires, salon VIP, cages d'escaliers et d'ascenseurs. Les structures de cette partie du projet sont constituées de planchers collaborants portant sur des poutres métalliques appuyées sur des poteaux métalliques et voiles béton. L'ensemble de cette nouvelle structure est désolidarisé de celles existantes et fondée sur micropieux. Pour créer une voie de service intérieure, des ouvertures sont ajoutées dans les voiles béton armé existants, avec la réalisation de reprises en sous-œuvre.

LOCAUX SOUS LES VIRAGES NORD ET SUD

Le projet prévoit la création de locaux sous ces tribunes existantes (blocs sanitaires, vestiaires, locaux techniques) et également l'insertion de la voie de service intérieure. Ces structures sont également constituées de planchers collaborants portant sur des poutres métalliques et des voiles en béton. Certaines poutres métalliques traversent les voiles existants. L'ensemble des structures créées est désolidarisé des structures existantes. ▷



3



4

© VÉRONIQUE PAUL

FOSSES EN PÉRIPHÉRIE DE L'AIRE DE JEUX

Les fosses existantes en périphérie de l'aire de jeux sont réaménagées pour être étanchées et couvertes. Ceci permet d'assurer le stockage des eaux pluviales recueillies sur la couverture et leur utilisation en eaux grises, pour l'arrosage de la pelouse notamment.

L'EXTENSION DE LA TRIBUNE GANAY

La tribune neuve est constituée d'un bloc central et de deux blocs latéraux, qui viennent s'adosser à la structure existante et créer un plan de gradins dans la continuité du précédent. Cette tribune abrite le poste de commandement de sécurité de l'enceinte et un grand salon VIP.

Cette tribune comporte 6 niveaux sous gradins et le dernier gradin culmine à 52,60 m NGF soit 41 m par rapport au sol. Elle porte la capacité d'accueil à 22 000 places.

L'ossature de cette tribune est en béton

armé, avec un système de portiques en poteaux-poutres et des planchers en dalles alvéolaires précontraintes, suivant une trame de 10 m.

Les gradins en béton sont préfabriqués en forme de « double L » et clavés entre eux pour assurer l'effet diaphragme vis-à-vis des sollicitations dues au vent et au séisme. Ces gradins reposent sur des poutres-crémaillères ou voiles-crémaillères en joints de dilatation, coulés en place.

La structure est fondée sur pieux forés à la tarière creuse descendus à 17 m pour s'ancrer dans les marnes compactes du substratum stampien.

Le contreventement de l'ensemble est assuré par des voiles en béton, placés selon les circulations verticales : cages d'escaliers, cages d'ascenseurs et voiles séparatifs entre joints de dilatation.

Un chemin de ronde périphérique, préfabriqué et clavé sur les crémaillères, vient ceinturer l'ensemble du gradinage. L'organisation de chantier a été assurée

4- Vue d'ensemble du gros-œuvre de la tribune Jean Bouin.

5- Vue du gros-œuvre de la tribune Jean Bouin depuis l'intérieur au 11/10/13.

6- Avancement du gros-œuvre de la tribune Jean Bouin au 18/11/13.

4- General view of structural work for the Jean Bouin grandstand.

5- View of structural work for the Jean Bouin grandstand from the interior, on 11.10.13.

6- Progress on structural work for the Jean Bouin grandstand as at 18.11.13.

avec 3 grues situées à l'extérieur pour les moyens de levage.

À l'exception des dalles alvéolaires et des gradins, l'ensemble des bétons a été coulé en place. Les ouvrages ont été réalisés sur un étaieement général et avec des outils de coffrage spécifiques pour les crémaillères (figure 3).

LA RECONSTRUCTION DE LA TRIBUNE JEAN BOUIN

Cette tribune présidentielle est entièrement démolie, à l'exception de 2 tribunes basses latérales situées de part et d'autre de la tribune.

La tribune neuve est découpée en 5 blocs : 1 bloc central, 2 blocs latéraux et de 2 blocs d'extrémité. Cette tribune comporte 9 niveaux sous gradins et le dernier gradin culmine à 61,75 m NGF (10 m de plus que Ganay) soit 45 m par rapport au sol. Elle porte la capacité d'accueil à 19 000 places et abrite les salons VIP, les loges, les espaces média, ainsi que les zones réservées aux joueurs professionnels.



5



6

© VÉRONIQUE PAUL

L'ossature de cette tribune est en béton armé, avec un système de portiques en poteaux-poutres et des planchers en dalles alvéolaires précontraintes, suivant une trame de 10 m pour les tribunes latérales.

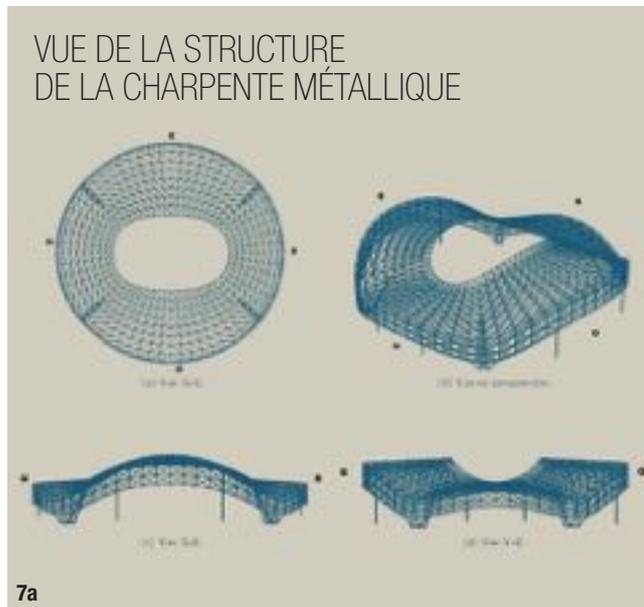
La tribune centrale est conçue suivant la même trame de 10 m, mais avec un système de poteaux-poutres en partie supérieure et de voiles en partie inférieure, selon la disposition des locaux et des cages d'escaliers.

Le contreventement est essentiellement assuré par un système de voiles principaux dans les deux directions. Un contreventement mixte par portiques et voiles est également utilisé pour certains cas.

Les gradins sont constitués d'éléments préfabriqués de section en « double L » qui sont dimensionnés pour porter sur 10 m d'une file à l'autre. Les gradins préfabriqués sont clavés entre eux. L'étanchéité à la pluie est assurée par la présence d'un bac acier en sous face des gradins pour récupérer les eaux éventuelles.

Les gradins s'appuient sur des poutres crémaillères préfabriquées en béton armé. Afin d'alléger le poids des éléments préfabriqués et compte-tenu des recouvrements d'aciers au clavage des nœuds poteaux-poutres, ces poutres sont préfabriquées en forme de "U". Dans les deux derniers niveaux, les poutres-crémaillères qui sortent du plan de la façade, s'appuient en haut des tribunes sur des bracons métalliques inclinés, permettant de reporter les charges sur les porteurs inférieurs. Les façades intègrent des bandeaux horizontaux en béton armé préfabriqués non porteurs.

Les joints de dilatation sont espacés transversalement à la tribune de 30 m, et le découpage des blocs entraîne



7a
© GFC CONSTRUCTION

7a- Vue de la structure de la charpente métallique.

7b- Vue 3D d'un nœud d'assemblage.

7c- Fabrication d'un nœud en atelier.

7a- View of the steel structure.

7b- 3D view of an assembly joint.

7c- Production of a truss joint in workshop.

des distances maximales de 60 m. Les effets thermiques sont pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages. Compte-tenu des besoins de conception parasismique, la largeur des joints de dilatation est limitée à 6 cm jusqu'au niveau 2 afin de simplifier le traitement d'étanchéité au niveau des joints sur parvis. Dans les niveaux supérieurs, la largeur varie de 4 cm à 8 cm en fonction de la typologie des blocs.

L'ensemble repose sur des pieux forés à la tarière creuse dont l'implantation évite les fondations existantes et intègre des redressements au droit de certains pieux existants (figure 4).

L'organisation du chantier est assurée, pour les moyens de levage, par 5 grues situées à l'extérieur, dont 2 à flèche relevable, et 1 grue à l'intérieur du stade.

Cette tribune se réalisera en 6 mois, avec une organisation de travail en 3 postes de 8 heures et 6 jours sur 7. Le recours à la préfabrication a été maximisé par rapport à la tribune Ganay : dalles alvéolaires, poutres crémaillères, voiles en « prémurs », poteaux préfabriqués (figures 5 & 6). Pour mener ce chantier, les études de méthodes ont été réalisées en 3D, afin de définir les modes opératoires liés à l'organisation générale de la logistique et à la réalisation d'ouvrages spécifiques.

LA RÉALISATION DE LA TOITURE

DESCRIPTION DE LA STRUCTURE MÉTALLIQUE DE COUVERTURE DU STADE

La couverture du stade est un ouvrage en structure métallique disposant d'une enveloppe en membrane souple. Cette enveloppe est formée d'une partie horizontale dénommée « couverture » et d'une retombée verticale appelée « jupe » (figure 7a).

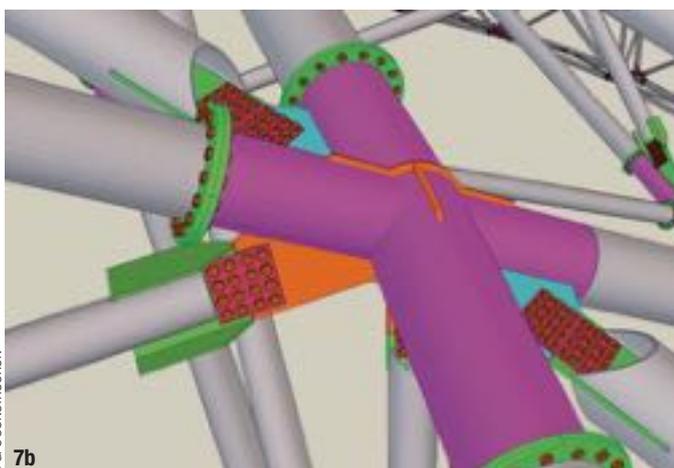
En plan, la surface de la couverture est à l'intérieur de deux courbes :

→ La rive extérieure suit une ellipse de grand diamètre (259 m) et de petit diamètre (252 m),

→ La rive intérieure suit une courbe de dimensions à l'axe 131 m et 85 m. Cette courbe est inscrite en plan dans l'emprise du terrain du jeu.

En élévation, la rive extérieure décrit un mouvement qui suit la courbe des gradins.

La rive intérieure reproduit ce mouvement sur une plus faible amplitude, afin que les deux courbes atteignent les mêmes altitudes en milieu de gradins (avec une pente au sommet de 5 % vers l'extérieur pour évacuation des EP).



© GFC CONSTRUCTION
7b



7c



8

© VÉRONIQUE PAUL

La couverture forme donc un ruban qui s'élève en arche au dessus de chaque gradin (nord, sud, est, ouest).

L'altitude de la rive extérieure atteint la côte +69,85 m NGF au plus haut sur les gradins est et ouest, et +48,12 m NGF au plus haut sur les gradins nord et sud. Les altitudes maximales de la rive intérieure sont supérieures à celles de la rive extérieure : la rive intérieure atteint la côte +74,26 m NGF au sommet de Ganay et Jean Bouin, +52,275 m NGF au sommet des virages.

Les points bas de la couverture sont situés au droit des mégapoteaux, localisés aux quatre coins, dans les passa-

ges entre les gradins. La rive extérieure connaît son point bas à cet endroit, à la cote +34,700 m NGF environ.

La hauteur de la jupe est variable entre 18 et 23 m.

La couverture des tribunes compte pour environ 43 200 m² et la jupe en retombée représente environ 16 800 m².

FONCTIONNEMENT DE LA STRUCTURE

La structure sur laquelle s'appuie la couverture est composée d'une succession de poutres-treillis radiales et parallèles, contreventées par des diagonales. L'ossature est réalisée en profilés

8- Aire de montage de la charpente métallique.

9- Pose du 1^{er} colis de charpente de la tribune Ganay.

8- Steel structure assembly area.

9- Placing the first structure package for the Ganay grandstand.

tubulaires ronds et en acier galvanisé. L'entraxe des radiales varie entre la rive intérieure et la rive extérieure, de 8 à 12 m. La maille de la structure se décompose en 60 radiales et 10 parallèles. La structure métallique fonctionne comme une nappe treillis tridimensionnelle, appuyée sur 4 méga-poteaux et 8 poteaux intermédiaires. Un fonctionnement se développe également avec deux arcs, dont le premier est noyé dans la nappe treillis et le second est situé dans la jupe. Ces arcs prennent ensuite appui sur les poteaux intermédiaires extérieurs et sur les mégapoteaux situés dans les failles.



9

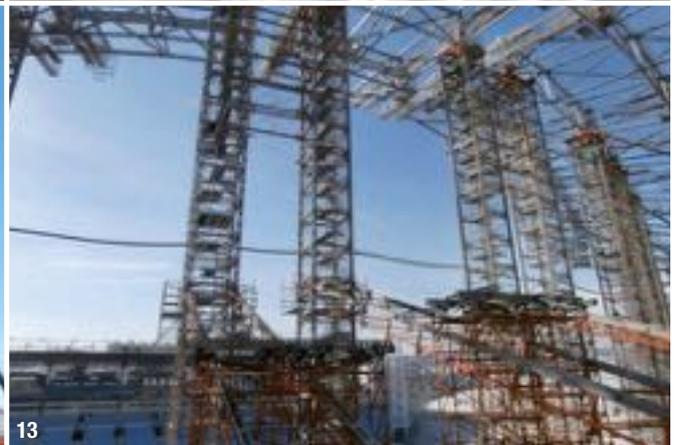
© VÉRONIQUE PAUL



© VÉRONIQUE PAUL



© VÉRONIQUE PAUL



Les mégapoteaux sont formés par deux jambes de force (en V incliné inversé), et quatre poteaux de contreventement situés dans le plan de la jupe.

chaque mégapoteau est ancré, par précontrainte, sur un massif de fondations de 15 m x 8,5 m x 2,5 m ht, reposant sur des barrettes.

Ce treillis est constitué de 5 940 barres et de 1 633 nœuds (avec des nœuds à 9 barres convergentes).

L'échantillonnage des tubes varie de diamètres ϕ 244 – ep 5 mm à ϕ 508 – ep 12,5 à 40 mm, et jusqu'à ϕ 1016 – ep 30 mm pour les jambes de force des mégapoteaux.

Les aciers sont de type S355 J0H et J2H pour les tubes laminés à froid, et de type S355 J0, J2 et K2 pour les plats laminés à chaud.

Les assemblages sont de type boulonné, avec des brides frontales ou des brides latérales. Des assemblages soudés correspondant au point d'épure des nœuds sont réalisés avant la mise en œuvre de la galvanisation, pour préfabriquer les nœuds en atelier (figures 7b & 7c).

Les boulons ont de type HR 10.9 k2 pour les brides frontales et de type HV 10.9 k0 pour les brides latérales.

10- Vue des palées intérieures sur gradins de la tribune Ganay.

11- Vue des bracons des palées intérieures de la tribune Ganay.

12- Vue des palés de jupe de la tribune Ganay.

13- Hissage du câble de précontrainte de la tribune Ganay.

10- View of internal bents on terraces of the Ganay grandstand.

11- View of stays for internal bents of the Ganay grandstand.

12- View of bents for the perimeter wall of the Ganay grandstand.

13- Hoisting the prestressing cable for the Ganay grandstand.

Pour améliorer l'adhérence des assemblages, un traitement post-galvanisation est appliqué. Des essais de mesures du coefficient de frottement ont été réalisés, avec la prise en compte de la relaxation. Des études spécifiques ont été réalisées en soufflerie au CSTB, à Nantes, pour déterminer les actions du vent (statiques et dynamiques) sur la couverture, et pour analyser également les conditions de confort sur l'aire de jeux et sur le site.

En phase définitive, la couverture est en un seul bloc, sans joints de dilatation. La structure est dimensionnée pour son état final de service et a fait l'objet de modélisations 3D statique et sismique. Le nouveau zonage sismique est pris en compte. À ce titre, la charpente est totalement indépendante de la structure des tribunes et séparée de ces dernières par un joint de mouvement sismique de 40 cm environ.

En phases provisoires de construction, la stabilité de chaque état de charpente, pris indépendamment, est vérifiée avec des modélisations de chaque phase d'avancement de chantier.

Ces phases générales de travaux ont également fait l'objet d'essais en soufflerie au CSTB.

Durant ces étapes de construction, des palées sont disposées dans les failles aux quatre angles, au droit des mégapoteaux permettant d'assurer la stabilité d'ensemble de la couverture, avant son fonctionnement monobloc final.

Les poussées d'arc qui existent durant ces phases, sont équilibrées par 3 câbles de précontrainte 37T15S, ancrés en tête des palées d'angle. Ces câbles jouent donc le rôle de « sous-tendeur » comme dans un bow-string (figure 13). Cet ouvrage ne nécessite pas de résistance au feu particulière car la structure est visible et la toiture non accessible. La protection anticorrosion est assurée par galvanisation d'une épaisseur de 100 microns.

MÉTHODOLOGIE DE POSE

Les études de levage et de montage font l'objet d'études d'exécution spécifiques. Elles sont étroitement liées aux études d'exécution. De ce fait, ces études doivent être menées conjointement.

Le colisage de la charpente a donné un découpage en caissons-treillis de 1 trame et 2 trames dont le poids varie de 130 t à 160 t. Le colis de la radiale de faille pèse 180 t.



14

© GFC CONSTRUCTION

Ces caissons sont pré-assemblés « au sol » sur des aires de montage spécifiques, suivant leur géométrie définitive. La hauteur de montage par rapport au sol peut aller jusqu'à 20 m (figure 8). Les moyens de levage mis en œuvre consistent en 2 grues de 1 250 t. Deux palonniers spécifiques ont été mis au point, suivant la taille et la géométrie des colis. Ils utilisent un procédé d'élingues avec centrale hydraulique permettant de régler l'assiette du colis (figure 9).

Des palées provisoires de montage sont implantées pour permettre la réception des colis de charpente, et le réglage des contre-flèches de la structure.

Ce réglage des déformations est facilité par la présence de points fixes constitués des mégapoteaux, des quatre palées provisoires des failles et des lignes d'appui des palées de montage.

On distingue une file de palées à l'extérieure sous la jupe et une file à l'intérieure reposant sur les gradins par l'intermédiaire d'ouvrage de supportage (portiques béton). Ces palées sont des éléments métalliques préfabriqués, de dimensions 4 m x 4 m, assemblés par boulonnage. Elles sont stabilisées par des bracons métalliques ancrés sur les tribunes (figures 10 à 13).

Compte-tenu du maintien du stade en service, chaque phase provisoire de pose, avec présence du public (lors de matchs), fait l'objet d'un dossier d'exécution spécifique. Ce dossier soumis au bureau de contrôle pour l'attestation de

solidité et à la commission de sécurité d'avant match. Ceci concerne la structure de la charpente mais également les palées de montage.

COUVERTURE

Cette membrane est en PTFE (Poly-TétraFluoroEthylène) et se développe en double-courbure (ou « selle de cheval »), avec des appuis directs sur les radiales de charpente primaire et sur les nœuds via des arceaux sous-tendus (figures 14 & 15).

En façade, sur la jupe, la pose est effectuée à plat.

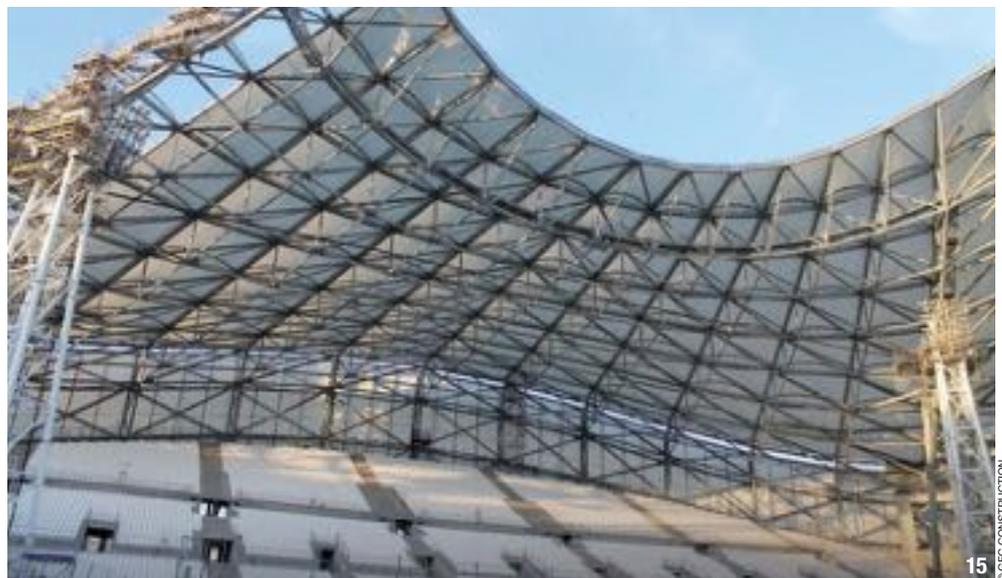
14- Vue de la toiture de la tribune Ganay en novembre 2013.

15- Vue de la toiture du virage nord en novembre 2013.

14- View of the roof of the Ganay grandstand in November 2013.

15- View of the roof of the North curve in November 2013.

Deux procédures ATEX sont nécessaires, 1 pour la toiture et 1 pour la jupe. Des études spécifiques ont été entreprises dans ce cadre : mise au point des protocoles d'essais et réalisation des essais avec des référentiels français (essais à la fatigue, détermination du Module d'Young, etc.), étude d'inversion de courbure sous charge ascendante, essais de fatigue, absence de percussion entre membrane et charpente primaire, absence de poche d'eau dans la membrane avec déplacements de la charpente primaire, etc. Les eaux pluviales de la couverture sont



15

© GFC CONSTRUCTION

16- Vue des Logements PAI depuis la rue Teisseire.

17- Centre commercial PIA - Vue depuis l'angle rue Ray Grassi - bd Michelet.

16- View of "PIA" programme housing from rue Teisseire.

17- "PIA" programme shopping mall - View from the corner of rue Ray Grassi and bd Michelet.



16



17

© AREMA/SCAU/DIDIER ROGEON/MIR/BENOY/GFC CONSTRUCTION

CHIFFRES CLÉS

- En période de pointe, plus de 500 personnes interviennent sur le chantier
- Plus de 240 entreprises (en pointe) partenaires dont plus de 50% d'entreprises locales
- 40 000 m³ de béton
- 3 800 t d'acier pour béton
- 6 000 t de charpente
- 65 000 m² de couverture
- 13 km de gradins
- Des grues exceptionnelles de 1 250 t
- 67 000 places (contre 60 000 auparavant), qui font du Vélodrome le deuxième plus grand stade de France
- 5 étoiles : niveau au classement UEFA attendu par le stade

MONTANT DES TRAVAUX

- 269 millions d'euros (Stade Vélodrome, stade Delort, aménagement du parvis et des berges de l'Huveaune)

INTERVENANTS

AREMA : Elle réalise pour le compte de la Ville de Marseille le projet de reconfiguration du Stade Vélodrome et de ses abords. Ses actionnaires sont la Caisse des Dépôts, la Caisse d'Épargne Provence-Alpes-Corse, le FIDEPPP, le fonds Infravia, GFC Construction et Bouygues Énergies et Services, toutes deux filiales de Bouygues Construction. Arema est en charge de l'exploitation pendant 35 ans.

LE GROUPEMENT RÉALISATEUR : GFC Construction (entreprise générale), SCAU et Didier Rogeon Architecte (architectes), Egis, Garcia Ingénierie et Beterem (bureaux d'études), Bouygues Énergies et Services (maintenance).

CIRMAD : Cirmad a en charge l'aménagement des 20 hectares autour du site du Stade Vélodrome, la commercialisation des terrains pour le compte d'Arema ou des garants (CDC, CEPAC) et le développement de chacun des programmes immobiliers.

récupérées par un chéneau extérieur périphérique, puis des descentes siphonnées, pour être renvoyées dans les fosses de stockage en périphérie du terrain. Compte-tenu de la couverture du stade et de l'ombre portée sur la pelouse, la qualité du gazon sera assurée par le recours à la luminothérapie.

LES PROGRAMMES IMMOBILIERS D'ACCOMPAGNEMENT BIEN PLUS QU'UN STADE, UN "QUARTIER DE VIE"

Aux abords du Stade Vélodrome, les équipes de CIRMAD (réseau de développement immobilier de Bouygues Construction) développent un vaste éco-quartier de 100 000 m² et aménagent les berges de l'Huveaune. Le Stade Vélodrome sera ainsi parfaitement intégré dans son environnement. Ce projet d'exception, également réalisé par les équipes de GFC Construction, comprend des produits diversifiés (figures 16 & 17) :

- 691 logements garantissant une mixité sociale et générationnelle (résidences pour étudiants et pour personnes âgées, logements sociaux, logements intermédiaires et libres) ;
- Un centre commercial de 22 000 m² ;
- Une résidence intergénérationnelle ;
- Une résidence pour étudiants ;
- Un pôle santé supplémentaire (orthopédie et ophtalmologie, 6 blocs opératoires) ;
- Un complexe hôtelier 3 étoiles (162 chambres) et 4 étoiles (126 chambres) ;
- Un pôle tertiaire de près de 12 000 m². □

ABSTRACT

RECONFIGURATION OF THE VELODROME STADIUM IN MARSEILLE AND ITS SURROUNDS: A COMPLEX PROJECT ON AN OCCUPIED SITE

ROMAIN VONDIÈRE, GFC CONSTRUCTION

The complete reconfiguration of the Vélodrome Stadium and the Delort Stadium (rugby and athletics) is covered by a contract worth €269 million, under a public-private partnership including operation for 35 years. The Vélodrome Stadium has four grandstands. The Ganay grandstand is restructured, the Jean Bouin grandstand is demolished and then rebuilt, and the North and South curves are reconfigured. The frame of the grandstands is in reinforced concrete, with a column-beam portal structure and floors of prestressed honeycomb slabs, following a 10-metre spacing pattern, wind-braced by shear walls. The roof of the stadium is a galvanised tubular lattice steel structure. The surface is elliptical and the inner ring is circumscribed in a plane within the area covered by the playing field. In elevation, the outer edge describes a movement following the curve of the terraces. The roof covering is executed in PTFE. □

RECONFIGURACIÓN DEL ESTADIO VELÓDROMO DE MARSELLA Y SUS INMEDIACIONES: UNA REALIZACIÓN COMPLEJA EN UN SITIO OCUPADO

ROMAIN VONDIÈRE, GFC CONSTRUCTION

La reconfiguración completa del Estadio Vélodrome y del estadio Delort (rugby y atletismo) ha sido objeto de un contrato de 269 millones de euros, en asociación público-privada que incluye su explotación durante 35 años. El Estadio Vélodrome consta de 4 tribunas. Se reestructurará la tribuna Ganay, se demolerá y, después, se reconstruirá la tribuna Jean Bouin y se reconfigurarán las curvas norte y sur. La estructura de las tribunas es de hormigón armado, con un sistema de pórticos en pilares-vigas y pisos de losas alveoladas pretensadas, que siguen una trama de 10 m, reforzada por láminas. El techo del estadio es una estructura metálica en celosía tubular galvanizada. La superficie es elíptica y el anillo interior está circunscrito en plano en la superficie del terreno de juego. En elevación, el borde exterior describe un movimiento que sigue la curva de las gradas. La cubierta es de PTFE. □



© ELISA/VALODE&PISTRE ARCHITECTES/ATELIER FERRET ARCHITECTURE

SÉCURITÉ ET CONFORT DANS LES STADES DE DEMAIN

AUTEURS : GÉRARD GRILLAUD, CSTB NANTES - JÉRÔME VINET, CSTB NANTES - VINCENT DE VILLE DE GOYET, BUREAU GREISCH - ROMAIN VONDIÈRE, GFC CONSTRUCTION

LES STADES SONT DEVENUS DES OBJETS ARCHITECTURAUX OÙ INGÉNIEURS ET ARCHITECTES SE DISPUTENT L'INNOVATION ET L'ORIGINALITÉ EN CRÉANT DES STRUCTURES DE PLUS EN PLUS AUDACIEUSES. LES AMBIANCES QUI Y RÈGNENT CONDITIONNENT DIRECTEMENT LA FRÉQUENTATION DU STADE. LE CSTB A DÉVELOPPÉ UNE EXPERTISE ET UNE INGÉNIERIE ADAPTÉES AUX STADES : DIMENSIONNEMENT AU VENT, AMBIANCES CLIMATIQUES, SÉCURITÉ INCENDIE ET DÉSENFUMAGE, AMBIANCE ACOUSTIQUE INTÉRIEURE, IMPACT ACOUSTIQUE EXTÉRIEUR, CONFORT VISUEL, FAISABILITÉ ET RÉSISTANCE DE L'ENVELOPPE.

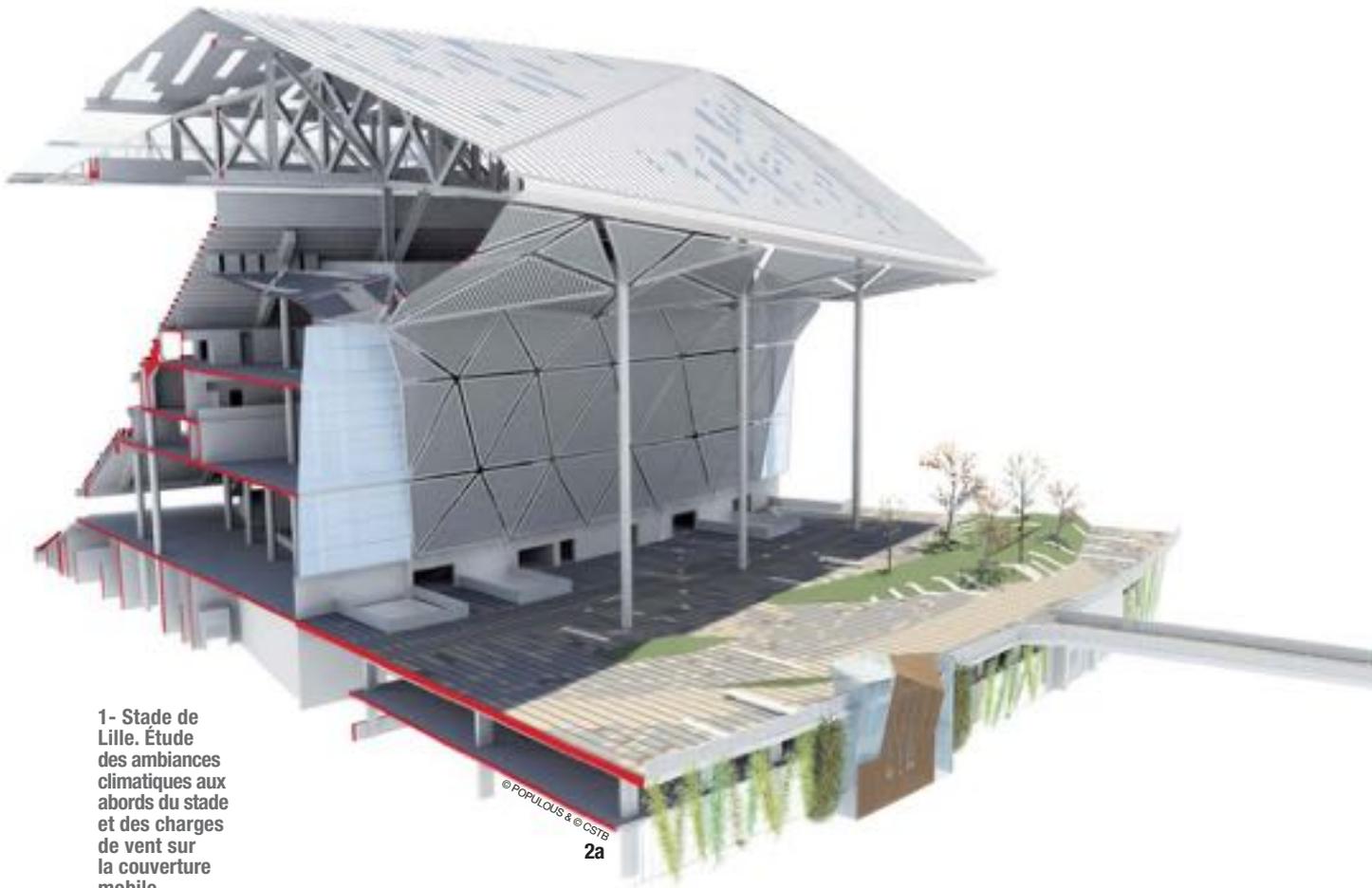
INTRODUCTION

La construction d'un stade revêt de multiples enjeux technologiques et institutionnels. Bâtiments de prestige, symboles des grandes métropoles, les stades stimulent la revitalisation des espaces urbains et façonnent le caractère du site dans lequel ils sont érigés.

Espace à la fois ouvert et couvert, le stade est porteur de contraintes et de spécificités architecturales qui induisent les ambiances qui y règnent. Que ce soient des ambiances sonores, visuelles ou climatiques, celles-ci conditionnent directement sa fréquentation (figure 1).

Les stades d'aujourd'hui sont aussi des objets architecturaux où ingénieurs et architectes se disputent l'innovation et l'originalité en créant des structures de plus en plus grandes, élancées, légères, qu'il faut construire avec toutes les marges de sécurité nécessaires malgré les incertitudes et inconnues

résultant de ce caractère novateur. Depuis une vingtaine d'années, le CSTB a développé aux côtés des concepteurs, maîtres d'œuvres et maîtres d'ouvrages une expertise et une ingénierie adaptées aux thématiques des stades pour assurer le rayonnement de ces objets architecturaux en toute sécurité et



1- Stade de Lille. Étude des ambiances climatiques aux abords du stade et des charges de vent sur la couverture mobile.

2a, 2b & 2c- Stade des Lumières à Lyon. Dimensionnement des éléments structuraux, méga poteaux, treillis, potelets.

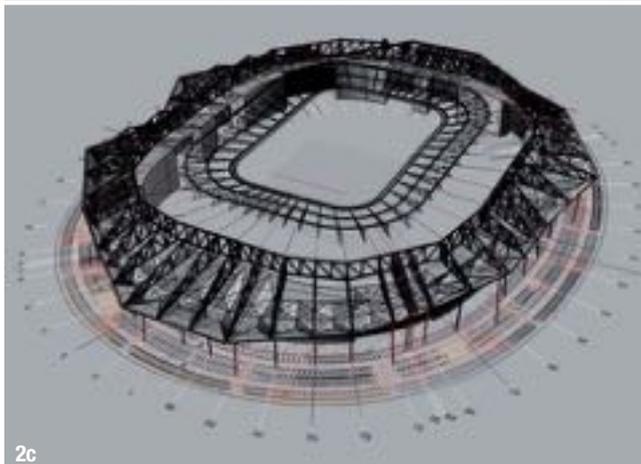
1- Lille Stadium. Study of climatic conditions in the surrounds of the Stadium and wind loads on the mobile roof covering.

2a, 2b & 2c- Stade des Lumières stadium in Lyon. Sizing of structural elements, mega-beams, mega-columns, trusses and studs.

en offrant aux spectateurs un confort optimum. La complémentarité des approches physiques et numériques qui sont utilisées conjointement permet une approche globale des problématiques constructives : sécurité, dimensionnement au vent, impact environnemental, confort...



2b



2c

LE DIMENSIONNEMENT AU VENT

Les charges induites par le vent sur un bâtiment de grandes dimensions comme l'est un stade sont fonction de son environnement proche (bâtiments avoisinants), des conditions régionales de vent (probabilité d'occurrence de vents forts,) ainsi que de ses caractéristiques géométriques (forme, porosité) et structurelles (distribution de raideurs et masses).

La particularité d'un stade est d'avoir une couverture de grandes dimensions, couvrant les tribunes, où naissent de fortes charges aérodynamiques de soulèvement ou d'enfoncement induites par les vents forts : le caractère horizontal de la toiture produit des sollicitations très fluctuantes, agissant sur la couverture de manière aléatoire vers le haut et vers le bas.

Pour "capturer" ces charges aérodynamiques à la fois fluctuantes dans le temps et dans l'espace, une technologie de mesures de pressions synchrones sur maquette de stade à échelle réduite (1/250^e en général) en soufflerie a été développée. Des centaines de prises de pressions reliées à autant de capteurs, échantillonnées de manière synchrone à haute cadence, permettent d'enregistrer le suivi temporel du champ de pression agissant sur l'ensemble de la couverture. ▷



3a

© MIR & © CSTB

Sur la base de ces mesures, toutes les sollicitations nécessaires au dimensionnement au vent, à la fois local (pour des éléments de couverture) et global (pour la charpente, les fondations), peuvent en être déduites, effets dynamiques des modes de vibration compris, par une approche calcul qui intègre les données du modèle éléments finis de la couverture développé par l'équipe projet (figures 2a, 2b & 2c).

En phase d'analyse, les méthodes d'identification et de simplification des cas de charges enveloppes de l'ensemble des sollicitations résultant des actions du vent sont développées en concertation étroite avec les équipes de conception (figures 3a, 3b, 3c & 4).

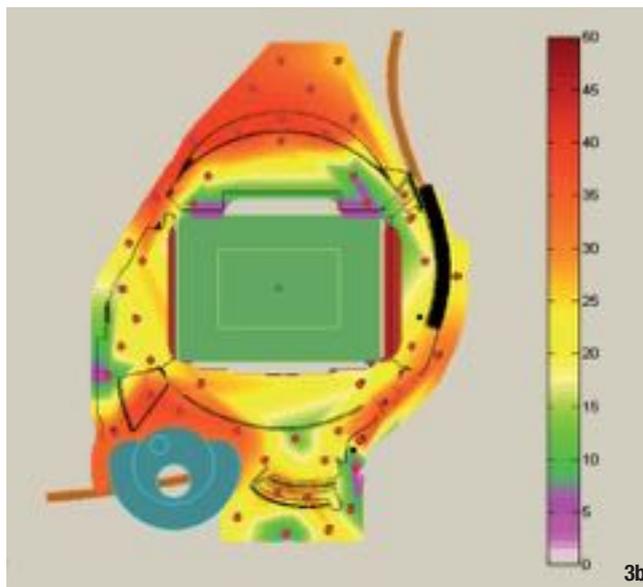
LES AMBIANCES CLIMATIQUES

Le choix de l'emplacement d'un stade, les grands traits de son architecture, sont cruciaux vis-à-vis de l'exposition aux vents dominants.

Le vent peut rendre les gradins très inconfortables, gêner la trajectoire du ballon lors des rencontres sportives, ou empêcher l'homologation de records dans les compétitions d'athlétisme.

À l'inverse un manque de vent peut être étouffant en période estivale et nuire à la qualité de la pelouse par manque de ventilation.

La notion de confort dans ce type d'espace semi extérieur est complexe car fonction de nombreux facteurs climatiques, vent, température, rayonnement solaire, humidité, précipitations et ombre projetée de la couverture...



© MIR & © CSTB

3b

3a, 3b & 3c- Stade Vélodrome de Marseille. Études de dimensionnement au vent et ambiances climatiques (SCAU et Didier Rogeon Architecture).

3a, 3b & 3c- Vélodrome Stadium in Marseille. Studies of wind resistance and climatic conditions (SCAU and Didier Rogeon Architecture).



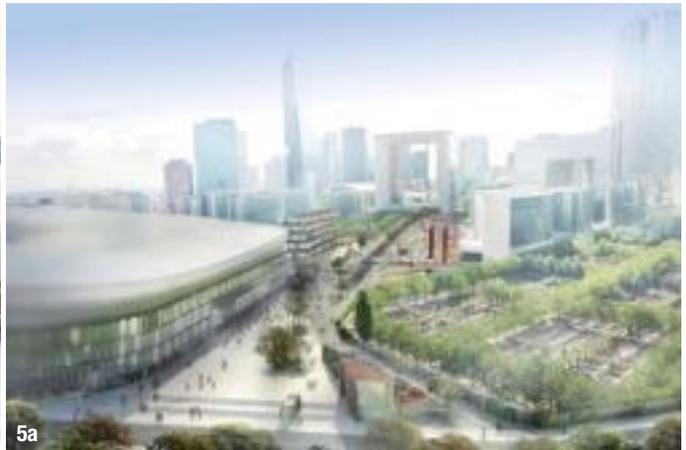
3c

Les outils utilisés, comme les essais en soufflerie permettant de caractériser les champs de vent et de turbulence à l'échelle du spectateur associés aux simulations numériques caractérisant le rôle de la température, du rayonnement solaire et de la pluie, sont complémentaires pour exprimer le confort dans et aux abords du stade sous forme d'un critère de gêne intégrant les statistiques météorologiques locales.

Les résultats obtenus ouvrent le dialogue avec les équipes de conception pour optimiser les zones jugées inconfortables. Ces résultats permettent aussi d'identifier les problèmes de sécurité liés à la stabilité des piétons (figures 5a, 5b, 5c & 5d).



4
© WILMOTTE & ASSOCIÉS SA



5a
© RACING ARENA & © CSTB

LA SÉCURITÉ INCENDIE ET LE DÉSENFUMAGE

La mise en sécurité des personnes est l'objectif principal des codes et règlements de sécurité contre l'incendie. L'évaluation de l'efficacité des moyens destinés à protéger les personnes, envisagés dans un projet ou déjà mis en place dans un ouvrage, est une étape indispensable d'une étude d'ingénierie complète. Pour tout

scénario de feu retenu, il faut vérifier que les personnes potentiellement exposées aux dangers du feu peuvent, soit s'éloigner de l'ouvrage en restant en sécurité, soit y trouver une zone de refuge (figure 6).

Le CSTB est reconnu compétent par le ministère de l'intérieur pour la réalisation d'études d'ingénierie du désenfumage dans le cadre de l'article DF4 du règlement de sécurité contre les risques

4- Stade Allianz Riviera à Nice. Études de dimensionnement au vent.

5a, 5b, 5c & 5d- Stade Arena 92. Études de confort aux abords du stade et d'impact de pluies battantes.

4- Allianz Riviera Stadium in Nice. Wind resistance studies.

5a, 5b, 5c & 5d- Arena 92 Stadium. Studies of wind resistance, comfort in the stadium surrounds and impact of torrential rain.

d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public.

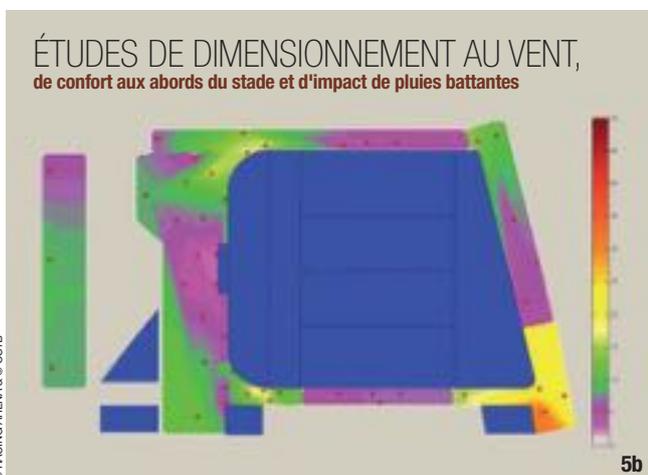
Ces études :

- Consistent à dimensionner un système de désenfumage tenant compte des caractéristiques architecturales de l'ouvrage et des activités accueillies au sein de celui-ci ;
- Suggèrent des recommandations sur des mesures d'exploitation spécifiques à mettre en œuvre le cas échéant.

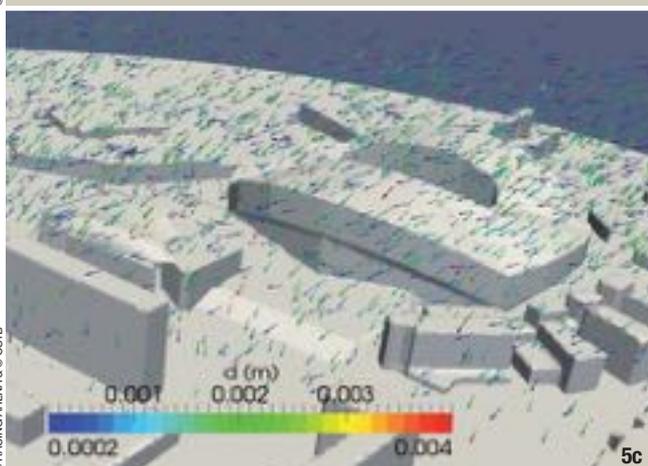
Ces études relatives au contrôle de l'enfumage et à l'évacuation sont menées par simulation numérique. Pour évaluer l'efficacité d'un dispositif de désenfumage, le CSTB peut concevoir et mettre en œuvre des essais d'enfumage in situ innovants (fumée « chaude » et « propre ») permettant de rendre compte des phénomènes physiques dominants.

LES AMBIANCES ACOUSTIQUES INTÉRIEURES

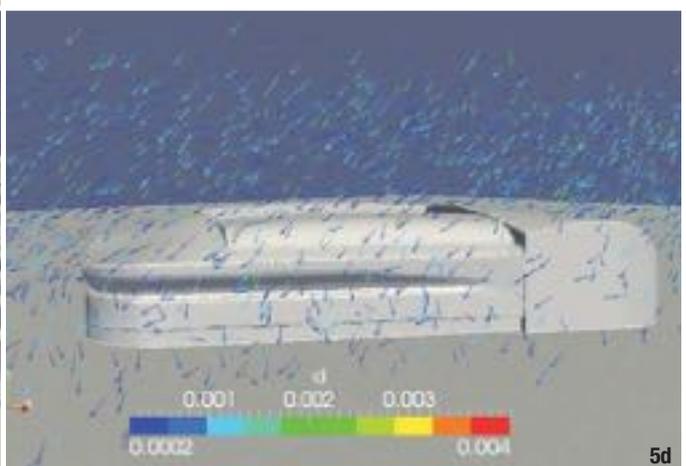
Un autre aspect du confort dans un stade est la qualité des ambiances acoustiques à l'intérieur de l'enceinte, ▷



5b



5c



5d

mais les diverses fonctions des stades contemporains exigent aujourd'hui des ambiances acoustiques souvent très différentes. Pour le spectateur, une ambiance acoustique agréable est un environnement sonore qui lui permet de profiter pleinement de l'évènement auquel il assiste.

Pour un match de football, une bonne ambiance est celle qui permet aux spectateurs d'entendre la voix des autres spectateurs et particulièrement des supporters de la même équipe créant ainsi une ambiance "effervescente" : cette ambiance acoustique ne doit donc être ni trop réverbérante pour ne pas altérer l'intelligibilité, ni trop sèche pour favoriser la communion entre spectateurs.

Enfin pour des raisons de sécurité dans l'enceinte du stade une bonne intelligibilité des annonces d'évacuation, peu compatible avec l'ambiance effervescente, est requise.

Ces propriétés sonores se vérifient par la prévision des niveaux de pression acoustique à l'intérieur du volume et la comparaison à la réglementation en vigueur.

Le confort acoustique au niveau des spectateurs est ainsi évalué sur la base d'indices tels que la durée de réverbération (TR) et l'intelligibilité (STI). Le logiciel de propagation acoustique ICARE, basé sur la méthode de tir de faisceaux, qui caractérise et modélise l'ensemble des sources sonores spécifiques à une configuration particulière de fonctionnement du stade (match, concert, spectacle) est ainsi utilisé (figure 7).

L'IMPACT ACOUSTIQUE DANS L'ENVIRONNEMENT PROCHE

Le bruit émis par le stade en service, dans son environnement, est considéré par la réglementation française comme un « bruit de voisinage ». En phase projet, il faut donc pouvoir prévoir les émergences acoustiques (globales et spectrales) en façades des bâtiments potentiellement les plus exposés à cette nuisance, et vérifier si ces émergences sont conformes à la réglementation (décret n° 2006-1099 du 31 août 2006) (figure 8).

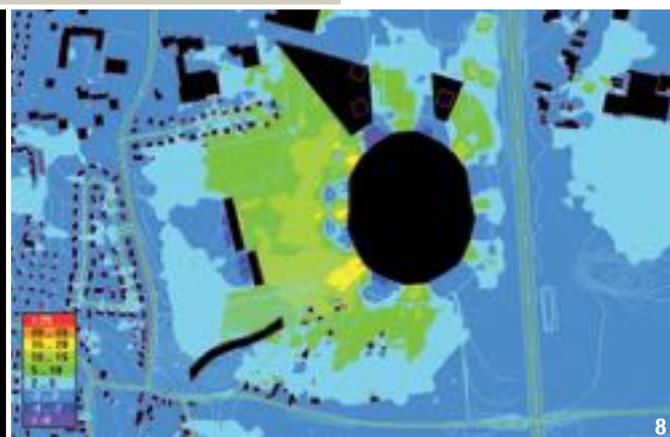
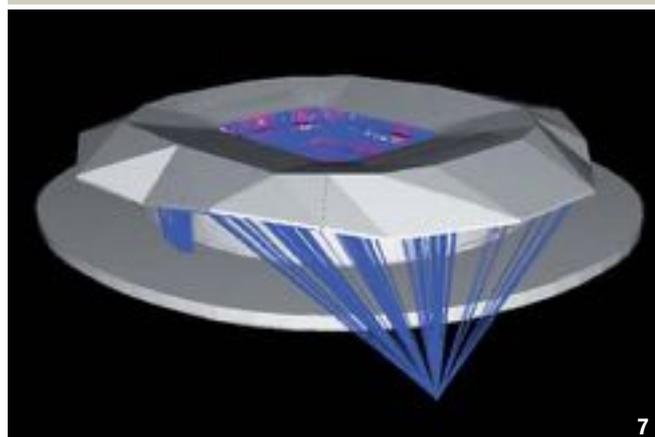
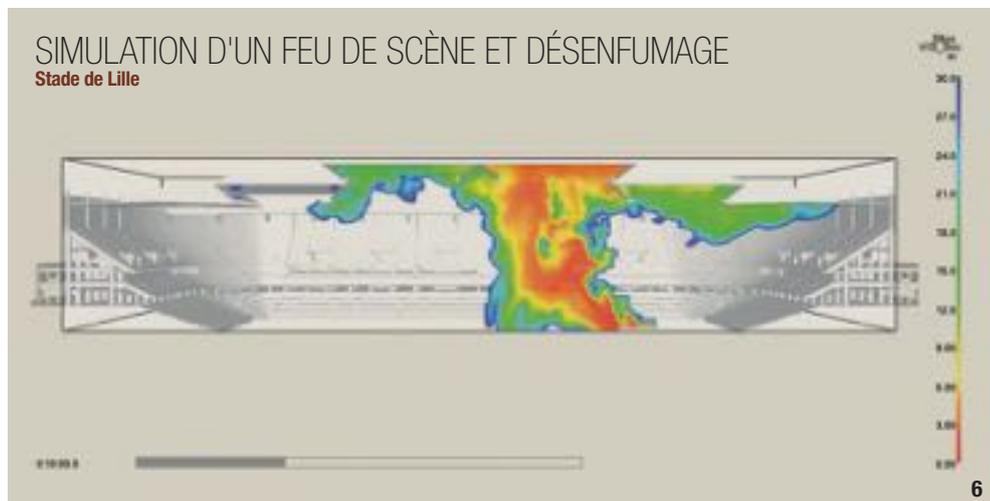
Le logiciel ICARE (propagation acoustique à l'intérieur du stade) est utilisé couplé à MITHRA (propagation à

l'extérieur du stade vers les riverains) qui peut aussi évaluer en complément l'impact acoustique environnemental relatif aux aménagements annexes au stade (bâtiments, parkings, etc.). En cas de dépassement de valeurs limites réglementaires, des aménagements géométriques intégrant des solutions antibruit variées sont discutés en concertation avec les responsables projet et évalués.

LE CONFORT VISUEL

En complément des études standard portant sur l'éclairage artificiel (niveaux d'éclairage, uniformité, rendu des couleurs, limitation des éblouissements et conformité aux exigences de la télédiffusion), des outils portant sur l'analyse de l'éclairage naturel des stades sont développés. La couverture, par exemple, a une influence importante sur la visibilité directe ou indirecte du soleil que des logiciels spécifiques permettent de quantifier. Ces outils offrent la possibilité également de choisir le matériau de couverture le moins éblouissant et réduisant les ombres portées de la structure sur la pelouse.

Enfin, des bilans complets permettent d'analyser la pousse de la pelouse et d'optimiser son entretien. Des comparatifs peuvent être réalisés pour différents matériaux de couverture (transparents, diffusants, colorés).



6- Stade de Lille. Simulation d'un feu de scène et désenfumage.

7- Stade de Lyon. Logiciel de propagation acoustique ICARE basé sur la méthode de tir de faisceaux acoustiques.

8- Stade de Lyon. Carte d'émergence sonore en dB(A) : différences de niveaux sonores entre état initial et configuration "match".

6- Lille Stadium. Simulation of a stage fire and smoke control.

7- Lyon Stadium. ICARE sound propagation software based on the ultrasonic beam firing method.

8- Lyon Stadium. Sound emergence map in dB(A): sound level differences between initial state and "match" configuration.

9- Prototype sur chantier utilisé pour la validation de la mise en œuvre et de la faisabilité du procédé de couverture et façade en toile textile du Stade de Marseille dans le cadre de deux ATEx.

10a & 10b- La maquette du stade de Lille en soufflerie atmosphérique : dimensionnement au vent de la couverture.

11- Tests échelle 1 en soufflerie climatique des tubes de ceinture périphérique en polycarbonate : résistance au vent et comportement vibratoire.

12- La maquette du Stade Vélodrome en soufflerie atmosphérique : configuration définitive.

9- Prototype on site used for validation of the implementation and feasibility of the textile cloth roof covering and facade covered by two ATEx evaluation procedures.

10a & 10b- The mock-up of the Lille Stadium in an atmospheric wind tunnel: wind resistance of the roof covering.

11- Full-scale tests in a climatic wind tunnel on the arena's peripheral polycarbonate tubes: wind resistance and vibration behaviour.

12- Mock-up of the Vélodrome Stadium in atmospheric wind tunnel: final configuration.



© CSTB



© CSTB



10a



10b

LA FAISABILITÉ ET LA RÉSISTANCE DE L'ENVELOPPE ET DES COMPOSANTS

La réalisation de couvertures et de façades de grande dimension fait appel à des techniques innovantes telles les toiles synthétiques (hors règles professionnelles), les procédés photovoltaïques, les bardages double-peau spécifiques, les bardages translucides. Dans le cadre de l'évaluation de ces nouveaux procédés, différents aspects doivent être vérifiés :

- Valeurs de contraintes admissibles par les matériaux, résistance au vieillissement et aux agressions environnementales par essais sur échantillons de toiles synthétiques ;
- Résistance aux efforts extérieurs ou intérieurs par essais vraie grandeur ou calcul ;
- Faisabilité de la mise en œuvre par réalisation de prototypes ou étude de plans de montage ;
- Sécurité des utilisateurs et intervenants dans le cadre des façades et couvertures validées par essais

de dimensionnement et de chocs spécifiques.

Des expertises en amont de l'évaluation sont réalisées pour définir les justifications techniques à apporter (caractérisation des matériaux, vérifications expérimentales, hypothèses de chargement) et le CSTB propose une évaluation du procédé innovant par la procédure d'Appréciation

Technique Expérimentale (figure 9). Pour tous les constituants de façade et couverture, les effets combinés du vent, de la pluie, du sable, du soleil, de la température ou encore de la neige peuvent être testés échelle 1 sur des éléments prototypes, ainsi que les éventuels problèmes aéroacoustiques engendrés par les vibrations de certains de ces constituants. ▶

© CSTB



12



DEUX EXEMPLES EMBLÉMATIQUES : LE GRAND STADE DE LILLE MÉTROPOLE ET LE STADE VÉLODROME DE MARSEILLE

LE STADE DE LILLE (EIFFAGE-GREISCH)

Pour une toiture, les efforts induits par le vent dépendent non seulement de sa forme mais aussi de son comportement dynamique. Sur base de la forme, des essais en soufflerie peuvent être réalisés, mais les efforts ne sont évalués correctement qu'à la fin du processus

de dimensionnement puisqu'ils dépendent de la raideur (souplesse) finale. Pour le stade de Lille, la prise en compte des effets du vent se sont déroulés en plusieurs temps :

- 1- Essais en soufflerie avec une maquette rigide réalisée sur base de l'avant-projet ;
- 2- Une première analyse simplifiée sur la base des essais en soufflerie et des normes pour établir des cas de charges réalistes avec une amplification dynamique estimée dans le but d'établir le plan de matière de la structure ;

13a, 13b & 13c- La maquette du Stade Vélodrome en soufflerie atmosphérique : phases de construction.

13a, 13b & 13c- Mock-up of the Vélodrome Stadium in atmospheric wind tunnel: construction phases.

- 3- Une fois le plan de matière établi, détermination des modes propres de vibration et nouvelle analyse des essais en soufflerie en prenant en compte le comportement dynamique et les surfaces d'influence des éléments structuraux principaux.

Ce processus a été répété une deuxième fois dans la mesure où la zone couverte de la toiture avait été modifiée (figures 10a & 10b).

Si les phases de construction n'étaient pas prépondérantes pour le comportement sous le vent, la particularité de cette toiture se situait à deux niveaux :



1- La possibilité de la fermer. Il a donc été nécessaire d'effectuer des mesures mais aussi des vérifications pour différentes configurations : 11 configurations ont été mesurées, 3 ont été retenues pour le dimensionnement ;

2- Les façades de cette structure sont constituées de tubes cylindriques en polycarbonate. Le comportement de ces tubes a été simulé à l'échelle 1/1 en laboratoire pour vérifier leur caractère neutre sur le plan acoustique mais également pour déterminer leur espacement minimum afin d'éviter toute instabilité aéroélastique (figure 11).

Une remarque fondamentale, à nouveau vérifiée pour le stade de Lille, s'impose lors du dimensionnement qui nécessite des essais en soufflerie : une interaction et des échanges continus entre les ingénieurs de la soufflerie et les ingénieurs du bureau d'étude chargés du dimensionnement est primordiale. C'est la complémentarité des compétences qui permet d'approcher cette sollicitation stochastique qu'est le vent et d'en définir les effets prépondérants pour obtenir un dimensionnement fiable.

LE STADE VÉLODROME DE MARSEILLE (BOUYGUES-GFC CONSTRUCTION)

La première mission a débuté dès la phase de conception et de développement du projet de la reconfiguration du Stade Vélodrome.

Cette campagne a eu pour objectifs de déterminer les effets du vent sur la couverture et de mener les études de confort sur l'aire de jeu et sur le parvis extérieur à l'enceinte.



© CSTB

14- Étude de la tenue au vent et du comportement aéroacoustique du bardage de façade du Stade Vélodrome sur prototype échelle 1 en soufflerie climatique.

14- Study of the wind resistance and aeroacoustic behaviour of the facade cladding of the Vélodrome Stadium on a full-scale prototype in a climatic wind tunnel.

Réalisés sur une maquette au 1/250^e et en soufflerie atmosphérique, ces essais ont également intégrés les différentes phases clés de la construction, en plus de la configuration définitive de l'ouvrage (figure 12).

Ceci a permis de déterminer l'ensemble des chargements de la toiture du stade (charpente et couverture) sous les effets statiques et dynamiques du vent.

Des campagnes complémentaires, spécifiques aux séquences de construction de la toiture ont ensuite été réalisées. Elles ont permis la justification des structures durant les configurations provisoires de pose de la charpente et de la couverture (figures 13a, 13b & 13c). Cette nécessité d'étudier les effets du vent pour les séquences de montage, les phases provisoires de construction et la configuration définitive est une spécificité propre à ce chantier et au maintien en fonctionnement du Stade Vélodrome pendant les travaux.

L'environnement du stade a été également pris en considération avec l'évolution des travaux des programmes immobiliers attenants.

Au final, ces essais auront nécessité la réalisation de maquettes démontables pour reproduire les configurations de travaux jugées sensibles au vent. Et au global, ce sont 15 passages dans la veine de soufflerie (et autant d'essais à analyser), qui auront permis de définir l'ensemble des actions du vent sur l'enveloppe.

Le dernier point important à souligner pour ce type d'ouvrage réside dans l'exploitation des essais et le post-traitement des résultats. Un process spécifique entre le CSTB et les bureaux d'études de structures (charpente et couverture) a été mis au point, bien en amont des essais. Plusieurs méthodes de chargement de la structure sont possibles. Il convient de travailler avec un nombre de cas de charges de vent représentatifs des résultats d'essais et compatibles avec les outils de calcul. Ce point est particulièrement avéré sur le projet du Stade Vélodrome, compte-tenu des phases de construction, qui multiplient les cas d'études. Et bien sûr, le bureau de contrôle doit être, lui aussi, associé à cette démarche, dans l'objectif d'avoir une validation des études en cohérence avec le planning des travaux. Enfin, des essais sur des prototypes de bardage à l'échelle 1 ont également été réalisés. Ils avaient pour objectif d'étudier le comportement aéroacoustique, de caractériser les coefficients de force et d'étudier la tenue au vent extrême des panneaux de façade en résille métallique soumis à de fortes vitesses de vent (figure 14). □

ABSTRACT

SAFETY AND COMFORT IN THE STADIUMS OF TOMORROW

G. GRILLAUD, CSTB NANTES - J. VINET, CSTB NANTES - V. DE VILLE DE GOYET, BUREAU GREISCH - R. VONDIÈRE, GFC CONSTRUCTION

Stadiums have become architectural objects where engineers and architects rival one another in innovation and originality by creating increasingly large, slender and light structures, that must be built with all the required safety margins. The stadium is both an open and covered space, and is also subject to special architectural constraints and requirements which determine the atmosphere prevailing in them and on which the stadium's attendance figures depend directly. Alongside designers, project managers and contracting authorities, the French building scientific and technical research centre CSTB has developed suitable expertise and engineering methods for stadiums: wind resistance, climatic conditions, fire safety and smoke control, interior acoustic environment, exterior acoustic impact, visual comfort, feasibility and strength of the shell. □

SEGURIDAD Y COMODIDAD EN LOS ESTADIOS DEL FUTURO

G. GRILLAUD, CSTB NANTES - J. VINET, CSTB NANTES - V. DE VILLE DE GOYET, BUREAU GREISCH - R. VONDIÈRE, GFC CONSTRUCTION

Los estadios se han convertido en objetos arquitectónicos donde ingenieros y arquitectos compiten en innovación y originalidad creando estructuras cada vez más grandes, esbeltas y ligeras, que deben poder construirse con todos los márgenes de seguridad necesarios. Espacio a la vez y cubierto y abierto, el estadio también está sujeto a limitaciones y especificidades arquitectónicas inducidas por los ambientes existentes y que condicionan directamente su frecuentación. El CSTB (Centro Científico y Técnico de la Construcción) ha desarrollado, junto a diseñadores, directores de obra y promotores, una pericia y una ingeniería adaptadas a los estadios: dimensionamiento al viento, ambientes climáticos, seguridad contra incendios y salidas de humos, ambiente acústico interior, impacto acústico exterior, confort visual, factibilidad y resistencia de la cubierta. □



1
© LOSBERGER

STADE DE LIBREVILLE, CALCUL DE LA COUVERTURE MÉTALLO-TEXTILE

AUTEUR : JEAN-PIERRE COEUR, DIRECTEUR TECHNIQUE, ARCORA

POUR ACCUEILLIR LES MATCHS DE LA COUPE AFRICAINE DES NATIONS 2012, LA VILLE DE LIBREVILLE AU GABON A ENTREPRIS LA RÉHABILITATION LOURDE DU STADE OMAR BONGO POUR PASSER SA CAPACITÉ DE 4 000 À 40 000 PLACES. POUR CE FAIRE, DE NOUVELLES COUVERTURES EN MEMBRANE TEXTILE BLANCHE TRANSLUCIDE SUR CHARPENTE MÉTALLIQUE ABRITENT LES TRIBUNES DU SOLEIL ET DES INTEMPÉRIES, DÉCLINANT AINSI EN AFRIQUE LES TECHNIQUES UTILISÉES POUR LES GRANDS STADES EUROPÉENS.

CONTEXTE

Dans le cadre de la CAN 2012 (Coupe Africaine des Nations), le stade Omar Bongo de Libreville a fait l'objet d'une restructuration lourde passant sa capacité de 4 000 à plus de 40 000 places. De nouvelles tribunes ont été construites et une couverture a été mise en œuvre au-dessus des gradins. Le projet de base des architectes pré-

voyait une couverture en bac acier. À l'issue d'une consultation, une variante en structure textile a été retenue, la membrane venant en lieu et place du bac de couverture. Intervenant en tant que sous-traitant de l'entreprise, Arcora a donc repris entièrement la conception structurelle tout en respectant les géométries du projet (figures 1 et 2).

1- Image de synthèse Architecte.

1- Architect's synthesis image.

UNE RÉPONSE ADAPTÉE AU PROJET

L'atout principal de la membrane textile, à savoir d'être utilisée comme matériau structurel, permet ici de franchir des portées importantes (23 m) sans points d'appuis intermédiaires ni ossatures secondaires.

Le choix d'une couverture métal-textile s'est avéré pertinent afin d'amé-

liorer la translucidité de la couverture et d'éviter tout risque de corrosion des ouvrages de la couverture, le stade se situant dans une zone équatoriale à forte hygrométrie. La membrane et ses dispositifs de mise en tension sont insensibles à la corrosion au regard d'un bac acier et de ses fixations (vis) ; de plus, la mise en œuvre est plus aisée et la membrane de chaque module étant réalisée en un seul élément, les risques de fuite par rapport à une succession de plaques de couverture sont annulés (figures 4 et 5).



2
© DR

MEMBRANE TEXTILE : COMPORTEMENT

Les propriétés du tissu correspondent à un fonctionnement mécanique et à des formes de structures très particulières. Les textiles à usage technique utilisés pour le projet sont composés d'un support tissé (chaîne/trame) en polyester et d'une enduction PVC sur les deux faces. Ces tissus ne transmettent aucun effort tranchant ni aucun moment fléchissant (efforts normaux uniquement). Les charges extérieures sont équi-

brées par des efforts membranaires (efforts normaux de traction), caractéristiques d'un comportement non linéaire géométrique à grands déplacements. Les surfaces sont gauches à double courbure inverse. Cette double courbure est nécessaire tant pour la stabilité sous précontrainte initiale, que pour équilibrer les charges extérieures dans les différentes directions. Il est en conséquence nécessaire d'utiliser des outils de calculs adaptés, permettant

d'une part la détermination des formes sous pré-tension, et des calculs non linéaires sous combinaisons de charges d'autre part.

CALCULS NON LINÉAIRES DE LA MEMBRANE TEXTILE

Arcora a développé depuis plusieurs années un outil complet allant de la modélisation à la découpe des lés. Cet outil est articulé autour du programme PAM-LISA™, développé ini-

tialement dans les années 1970 par Eberhard Haug à l'université de Berkeley (USA Californie). Ce programme intègre un code de calcul aux éléments finis spécialisé dans l'analyse tridimensionnelle non linéaire des structures légères composées de câbles et de membranes souples. L'étude se déroule selon plusieurs étapes :

Étape 1 : Recherche de forme

Recherche de la forme d'équilibre de la membrane textile, après maillage des surfaces définies par les contours supports de la membrane (charpente métallique). Une modélisation des trois types de modules a été réalisée.

La détermination de la forme d'équilibre est effectuée selon la méthode de recherche de forme, dite « bulle de savon » qui soumet la membrane à une tension uniforme dans les différentes directions. Les surfaces minimales ainsi définies ont pour caractéristique d'être à double courbure inverse (figure 3).

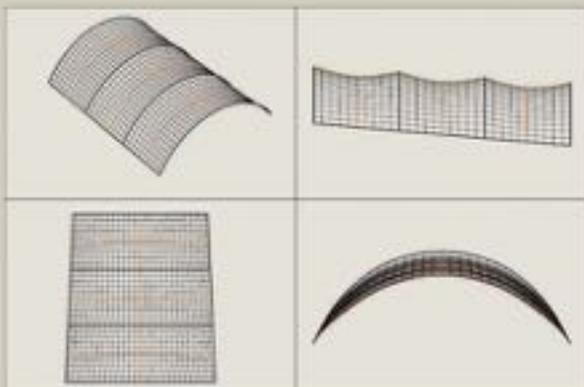
Étape 2 : Chargement

On étudie le comportement des membranes sous les différents chargements réglementaires à savoir : pré-tension, poids propre, vent et charges de sable. En raison du comportement non linéaire des membranes, toutes les combinaisons font l'objet d'un calcul indépendant (5 combinaisons non pondérées et 10 combinaisons pondérées), pour déterminer les déformées et les contraintes dans les toiles ainsi que les descentes de charge sur les ouvrages supports en charpente métallique. Les charges sont appliquées au maillage prédéfini précédemment.

Étape 3 : Traitement des résultats

Les résultats sont analysés en respectant les différentes justifications préconisées dans les « Recommandations pour la conception des ouvrages permanents de couverture textile ». ▷

GÉOMÉTRIE DES MEMBRANES

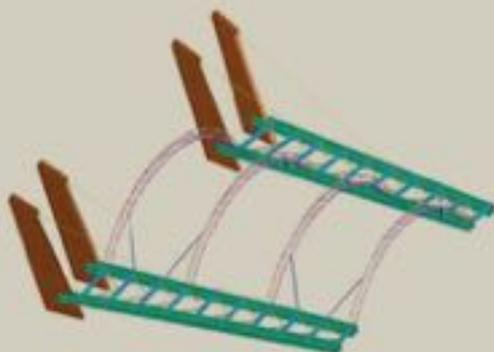


3

- 2- Stade avant travaux.
- 3- Géométrie des membranes.
- 4- Principe structure.
- 5- Structure avec membrane.

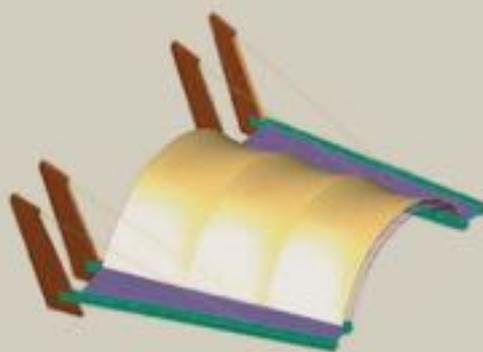
- 2- Stadium before the works.
- 3- Shape of the membranes.
- 4- Structure schematic.
- 5- Structure with membrane.

PRINCIPE STRUCTURE



4

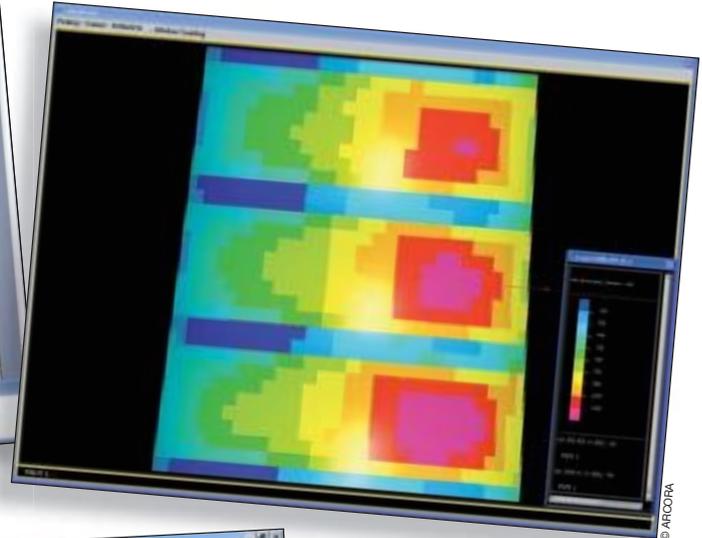
STRUCTURE AVEC MEMBRANE



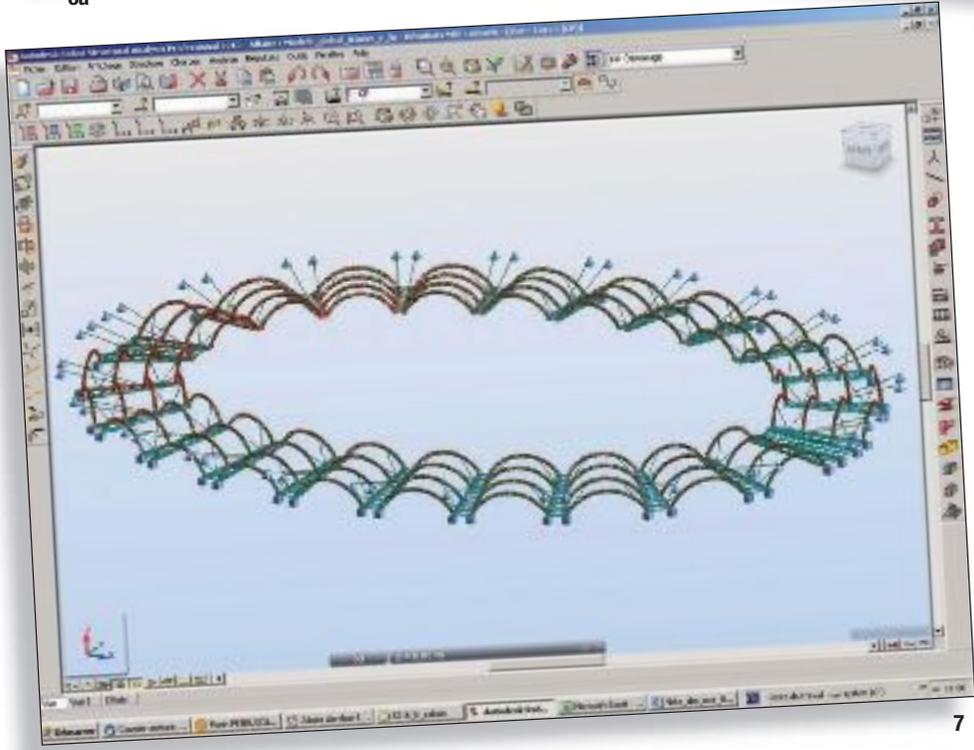
5



6a



6b



7

6- Visualisation des contraintes dans la membrane.

7- Sortie graphique model Robot.

8- Fléaux en cours de montage.

9- Fléaux + arcs en cours de montage.

6- View of stresses in the membrane.

7- Graphic output of the Robot model.

8- Cantilever sections being erected.

9- Cantilever sections + arches being erected.



8



9



10

© LOSBERGER

On vérifie les critères de stabilité de forme des membranes, notamment l'absence d'inversion de courbure sous les combinaisons linéaires incluant la neige et le vent normal, ainsi que l'absence de poche sous les combinaisons incluant la neige extrême. Cette vérification est réalisée à l'aide de coupes dans les deux directions principales. Il est indispensable que la membrane conserve sa double courbure inverse et qu'un niveau minimal de tension soit conservé dans les deux directions afin d'accroître la durabilité des membranes. La pré-tension assure localement le filtrage des contraintes dynamiques du vent et permet d'écarter « tout flottement destructeur » (effets de battement au vent qui détruit la membrane) On vérifie aussi qu'en tous points de la surface, une pente minimale est assurée afin de permettre l'écoulement des eaux (effet de poche), (figure 6).

Étape 4 : Dimensionnement des membranes.

Les membranes sont dimensionnées à partir des tensions de calculs selon les sens chaîne/trame sous combinaisons de charges pondérées.

Les tensions de calculs sont analysées en partie courante (pleine toile) et dans les zones d'attache (lisières

10 & 11-
Vue finale.

10 & 11-
Final view.

oiletées). Des coefficients de sécurité sont appliqués par rapport à la résistance moyenne à la traction uniaxiale (chaîne/trame). Le coefficient retenu pour la couverture du stade est de 4,79. Il résulte de la prise en compte

de plusieurs paramètres de fabrication et de mise en œuvre, tels que : surface des modules de toile, niveau de pollution du site, qualité de la membrane, caractéristiques des soudures d'assemblage des lèses de tissu entre elles.

CALCULS DE LA CHARPENTE MÉTALLIQUE

La charpente métallique support de la couverture textile comporte une symétrie par 1/4 du stade (figure 4).

Elle est composée de fléaux métalliques articulés sur des voussoirs béton et

suspendus en sommet des voussoirs (figure 5). Entre ces fléaux, 4 arcs tri-dimensionnels tubulaires sont mis en œuvre. La membrane de couverture prend appui sur ces arcs et est maintenue en partie basse sur les fléaux par l'intermédiaire de tubes de laçage.

Ces arcs sont stabilisés par des butons sur les fléaux (figures 4 et 5).

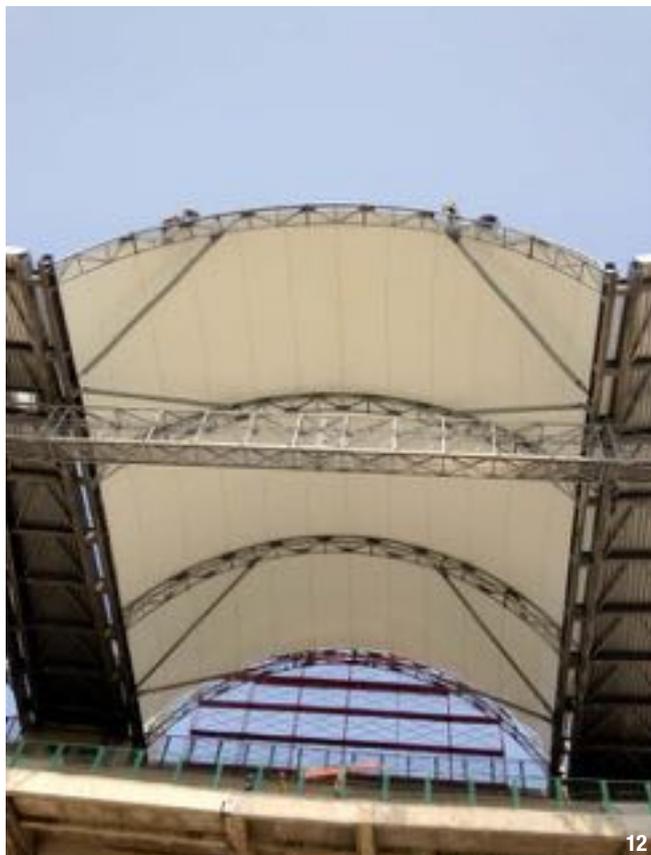
La conception du dimensionnement de ces structures a pris en compte d'une part le transport en container depuis l'Europe vers le Gabon (transport par bateau) et d'autre part la protection par galvanisation de l'ensemble des pièces métalliques (dimension des bains de galvanisation). Les conditions de montage liées au site (Gabon) ont aussi été considérées, à savoir la capacité des grues disponibles (figures 7, 8 et 9).

Le calcul des structures métalliques a été effectué en prenant comme entrées de données les réactions d'appuis de la membrane textile sous l'ensemble des combinaisons linéaires non pondérées et pondérées. Les points d'appuis de la membrane sont déterminés par les nœuds du maillage (un nœud tous les 0,5 m environ) et correspondent aux points d'appuis sur les arcs et les fléaux (tube de laçage). L'ensemble de la charpente du stade a été modélisé sous le logiciel Robot.

© LOSBERGER



11



12
© LOSBERGER

La discrétisation des barres de la structure métallique correspond à la discrétisation adoptée pour le modèle des toiles, ce qui présente l'avantage de permettre une utilisation directe des réactions d'appuis de la membrane aux nœuds. Le choix de réaliser un modèle complet du stade a permis une opti-

12- Vue finale.

12- Final view.

misation des structures en fonction des chargements notamment le vent et la prise en compte des efforts réels consécutifs à l'absence de joint de dilatation dans la structure métallique.

À l'issue des premières itérations de calculs, il s'est avéré que la structure se soulevait et que les câbles de suspension se détendaient. En conséquence, il a été nécessaire de lester les fléaux à l'aide d'une dalle en béton. Cette disposition ne modifiait pas l'architecture du projet, les fléaux étant revêtus d'une étanchéité sur bac. L'isolant support de l'étanchéité a été remplacé par la dalle en béton.

Les études de conception et d'exécution se sont déroulées sur 6 mois et ont été menées, pour ce qui concerne les calculs, à l'aide des logiciels PAM-LISA™ pour la membrane textile, Robot pour la charpente métallique, Autocad et Tekla pour les dessins. À l'issue de ces études, les fabrications ont été lancées en France et les structures ont été acheminées sur site dans des conteneurs transportés par cargo. En raison de contraintes locales, non techniques, le stade n'a pu être livré pour la Coupe Africaine des Nations. À ce jour les ouvrages de couverture métallo-textile sont achevés (figures 10, 11 et 12). □

PRINCIPAUX CHIFFRES

SURFACE COUVERTE : 18 200 m²

SURFACE RÉELLE MEMBRANE TEXTILE : 23 000 m²

POIDS DES STRUCTURES MÉTALLIQUES : 1 400 t

INTERVENANTS DU PROJET

MAÎTRE D'OUVRAGE : Ministère de la culture, de la jeunesse, des sports et des loisirs

ARCHITECTE : 2 G Gabon

BE TECHNIQUE : Archi Monde

CONTRACTANT GÉNÉRAL : CCL Penisular SA

ENTREPRISE GÉNÉRALE : Entraco

CHARPENTE MÉTALLIQUE - MEMBRANE TEXTILE : Losberger France

BUREAUX D'ÉTUDES STRUCTURE MÉTALLIQUE & TOILE : Arcora, filiale du groupe Ingérop

CONTRÔLEUR TECHNIQUE : Veritas (Gabon - France)

ABSTRACT

LIBREVILLE STADIUM, DESIGN OF THE METAL-TEXTILE ROOF COVERING

JEAN-PIERRE COEUR, ARCORA

For the Africa Cup of Nations (CAN), the big stadium of Libreville (Gabon) had to be renovated, in particular with a roof covering for the grandstands. The contractor selected for the works hired the services of Arcora, a subsidiary of the Ingérop group, to rework the architects' initial design and perform detailed design of the steel structure and the textile roof covering. This required use of the specific PAM-LISA™ software program developed by Arcora from the 1990s in accordance with the "Recommendations for the design of permanent textile membrane structures". Design calculations for the steel structure were performed using the ROBOT software and the construction drawings were produced under TEKLA and AUTOCAD. Veritas performed inspections and fully approved the design engineering documents. Manufacturing was performed in France, and logistics played an important role in overcoming the constraints, both those directly related to the site and the local environment, and manufacturing constraints related to transport by containers and then cargo ship. □

ESTADIO DE LIBREVILLE, CÁLCULO DE LA CUBIERTA METÁLICO-TEXTIL

JEAN-PIERRE COEUR, ARCORA

Para acoger la Copa Africana de Naciones (CAN), fue necesario la reforma del gran estadio de Libreville (Gabón) que incluía, entre otras cosas, la cubierta de las tribunas. La empresa seleccionada para las obras recurrió a los servicios de Arcora, filial del grupo Ingérop, para recuperar el diseño inicial de los arquitectos y realizar los estudios de ejecución de la estructura metálica y de la cubierta textil. Para estos estudios fue preciso utilizar el software específico PAM-LISA™ desarrollado por Arcora en los años 90 siguiendo las "Recomendaciones para el diseño de estructuras permanentes de membrana textil". La estructura metálica ha sido objeto de cálculos por medio del software ROBOT y de dibujos de ejecución con TEKLA y AUTOCAD. Veritas efectuó los controles y aprobó totalmente los estudios de proyectos. Dado que las fabricaciones se habían realizado en Francia, la logística desempeñó un importante papel en términos de limitaciones: limitaciones relacionadas directamente con el emplazamiento y el contexto local, limitaciones de fabricación relacionadas con el transporte por contenedores y después por carguero. □

TRÉSORS DE NOS ARCHIVES : LE NOUVEAU STADE CHARLETY EN 1994

PAR GILLES CHARTIER, CHARGÉ D'AFFAIRE, BEAUDIN-CHÂTEAUNEUF -
TRAVAUX N°710 - JUIN 1995

RECHERCHE D'ARCHIVES PAR PAUL-HENRI GUILLOT, DOCUMENTALISTE-ARCHIVISTE, FNTP



Charléty n'était pas un sportif de haut niveau, mais un agrégé d'histoire d'origine savoyarde né en 1867 à Chambéry, où il est mort en 1945. En marge de ses travaux savants et alors qu'il était recteur de l'académie de Paris, il a beaucoup œuvré pour l'obtention par le PUC (Paris Université Club) de ce stade implanté dans le 13^e arrondissement de Paris près de la Cité Internationale Universitaire. Dessiné par le jeune architecte Prix de Rome Bernard Zehrffuss, le stade a été inauguré en 1939 sous le nom de Stade Sébastien Charléty.

Le stade abrite les Jeux Universitaires de Paris en 1957. L'athlète Michel Jazy y bat le record du monde sur 2 000 m en 1962. Pendant les événements de

mai 68, plus de 30 000 personnes s'y rassemblent pour le meeting de l'Union Nationale des Étudiants de France. Puis le stade déperit et il est démolit en 1989. Un nouveau stade est construit en 1994, dessiné par l'architecte Henri Gaudin et son fils Bruno Gaudin. C'est un stade en béton et métal où s'illustre une fameuse entreprise créée en 1919 dans la ville de Châteauneuf-sur-Loire par l'ingénieur Basile Beaudin, passionné de construction métallique. Cet article nous fait découvrir « l'épure de visibilité » qui assure que chaque spectateur voit le stade depuis sa place assise, un outil encore nouveau à l'époque qui est le DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et les sévères problèmes de tolérance et de précision de montage qui ont été maîtrisés.

ABSTRACT

TREASURES FROM OUR ARCHIVES: THE NEW CHARLETY STADIUM IN 1994 TRAVAUX N°710 - JUNE 1995

GILLES CHARTIER

Charléty was not a high-level athlete, but a history scholar from the Savoy region of France, born in 1867 in Chambéry, where he died in 1945. Alongside his scholarly works, when he was rector of the Paris academy, he did a lot of work for the PUC (Paris Université Club) to obtain this stadium located in the 13th arrondissement of Paris near the students' residence Cité Internationale Universitaire. Designed by the young architect Bernard Zehrffuss (winner of the "Prix de Rome"), the stadium was inaugurated in 1939 under the name Stade Sébastien Charléty. The stadium was the venue for the Paris University Games in 1957. The athlete Michel Jazy beat the world 2000 metres record there in 1962. During the student unrest of May 1968, more than 30,000 people came together there for the meeting of the French National Students Union. Then the stadium declined and was demolished in 1989. A new stadium was built in 1994, designed by the architect Henri Gaudin and his son Bruno Gaudin. It is a concrete and metal stadium brilliantly executed by a famous company founded in 1919 in the town of Châteauneuf-sur-Loire by the engineer Basile Beaudin, an enthusiast for steel construction. In this article we discover the "visibility sketch" which ensures that each spectator can see the stadium from their seat, a tool still new at that time, CAD (Computer-Aided Design), and the difficult assembly tolerance and precision problems that were mastered. □

TESOROS DE NUESTROS ARCHIVOS: EL NUEVO ESTADIO CHARLETY EN 1994 TRAVAUX N° 710 - JUNIO DE 1995

GILLES CHARTIER

Charléty no era un deportista de elite, sino un catedrático de historia de origen saboyano que nació en 1867 en Chambéry, donde murió en 1945. Al margen de sus trabajos científicos y cuando era rector de la academia de París, trabajó mucho para que el PUC (Paris Université Club) obtuviera este estadio situado en el distrito 13 de París cerca de la Ciudad Internacional Universitaria. Diseñado por el joven arquitecto Premio de Roma Bernard Zehrffuss, el estadio se inauguró en 1939 con el nombre de Estadio Sébastien Charléty. Albergó los Juegos Universitarios de París en 1957 y fue donde el atleta Michel Jazy batió el récord del mundo de los 2.000 m en 1962. Durante los acontecimientos de mayo del 68, más de 30.000 personas se congregaron en este estadio para el mitin de la Unión Nacional de Estudiantes de Francia. Después, el estadio, muy deteriorado, se demolió en 1989. En 1994 se construyó un nuevo estadio, diseñado por el arquitecto Henri Gaudin y su hijo Bruno Gaudin. Es un estadio de hormigón y metal donde destacó una conocida empresa creada en 1919 en la ciudad de Châteauneuf-sur-Loire por el ingeniero Basile Beaudin, apasionado de la construcción metálica. Este artículo nos permite descubrir "el diseño de visibilidad" que hace posible que cada espectador vea el estadio desde su plaza sentada, una herramienta, el CAD (Diseño Asistido por Ordenador), que en la época todavía era nueva y los graves problemas de tolerancia y de precisión de montaje que se resolvieron. □

CONSTRUCTION MÉTALLIQUE

Les tribunes du stade Sébastien Charléty

Le stade Charléty est un ouvrage métallique de près de 1900 t à géométrie extrêmement complexe, construit sur mesure, d'où la mise en œuvre de moyens exceptionnels :

◆ DAO indispensable pour les problèmes de géométrie des pièces et de modélisation de la structure pour les calculs informatiques ;

◆ Interface DAO/machines à commandes numériques pour la fabrication de la fabrication (débits) ; et surtout, mise en œuvre de méthodologies tout à fait exceptionnelles pour les fabrications et les montages. Méthodologies imposées par :

◆ des tolérances extrêmement serrées au sein d'une ossature mixte acier/béton avec absence d'organes de réglage ;

◆ un planning constamment sur chemin critique.



Ville de Paris. Reconstruction du stade Charléty, vue aérienne, 1994
City of Paris. Reconstruction of Charléty stadium ; aerial view, 1994

■ DESCRIPTION DE LA RÉALISATION

La géométrie du stade est complexe et a dû être définie par DAO (dessin assisté par ordinateur) pour permettre le calcul des positions, dimensions et formes des divers éléments constitutifs de la charpente. La réalisation de cet ouvrage impliquait une totale maîtrise de toutes les capacités de calcul, conception et de fabrication que Baudin-Châteauneuf développe depuis des années. En effet, l'ouvrage construit n'a aucune des caractéristiques des ouvrages courants. Le stade a exigé des procédures particulières de travail à toutes les phases de la réalisation, du calcul de dimensionnement au montage sur chantier.

Définition géométrique du stade

La première détermination géométrique est donnée par l'épure de visibilité, celle-ci garantissant aux spectateurs une bonne vision de l'ensemble du terrain d'honneur. Cette coupe se décompose en trois niveaux de gradins :

◆ première couronne, se développe dans la hauteur du sous-sol ou en terre-plein ;

◆ deuxième couronne, abrite la circulation générale du public ;

◆ troisième couronne, la tribune abrite l'ensemble du stade des vents d'ouest.

Sous chacune de ces trois couronnes, les droites L3, L4 et L5 sont établies à partir d'un angle approchant les angles saillants de la sous-face des gradins. Les angles des droites L3, L4 et L5 sont constants par rapport au plan horizontal et par rapport à la ligne L1.

Ces droites permettront le calage ultérieur des poteaux et des poutres de support des gradins (figure 1).

■ DIFFICULTÉ DU PROBLÈME

En général, l'implantation schématique des ancrages fournie au charpentier est : plane (au moins par zone), livrée au charpentier en une fois (au moins par zone), stable géométriquement dans le temps et non contraignante au niveau des dimensions d'ancrages.

Lieu de la construction

Paris (porte de Gentilly)

Date de la construction

Décembre 1991 - juillet 1994
(construction métallique :
fin des travaux en octobre 1993)

Délai total d'exécution

Études : 6 mois
Fabrication : 7 mois
Montage : 7 mois
Délai global : 16 mois



Dans le cas du stade, l'implantation est :

- ◆ inscrite sur une surface gauche paramétrée,
- ◆ livrée au charpentier par toutes petites zones,
- ◆ déformable suivant les phases de notre réalisation,
- ◆ extrêmement contraignante pour les dimensions d'ancrage.

C'est en particulier pour ces raisons que l'ouvrage réalisé est exceptionnel.

Phase de dimensionnement

La déformabilité des appuis béton a imposé la modélisation filaire complète de l'ossature mixte béton/charpente métallique pour les calculs de dimensionnements.

Compte tenu de la géométrie, tout le stade a dû être modélisé, ainsi toutes les parties du stade ont fait l'objet d'une vérification en dimensionnement et cela n'a pu être réalisé que par la récupération des données de la DAO pour nos programmes de calculs.

Ces calculs menés sur la totalité du stade ont permis notamment de déterminer toutes les déformations en phases intermédiaires de réalisation et de les anticiper en intégrant des contre-flèches à la fabrication et des niveaux de réglage pour le montage de la charpente.

Nous ne nous étendons pas sur les problèmes de calculs (même si ces calculs mixtes acier/béton restent une "première" dans ce type d'ouvrage) ou sur l'ensemble des problèmes complexes que cette opération a pu poser à toutes les étapes, puisque chaque ouvrage reste un "prototype". Nous allons nous attarder sur un point tout à fait particulier et original qui est celui des tolérances de réalisation spécifiques à la structure du stade Charléty.

Ce problème de tolérances a entraîné la mise en œuvre de moyens originaux non utilisés dans des opérations antérieures et qui n'auraient pu être envisagés sans l'ensemble des moyens de l'entreprise. En effet, l'ouvrage était prescrit avec des dimensions minimales à respecter impérativement alors qu'il n'avait pas pu être calculé en intégrant tous les paramètres indispensables à sa détermination, et avec des détails architecturaux demandant un minimum d'organes de réglage pour ne pas briser l'aspect élancé qui était une des bases du projet.

Il a donc été demandé à Baudin-Châteauneuf d'estimer :

- ◆ les défauts susceptibles d'apparaître dans la réalisation de tous les détails,

- ◆ les déformées induites par ces défauts lors du montage de l'ossature,

- ◆ les déformations du béton et de la charpente pour les anticiper,

afin que la réalisation définitive ait l'apparence d'une structure sans organe de réglage à quelques exceptions près.

Pour y parvenir, la démarche a été de lister l'ensemble des "écarts raisonnables" (compte tenu des moyens de fabrication ou compte tenu des tolérances réalisables par les fournisseurs de matière première), d'en estimer les incidences sur le montage final de l'ossature et, dans la mesure où le résultat final n'était pas "acceptable", d'analyser chaque défaut et de trouver la solution au problème respectant au mieux l'aspect architectural d'origine.

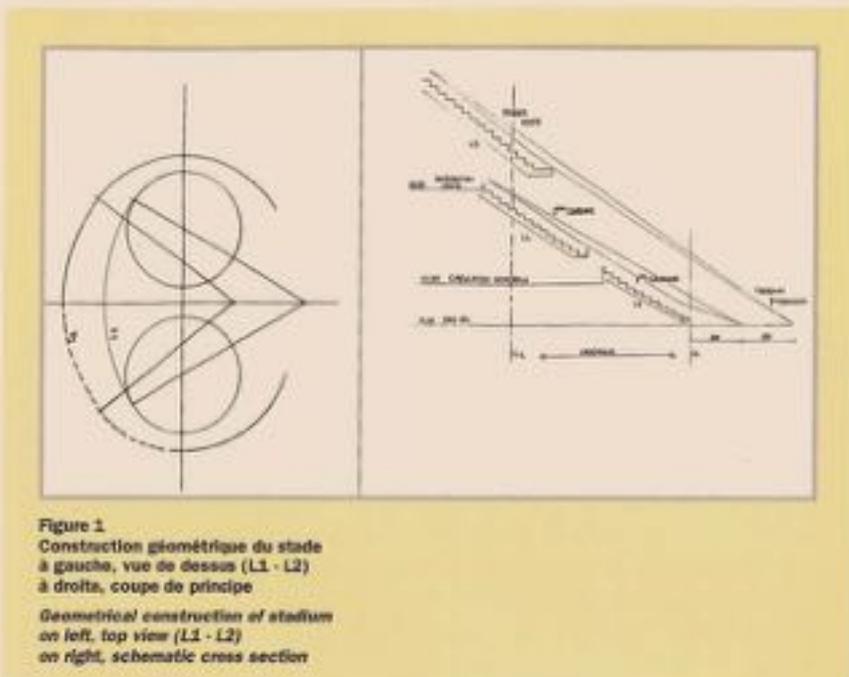


Figure 1
Construction géométrique du stade
à gauche, vue de dessus (L1 - L2)
à droite, coupe de principe

Geometrical construction of stadium
on left, top view (L1 - L2)
on right, schematic cross section

C'est l'ensemble de cette démarche à caractère tout à fait exceptionnel pour des ouvrages de charpente métallique que nous allons détailler dans la suite de notre exposé.

La géométrie du stade est complexe et a dû être définie par DAO pour permettre le calcul des positions, dimensions et formes des divers éléments constitutifs de la charpente.

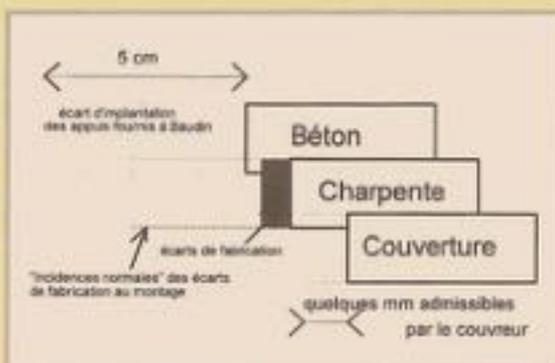
CONSTRUCTION MÉTALLIQUE - STRUCTURES

- La plupart des pièces sont uniques, rendant impossibles les contrôles habituels de conformité ; les tolérances de fabrication doivent dès lors être réduites au maximum et l'atelier doit se donner de nouveaux moyens de contrôle.
- Comme notre charpente s'insère entre les portiques béton (sur lesquels elle vient se fixer) et la couverture, elle doit :
- ◆ reprendre les tolérances importantes d'implantation et les déformations des portiques,
 - ◆ et permettre à la couverture de se monter dans de faibles écarts de dimensions par rapport aux cotes théoriques notamment à cause de la présence de verrières qui sont par définition rigides (et cassantes !).

Dans le cas du stade, les étapes intermédiaires majeures de montage étaient les suivantes :

- ◆ fabrication du tube arrière en atelier
 - contrôle des cotes finales obtenues ;
 - ◆ repérage difficile, dans l'espace, des têtes de poteaux béton et des positions des tiges d'ancrage des pièces de fixation des tubes arrière sur ces poteaux ;
 - ◆ fabrication à l'unité des pièces d'ancrage de tubes prenant en compte les écarts constatés ci-avant
 - contrôle des cotes finales obtenues ;
 - ◆ montage au chantier de ces pièces sur les poteaux béton avec les tubes arrière
 - contrôle des cotes finales obtenues par mesure sur site ;
 - ◆ mise en précontrainte des poteaux béton par le génie civil
 - nouveau contrôle des positions des tubes dans l'espace ;
 - ◆ prise en compte des défauts du tube arrière dans la fabrication des PRS
 - contrôle en usine avant mise en peinture et expédition ;
 - ◆ montage des profils reconstitués soudés (PRS).
- En théorie, il aurait été nécessaire de mesurer ces profils sur site pour intégrer les écarts dans la fabrication des entretoises à venir (nous venons par la suite qu'elle a été la solution retenue à ce niveau). Les exigences architecturales amenèrent à optimiser, dans un premier temps le montage des tubes arrière pour éviter une liaison PRS/tube lourde et inesthétique ; dans un deuxième temps les traitements de la liaison PRS/tube arrière et, enfin, pour assurer la géométrie finale de l'ensemble de l'ossature, le traitement des entretoises.

Figure 2
Schématisation des différentes tolérances à chaque étape de la construction
Schematic representation of different tolerances in each construction phase



La figure 2 permet d'apprécier les incertitudes admissibles par chaque corps de métier, sachant qu'en final, le couvreur doit rester dans ses tolérances, tolérances qui apparaissent très faibles en regard de celles réalisables par le béton et la charpente.

Or, la charpente est le support direct (absence d'interface) de la couverture, c'est sa position finale qui permettra au couvreur d'intervenir correctement.

Pour parvenir à résoudre ce problème, à chaque étape de la réalisation et du montage de la charpente, nous avons dû adopter des procédures pour limiter les écarts finaux de réalisation.

Le cheminement le plus rationnel pour y parvenir consiste à mesurer, à chaque phase intermédiaire, les défauts des éléments (poteaux béton, fabrications en usine) et de les compenser dans les fabrications à venir.

Tout ceci est très théorique et les conditions de planning entraînent souvent l'impossibilité de ce genre de démarche.

Traitement du problème de montage des tubes arrière

Les tubes constituant la référence de départ pour la précision de l'ouvrage livré au couvreur ; une position du tube trop éloignée de sa position théorique peut remettre en cause l'assemblage PRS/tube.

L'objectif à atteindre est de :
+ ou - 30 mm dans le sens intérieur-extérieur stade,
+ ou - 15 mm en altimétrie,
au niveau des points d'attache des PRS sur le tube.

Problèmes rencontrés : "un positionnement difficile"

Difficultés dues à la géométrie

- ◆ Les petits portiques ont une altimétrie variable. Elle varie entre 66 NGF (dans le prolongement du grand axe du stade) et 71 NGF (face aux grandes tribunes), la variation s'étalant sur un quart du stade, de façon irrégulière.

◆ Les petits portiques béton sont disposés sur un cylindre d'axe vertical dont la base est une courbe formée par quatre arcs de cercle centrés différemment.

◆ Toute la structure est paramétrée (l'implantation des portiques conditionne celle des appuis du tube) : l'emploi de la DAO est indispensable.

◆ D'autre part, les tubes arrière peuvent être soit courbes, si l'on veut que les abouts soient perpendiculaires aux génératrices, soit droits avec des abouts formant des plans à angle variable par rapport aux génératrices.

Difficultés dues à l'interface béton/acier

◆ L'implantation des portiques béton dépend principalement des tolérances obtenues lors du coulage et, dans une moindre mesure, de déplacements dus au travail du béton (déplacements après décoffrage, fluage...).

Deux portiques successifs n'auront pas, a priori, des retraits et des défauts d'implantation identiques. De plus, la conception et la méthodologie de coulage des portiques ne permettent pas une précision supérieure à :

+ ou - 5 cm en altimétrie,

+ ou - 3,7 cm perpendiculairement à l'axe du portique,

+ ou - 4,75 cm dans le sens intérieur-extérieur stade,

+ ou - 0,4775° pour l'orientation en plan d'une tranche sécante au portique.

La charge engendrée lors de la pose des gradins béton (deuxième couronne) ajoute un déplacement aux portiques. Les tiges réalisant l'interface béton/acier sont placées lors du coulage du béton. Elles en sont solidaires et se déplaceront dans les mêmes proportions que les portiques. Leur position précise est donc imprévisible.

Enfin, 45% de la flèche totale en nez de PRS est occasionnée par les déformations du béton. (pour module béton de 1308 000).

La majorité des efforts qui se développent dans la charpente métallique est reprise par le tube AR et passe donc dans les portiques.

Ainsi un effort tranchant de 100 t doit être transmis par le système d'ancrage des tubes arrière sur le portique béton.

Cet ancrage doit donc être important mais également présenter une certaine adaptabilité pour prendre en compte les tolérances et déformations du béton.

Pour le réaliser il a été tenté l'emploi traditionnel d'une bêche (pièce métallique logée dans le béton qui permet de transmettre un effort dans le béton avec une pression qui doit rester admissible) (figure 3).

Celui-ci fut abandonné, car la bêche présentait une section trop importante pour être insérée dans les poteaux béton de section trop exigüe.

Le seul moyen (sans changer les sections des por-

tique béton) était de transmettre cet effort tranchant par frottement, d'où l'application d'un effort normal très important entre béton et charpente.

Un système de câbles de précontrainte associé à deux taquets soudés sous platine permet de diffuser les efforts en respectant les dimensions des portiques béton.

Difficultés dues aux dimensions des portiques

Les faibles dimensions des portiques béton et de l'insert imposées par l'architecte ne permettent pas des percages et des calages au niveau de l'insert suffisamment importants pour compenser les tolérances extrêmes des portiques béton.

Conclusion. Il est impossible :

◆ de fabriquer des pièces de liaison tube/portique en série,

◆ de se contenter de l'imprécision au niveau de l'implantation des tiges d'ancrage par ajout de cales pour achever le réglage.

Solutions

◆ Réglage au niveau du tube après montage des inserts : c'est à dire ajuster le tube à ce qui aurait été constaté une fois les inserts scellés : trop difficile, plus coûteux, incompatible avec le planning général.

◆ Augmentation de la section des portiques et de la platine de l'insert permettant des percages avec jeu important : refusé par l'architecte.

◆ Réglage au niveau de la fabrication de l'insert après relevé géomètre des têtes de portiques : seule solution possible dans l'environnement de contraintes.

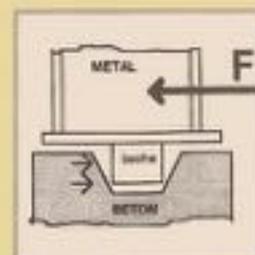


Figure 3
Schéma de principe de l'ancrage
Schematic diagram of anchoring

En cours de montage : le tube arrière est monté plusieurs semaines avant l'ossature principale pour permettre les mesures après précontrainte des portiques en béton. Les arbalétriers sont fabriqués en fonction de la position réelle du tube par rapport à la position théorique.

During erection : the rear tube is erected several weeks before the main structure to allow measurements after the pre-stressing of the concrete frames. The top chords are produced according to the real position of the tube in relation to the theoretical position.



CONSTRUCTION MÉTALLIQUE - STRUCTURES

Traitement du problème

Tube à sa position théorique

Fabrication des tubes

Le premier problème à résoudre est la réalisation des tubes conformes aux plans des architectes. Plutôt que de fabriquer des tubes courbes, il est, d'un point de vue économique et technique, plus simple de "débiter" des tubes cylindriques de la longueur voulue et d'y adapter les pièces d'abouts. C'est ce qui a été fait dans un premier temps, la conception au niveau architectural avait été vue dans ce sens.

Fabrication unitaire des abouts des tubes

Chaque tube est unique dans sa longueur et dans la valeur des angles entre le plan perpendiculaire aux génératrices du tube et celui limitant ses extrémités.

Les découpes des tubes furent réalisées par exploitation directe des données de la DAO transférées dans la mémoire des machines de découpage. L'intervention humaine se limita à un contrôle des découpes garantissant une bonne transmission de l'information et limitant les erreurs possibles.

Afin de satisfaire aux exigences de précision imposées par la couverture, il s'est avéré nécessaire de réaliser des mannequins d'assemblage reproduisant pour chacune des zones du stade entre joints de dilatation, l'ensemble des têtes de portique béton (dix zones différentes et jusqu'à six têtes de portique par zone) afin de souder les abouts des tubes.

Reconstitution des têtes de portique

Les plans des architectes et l'utilisation de la DAO ont, là aussi, permis la reconstitution zone après zone des têtes de portique et le positionnement des

tubes dans les berceaux disposés à intervalles réguliers.

La mise en vis-à-vis d'un pointage sur l'about du tube et d'une génératrice tracée sur le tube et préalablement repérée achevait le réglage des tubes.

La soudure des abouts

Les mannequins d'assemblage permirent non seulement un positionnement des pièces en vue d'un soudage précis, mais également la vérification a posteriori de la bonne fabrication des tubes. Le soudage ne présentait dès lors plus de difficultés.

Un dernier contrôle, après remontage sur les mannequins des tubes habillés de leurs raidisseurs, permit de s'assurer que la soudure n'avait pas déformé les pièces au-delà des tolérances admises et d'effectuer les éventuelles reprises.

Inserts au théorique

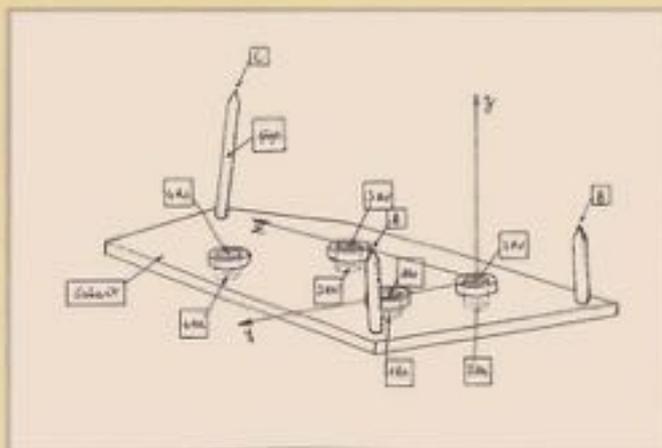
Toutes les déformations et tolérances des portiques doivent être reprises par le réglage des inserts, les tubes étant désormais fabriqués en conformité avec leur position théorique.

L'amplitude des tolérances ne permettant pas la seule mise en place des cales, un relevé géomètre systématique des tiges de positionnement temporaire suivi de modifications "particularisées" sur les inserts s'est avéré être la seule solution envisageable.

Le relevé se fait sur des gabarits positionnés en tête de portique présentant les caractéristiques suivantes :

- ◆ les extrémités des tiges sont visibles des bornes à l'intérieur du stade ;
- ◆ ils permettent la détermination précise, à l'aide d'un simple outil matriciel, des coordonnées de deux points (avant et arrière) par tige (figure 4).

Figure 4
Gabarit pour
mesure de
la position des
portiques béton
Concrete frame
position
measurement
gauge



L'exploitation des relevés est rapide et après ajustement des écarts, les coordonnées des tiges sont immédiatement envoyées à notre bureau d'étude. Celui-ci vérifie par triangulation que les gabarits n'ont pas été détériorés et déclenche la finition des inserts correspondants.

◆ Les réglages latéral et angulaire sont repris par le soudage plus ou moins désaxé de l'âme de l'insert.

◆ Le réglage longitudinal (intérieur-extérieur stade) par le perçage plus ou moins excentré des douze trous permettant l'assemblage des tubes par rapport à la platine.

◆ Le réglage en altimétrie par usinage de cales.

Gestion du planning

Les finitions des inserts ne sont donc réalisées que consécutivement au décoffrage des poteaux en béton et à la pose des gradins béton de la deuxième couronne, l'ensemble des déformations du béton avant pose de la charpente devant être réalisé.

Cette dépendance vis-à-vis des travaux béton fait que la planification se trouve en permanence sur le chemin critique.

L'objectif est de réduire au maximum le délai séparant la livraison des portiques et celle des tubes arrière sur le chantier. Dans les faits, dix jours séparent les deux tâches :

- ◆ un jour pour le relevé et la transmission géomètre,
- ◆ un jour pour l'exploitation en bureau d'étude,
- ◆ cinq jours pour la fabrication des inserts,
- ◆ trois jours pour le grenailage et la peinture des inserts.

Cette durée ne se cumulant pas pour chaque zone, la perte relative de ces dix jours est largement compensée par la précision obtenue et la qualité qui en résulte au niveau des assemblages.

Le bon enchaînement des tâches est obtenu par une gestion précise et une surveillance aiguë de la part du conducteur de travaux qui suit la progression des travaux et déclenche l'intervention des géomètres.

En conclusion, la qualité obtenue pour le montage des tubes arrière, extraordinaire pour un ouvrage de construction métallique, se retrouve pour les autres phases de montage, notamment au niveau de l'attache des PRS sur le tube et au niveau de la fabrication des entretoises.

Traitement de la liaison tubes/PRS

Position du problème

La méthodologie de montage des tubes arrière, même si elle reprend la majeure partie des tolérances sur les portiques béton, n'assure pas un positionnement suffisamment précis des PRS pour satisfaire aux exigences des couvreurs.

Il reste des incertitudes sur la position des tubes sur chantier :

- ◆ les portiques béton continuent de se déplacer sous l'effet de la précontrainte ;
- ◆ il subsiste des écarts entre la position des tubes au montage à blanc et celle au chantier dus aux démontages, remontages répétés ;
- ◆ les imprécisions sur les relevés des géomètres se répercutent sur la fabrication des inserts.

Il est donc nécessaire de prévoir un réglage complémentaire au niveau de la liaison tube/PRS.

Solution

Dans un premier temps, un relevé géomètre des tubes arrière au niveau de l'attache de PRS détermine la position de l'axe moyen du tube : pour permettre un relevé précis, une mire aimantée adaptable sur le contour des tubes fut spécialement conçue.

Les géomètres placent la mire en différents points des demi-bagues et déterminent ainsi deux cercles homothétiques de ceux définissant le pourtour du tube

Les centres de ces cercles donnent la direction de l'axe moyen du tube.

Les résultats sont exploités par notre bureau d'étude qui calcule les écarts de position entre cet axe et l'axe théorique. Un programme DAO fut élaboré à ce sujet qui facilite les calculs, limite les risques d'erreur et réduit les temps d'exploitation.

Seuls les écarts dans le sens intérieur/extérieur stade et altimétriques sont à rattraper, l'écart latéral étant insignifiant compte tenu du montage des tubes sans calage.

◆ L'écart intérieur/extérieur stade est repris par le soudage sur le PRS de deux rondelles circulaires au niveau des trous oblongs.

◆ L'écart altimétrique est repris par ajout de cales entre le PRS et la coquille d'attache

Incidence sur la planification

La liaison tube/PRS aurait pu être ajustée directement sur le chantier, au cas par cas, par ajout de cales suffisant à combler les écarts verticaux, la réalisation du réglage intérieur/extérieur stade se serait faite par soudage d'une rondelle positionnant l'axe par rapport au PRS.

L'ensemble des PRS aurait pu être livré sur le chantier plus rapidement avec cette méthode. Ce gain ne prenait malheureusement pas en compte le risque des intempéries, incompatible avec le planning général.

De plus, la méthode retenue présente des avantages :

- ◆ pour l'architecte, la liaison est plus esthétique ;
- ◆ pour les couvreurs, la précision de montage est plus grande.

Le problème consista à optimiser les temps de réaction liés à cette méthode de montage pour ne pas engendrer un surcoût trop important et éviter

Concepteur de l'ouvrage

Architectes Henri et Bruno GAUDIN

Maître d'œuvre

Architectes : Henri et Bruno Gaudin, mandataires du groupement de maîtrise d'œuvre

OTH : cotraitant comme bureau d'étude et maîtrise de chantier

Maître de l'ouvrage

Ville de Paris

Constructeur métallique

Baudin-Châteauneuf

CONSTRUCTION MÉTALLIQUE - STRUCTURES

► tout retard sur chantier. Il fut en partie résolu grâce à une bonne coordination entre :

- ◆ géomètre et bureau d'étude (transmission rapide de l'information),
- ◆ bureau d'étude et atelier (la finition des PRS commence dès réception des données).

Ainsi le temps séparant le relevé géomètre de la livraison sur chantier fut réduit à :

- ◆ un jour pour le relevé et la transmission géomètre,
- ◆ un jour pour l'exploitation du bureau d'étude,
- ◆ quatre jours pour la finition des PRS,
- ◆ cinq jours pour le grenailage et la peinture des PRS.

Traitement des entretoises

Position du problème

Les entretoises, assemblées sur une zone complète entre joints de dilatation (longueur ~ 50 m) doivent reconstituer une poutre continue, poutre sur laquelle viennent reposer les arbalétriers une fois montés sur chantier, l'autre point d'appui de ces arbalétriers étant le tube arrière.

Cette poutre constitue un point d'appui qui détermine la position des PRS en antisymétrie (en particulier en rive intérieure du stade). Il est donc impératif que cette poutre soit quasi parfaite si l'on veut que son montage sur chantier soit possible. En effet, chaque élément vient s'insérer entre les arbalétriers bridés sur le tube arrière et qui ont au droit de la jonction avec l'entretoise un défaut résiduel malgré la prise en compte des défauts du tube dans leur fabrication.

Solution

Dans un premier temps, la solution retenue a été de réaliser un montage à blanc en atelier des entretoises de chaque zone entre joints de dilatation pour assurer la géométrie parfaite globalement, les perçages des platines devant être réalisés par la suite sur chantier.

Le bureau d'étude a confié les coordonnées des différents points caractéristiques des entretoises (en tenant compte de la suppression de l'écartement dû aux PRS) de façon à caler les entretoises suivant leur position dans l'espace (figure 5).

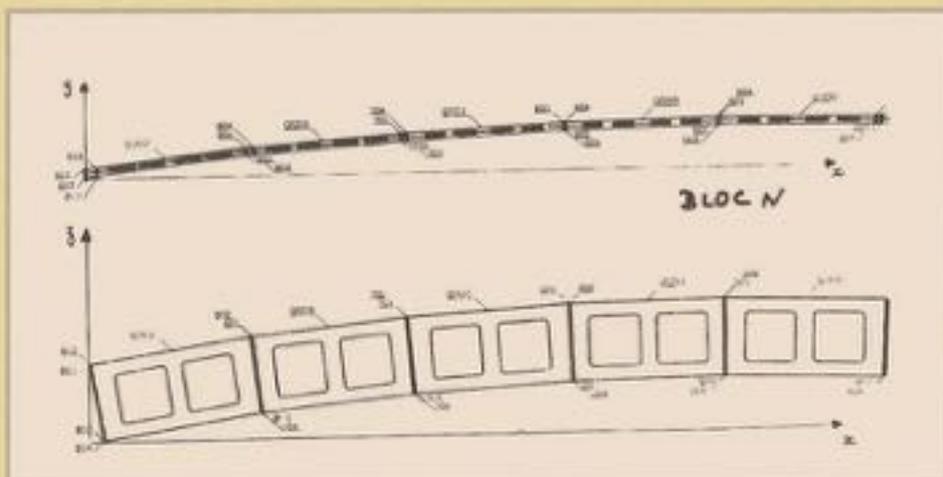
Le listing des coordonnées et les plans des zones furent réalisés grâce à la DAO. L'atelier procédait également à un contrôle dimensionnel de chaque entretoise pour s'assurer de leur bonne géométrie. Il était ensuite envisageable de pointer, puis de souder les entretoises de façon que deux ailes de part et d'autre d'un PRS soient parallèles.

Les entretoises formaient de cette façon une véritable poutre continue.

Sur le chantier, les entretoises étaient montées sur les PRS, maintenues provisoirement par quatre boulons, le réglage (dans la direction de la grande inertie de l'entretoise) étant possible grâce aux quatre trous oblongs percés sur les têtes des PRS. Après pointage des trous des têtes des PRS sur les entretoises, celles-ci étaient déposées, percées puis remontées.

On s'est aperçu, suite au contrôle sur chantier que le contre-perçage pouvait être évité (compte tenu des précisions constatées) et que les entretoises pouvaient être percées lors du montage à blanc en

Figure 5
Plan DAO obtenu après suppression des arbalétriers pour montage à blanc en atelier ; en haut, vue de dessus ; en bas, élévation
CAD drawing obtained after eliminating the top chords for trial erection in shop ; above, top view ; below, elevation



atelier en complétant les opérations de positionnement de pièces. Ce changement de procédure présentait l'avantage de diminuer les interventions sur site toujours plus délicates vu l'environnement exposé aux intempéries notamment.

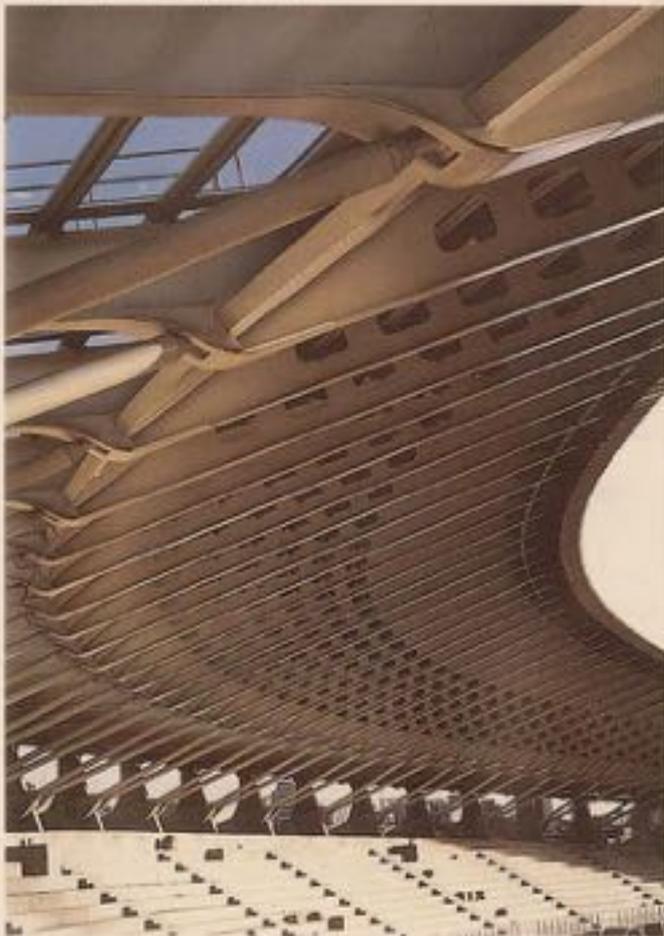
Conclusion sur le montage des entretoises

La surcharge de travail et le coût au niveau de l'atelier (notamment pour positionner parfaitement l'ensemble des trous des platines de toutes les entretoises dans l'espace) étaient compensés par les gains réalisés au niveau du chantier :

- ◆ diminution du temps d'utilisation des moyens de levage,
- ◆ diminution des manutentions des entretoises, une moindre dégradation des pièces en géométrie et en protection anticorrosion d'où une amélioration de qualité du produit fini tout en respectant les contraintes de géométrie finale.

Perspective, montage terminé

Perspective, view of completed erection



ENGLISH SUMMARY

The grand-stands of the Sébastien-Charlôty stadium

Giles Chartier

Described is a custom-designed metallic structure weighing over 1.900 t with an extremely complex geometry and calling for exceptional resources:

- computer-assisted design (CAD) indispensable for the component geometry problems and the modeling of the structure with computer calculations,
- interface between CAD and numerical-control machines ensuring manufacturing reliability (outputs), and, especially, the application of exceptional manufacturing and assembly methods required owing to:
- extremely close tolerances within a composite steel/concrete structure with no adjustment components,
- scheduling constantly on the critical path.

DEUTSCHES KURZREFERAT

Die Tribünen des Stadions Sébastien Charlôty

Giles Chartier

Hierbei handelt es sich um eine knapp 1.900 Tonnen schwere, maßgeschneiderte Stahlkonstruktion von äußerster Komplexität, für deren Ausführung außergewöhnliche Mittel eingesetzt wurden:

- computergestützte Konstruktion (CAD), unerlässlich für die geometrische Auslegung der Bauteile und die Modell-darstellung der Struktur für die Computerberechnungen;
- Schnittstellen zwischen der CAD und den numerischen Steuerungen für die Gewährleistung der Fertigungszuverlässigkeit (Mengenleistungen). Darüber hinaus mußten Fertigung und Montage unter Umsetzung ganz besonderer Methodiken durchgeführt werden, denn:
- die zulässigen Toleranzen sind innerhalb einer kombinierten Stahl-/Beton-Struktur ohne Einstellorgane extrem eng,
- der Terminplan folgte ständig dem kritischen Pfad.

RESUMEN ESPAÑOL

Las tribunas del estadio Sébastien Charlôty

Giles Chartier

Se trata de una estructura metálica de cerca de 1.900 toneladas, cuya geometría es sumamente compleja, construida a medida, de lo cual se han precisado medios excepcionales, a saber:

- diseño con ayuda de ordenador (DAO), indispensable para solucionar los problemas de geometría de los elementos componentes y de modelización de la estructura para los cálculos informáticos,
- interfaz DAO/máquinas de control numérico para conseguir la debida fiabilidad de la fabricación (seccionamiento de los elementos), y, sobre todo, aplicación de metodologías absolutamente excepcionales para las fabricaciones y los montajes. Metodologías impuestas por:
- tolerancias sumamente estrictas en el seno de una estructura mixta acero/hormigón, con ausencia de órganos de ajuste,
- una planificación constantemente en camino crítico.