

comportant un faible pourcentage de silicium, afin que leur résistance à la tension atteigne 180 kilogrammes par millimètre carré ; de la sorte, on a pu n'utiliser qu'un seul câble de chaque côté du pont pour soutenir le tablier. Grâce à cette simplification de la structure, le poids de l'ensemble et la durée de l'édification ont été diminués.

Pour mettre en place les câbles sans gêner la navigation, un hélicoptère a tout d'abord transporté un câble de guidage au-dessus du détroit ; on a utilisé ce guide pour tirer des câbles plus résistants et former une passerelle. Des treuils placés le long de cette passerelle ont permis de tendre chaque toron. C'est à minuit, lorsque la chaleur du soleil ne risquait pas de faire jouer le métal, que les techniciens ont ajusté les profils des torons afin de répartir équitablement la charge sur chacun d'eux.

Le 17 janvier 1995, juste après la mise en place des câbles, un séisme de magnitude égale à 7,2 a frappé une vaste zone à proximité du pont : l'épicentre n'était qu'à quatre kilomètres de là. Ce séisme a dévasté la ville de Kobe et détruit des routes, des voies ferrées et d'autres infrastructures de la région. Après avoir analysé les effets, les géologues ont déterminé qu'une nouvelle faille s'était ouverte près du pont, à 14 kilomètres de profondeur, provoquant un déplacement des fondations et une ouverture de 80 centimètres de la travée centrale et de 30 centimètres de la travée située du côté d'Awaji.

La structure déjà construite n'a pas été endommagée, parce que, lors de la conception du pont, les ingénieurs avaient envisagé les conséquences d'un séisme de magnitude 8,5, qui aurait résulté d'un mouvement de la plaque Pacifique. Ils avaient même conçu les structures pour qu'elles résistent à une tempête ou à un séisme tels qu'il ne s'en

produit qu'une fois tous les 150 ans. En revanche, ils n'avaient pas prévu un déplacement des fondations, dû à une nouvelle faille à l'aplomb du pont.

Réalisation de la jonction

Les ingénieurs ont donc dû redessiner les travées, afin d'allonger le pont de 1,1 mètre ; un mois après le séisme, la construction reprenait. C'était un moindre mal que le séisme se soit produit avant que le pont ne soit terminé, car certaines structures comme les joints de dilatation, qui ont été insérées plus tard, auraient pu être endommagées.

En dessinant les travées, les spécialistes ont trouvé qu'un type particulier de torsions du tablier, lors de certains vents, risquait d'être gênant : sans un amortissement, le pont se briserait. Utilisant à nouveau une soufflerie, ils ont alors conçu une travée renforcée, qui ne présentait pas cette résonance, et ils ont installé des plaques de stabilisation verticales sous la bande médiane du pont afin d'amortir les oscillations. Des grilles posées sur la partie centrale et sur les deux côtés du pont ont encore réduit les risques de résonance.

En juin 1995, les ouvriers ont posé les travées en béton armé sur les pylônes grâce à un bateau-grue de 3 500 tonnes. Puis des éléments de charpente plus petits, préassemblés en morceaux de 28 mètres, ont été posés à l'avant des travées et fixés à elles. Ainsi, les deux extrémités du pont s'étiraient à la rencontre l'une de l'autre jusqu'à se rencontrer, au mois d'août 1996.

Aujourd'hui, les équipes techniques effectuent les dernières finitions : mise en place des câbles électriques, pavage du tablier, etc. Après son inauguration, au printemps 1998, ce pont sera au service du Japon pour de nombreuses décennies.

Satoshi KASHIMA a dirigé le premier bureau de construction du pont Akashi-Kaikyo et il a participé à la pose des fondations. Makoto KITAGAWA est le directeur de l'Office de construction Tarumi, qui a été en charge des câbles du pont.

H. Max IRVINE, *Cable Structures*, Dover Publications, 1992 (publié au MIT Press en 1981).

Super Span, in *Japan Economic Journal (Nihon keizai shimbun)*, vol. 31, n° 1596, pp. 13-19, 22 novembre 1993.

Niels J. GIMSING, *Cable Supported Bridges : Concept and Design*, 2^e édition, John Wiley & Sons, 1997.

N. TAKE, M. KITANI, H. KONISHI et N. NISHIMURA, *Feasibility Study on Dual Cable Suspension Bridges*, in *Technology Reports of the Osaka University (Osaka Daigaku hogaku hokoku)*, vol. 47, n° 2267/82, pp. 79-88, 1997.

K. MATSUDA, Y. HIKAMI et M. TOKUSHIGE, *Proposal for Super-Long Span Suspension Bridge and Its Aerodynamic Characteristics*, in *IHI Engineering Review (Tokyo)*, vol. 30, n° 3, pp. 93-100, 1997.

Les plus hautes tours du monde

CESAR PELLI • CHARLES THORNTON • LEONARD JOSEPH

Les tours jumelles Petronas, construites à Kuala Lumpur, en Malaisie, sont un symbole culturel et économique.

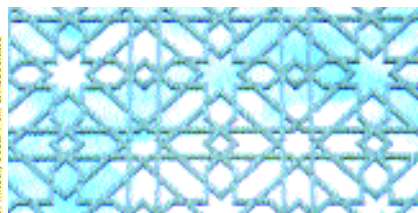
Devenus arrogants, les hommes entreprirent de construire une tour jusqu'au ciel, refuge de Dieu. Ce dernier créa alors les différentes langues : désormais incapables de se comprendre, les constructeurs abandonnèrent leur ouvrage. Ce récit biblique de la tour de Babel décrit une aspiration humaine éternelle : des Égyptiens avec leurs pyramides, aux Mésopotamiens avec leurs ziggourats, des Chinois avec leurs pagodes aux musulmans avec leurs minarets, les civilisations ont toujours voulu édifier de hautes constructions. La plupart du temps, leurs motivations étaient religieuses ou, du moins, fortement symboliques.

Les avatars modernes des pyramides sont les gratte-ciel. Depuis plus d'un siècle, architectes et ingénieurs transforment l'aspect des villes parce que, théoriquement et pratiquement, ils maîtrisent les techniques de construction en hauteur.

Les constructeurs des premiers gratte-ciel s'étaient inspirés des colonnes grecques et des tours de la Renaissance. Après la Seconde Guerre mondiale, les architectes s'affranchirent des références au passé et dessinèrent des structures rectangulaires, à toit plat, qui n'étaient plus des gratte-ciel, mais de simples tours. À Kuala Lumpur, capitale de la Malaisie, les tours jumelles Petronas sont un retour aux sources : ces bâtiments, les plus hauts du monde, ont avant tout une fonction symbolique.

Ces tours de 88 étages, qui culminent à 451,9 mètres, reliées par une passerelle entre les 41^e et 42^e étages, sont plus qu'un ensemble de bureaux : symboles de la croissance économique de la Malaisie, elles s'inscrivent dans

la tradition islamique originale de ce pays de 19 millions d'habitants. Les étages ont un plan en étoile, dont les branches, alternativement des angles droits et des arcs de cercle, sont inspirées par l'art islamique classique.



J. Mitsui, Cesar Pelli & Associés



P. Follett, Cesar Pelli & Associés

1. DES MOTIFS ISLAMIQUES (en haut) ont inspiré les architectes des tours Petronas (en bas et page ci-contre).

Les murs extérieurs reproduisent le même motif.

Dans chacune des tours, la surface disponible atteint 213 750 mètres carrés (l'équivalent de 24 fois la pelouse du Stade de France). Elle est occupée par des bureaux, par un centre d'exposition sur le pétrole, par une galerie d'art et par des salles de conférence multimédia. Les deux tours sont la pièce maîtresse d'un ensemble immobilier, nommé *Vision 2020*, qui constituera le nouveau centre-ville de Kuala Lumpur. Elles seront entourées d'un centre de commerces et de loisirs de 140 000 mètres carrés, d'une salle de concert de 2 600 mètres carrés pouvant accueillir 850 personnes, d'un parking souterrain de 251 000 mètres carrés pour 5 000 voitures et de deux tours de bureaux, plus petites, d'une superficie totale de 186 000 mètres carrés environ.

Ce complexe appartient à un groupement dont fait partie la Société *Petronas*, la compagnie pétrolière nationale malaise, qui occupe une bonne partie de sa surface. Nous examinerons ici les différentes étapes du projet, du concours pour sa conception, en 1991, à l'achèvement de la coiffe des tours.

La porte de la Malaisie

L'histoire des tours Petronas commence classiquement par un concours international. L'appel d'offres, publié au début de l'été 1991, décrit brièvement les principales caractéristiques imposées de l'ensemble de 40 hectares (un centre commercial et des espaces ouverts au public) et il précise que deux tours seront construites dans l'angle Nord-Est pour la Société *Petronas*. Ces tours



seront une porte vers le nouveau centre-ville. Elles distingueront «un lieu que tous reconnaîtront comme unique à Kuala Lumpur et à la Malaisie». La hauteur des tours n'est pas précisée : elles doivent seulement être belles.

En trois semaines, les architectes concurrents préparent des plans, des maquettes et des perspectives, qu'ils remettent à l'équipe technique du maître d'œuvre. En août, chaque concurrent présente son projet à plusieurs commissions, qui comprennent le Premier ministre malais : les problèmes techniques et économiques sont débattus, mais aussi les questions esthétiques et philosophiques. C'est finalement la Société *Cesar Pelli & Associates* qui est choisie : son projet a un aspect malais qui a séduit le jury.

Un groupement de 16 sociétés est alors constitué pour la conception précise de l'ensemble immobilier. Les sociétés occidentales, qui savent concevoir et construire des bâtiments très élevés, travailleront en étroite collaboration avec des entreprises malaises, pour leur transmettre ces compétences.

Une étoile d'inspiration islamique

Symboles de la puissance économique malaise, les tours Petronas doivent différer des gratte-ciel européens ou américains. Leur forme est inspirée de l'art islamique classique, où les motifs géométriques revêtent une plus grande importance symbolique que dans la culture occidentale.

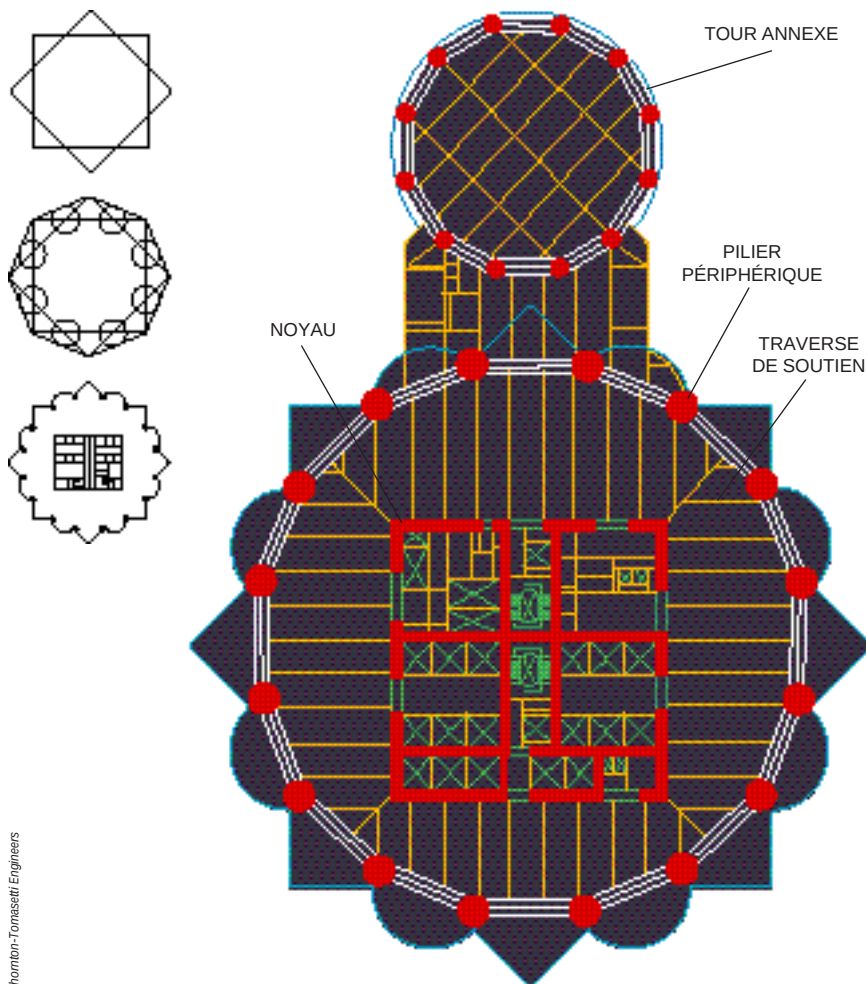
Lors de l'appel d'offres, la Société *Cesar Pelli* avait proposé un élégant contour en forme d'étoile à 12 branches qui permettait un usage fonctionnel de l'espace. Toutefois le Premier ministre malais avait alors laissé entendre que d'autres motifs seraient plus représentatifs de l'art islamique. Après l'attribution du contrat, le cabinet a cherché des motifs traditionnels et a trouvé que le plus fréquent était une étoile à huit branches, formée par la superposition de deux carrés concentriques, décalés d'un angle de 45 degrés. Toutefois, avec un tel plan, les murs extérieurs seraient venus trop près du centre du bâtiment, ce qui aurait gêné l'aménagement de l'espace intérieur.

L'ajout, dans les angles rentrants, de huit arcs de cercle a créé le motif à 16 branches qui a été retenu. Un pilier de structure occupe chacun des 16 angles rentrants, ce qui laisse l'intérieur de la tour libre de tout pilier.

Presque en même temps, la conception du noyau du bâtiment a commencé. Ce noyau est un parallélépipède creux, de section carrée : ses murs, au centre du bâtiment, sont le principal soutien de la structure. Il contient les ascenseurs, les escaliers, les systèmes de ventilation et de climatisation, et les toilettes. Il permet de satisfaire les futurs besoins des utilisateurs tout en gardant un rapport élevé entre l'espace utile et l'espace total. Dans les tours Petronas, ce rapport est finalement de 76 pour cent en moyenne pour un étage de bureaux, ce qui est satisfaisant pour un bâtiment aussi haut.

Le service des ascenseurs est optimisé. Chaque cage contient plusieurs cabines. Comme au World Trade Center de New York, les visiteurs qui se rendent dans la moitié supérieure des bâtiments sont d'abord emmenés par une cabine «directe» à mi-hauteur, où ils empruntent alors deux cabines de desserte locale. Aux heures de pointe, la capacité de transport est encore améliorée grâce à des cabines d'ascenseur à double pont.

Nous avons ensuite étudié en détail la façade extérieure et les espaces publics, en testant chaque élément des bâtiments avec des plans et des maquettes. Le choix du verre pour les fenêtres et de tubes en acier pour les pare-soleil, par exemple, détermine l'aspect global des bâtiments, le type d'éclairage des bureaux, la climatisation et, en définitive, les coûts de fonctionnement annuels.



2. LES ÉTAGES DES TOURS PETRONAS ont une forme d'étoile. Le contour était initialement une étoile à huit branches formée de deux carrés décalés de 45 degrés (schéma supérieur à gauche). Il a été modifié par l'ajout de huit arcs de cercle dans les angles rentrants des branches de l'étoile (schéma du milieu) pour accroître l'espace utilisable. Le dessin définitif comporte 16 parties saillantes : huit pointes et huit lobes (schéma du bas). Le noyau central, carré creux qui contient les ascenseurs, les ventilations mécaniques et les autres équipements de service, est relié aux piliers périphériques du bâtiment par des poutres de soutien. Un bâtiment plus petit, représenté par un anneau sur la partie supérieure du plan, monte jusqu'au 44^e étage des tours.