

Des monolithes de béton

Les premiers grands bâtiments faits en pierre, en béton classique : les piliers devaient être très solides. Les premiers ne bénéficiaient pas de l'acier. Aujourd'hui, redevient intéressante l'augmentation des améliorations qui sont apportées. Ainsi, l'addition de silice (poussière produite par l'électronique) et de microfibrilles au béton classiquement considérées pour leur résistance : on utilise des éléments structuraux en béton plus compactés «super béton» augmentent la résistance du béton, que l'on ne peut pas pomper. Le remède est d'une partie du béton des cendres volcaniques et du charbon évite la surchauffe du béton par la réaction chimique avec l'eau lors de la prise.

On était un matériau pour les colonnes porteuses des tours : les constructeurs l'utilisent couramment. On le transporte par seaux ou des pompes et on le moule facilement en formes complexes.

En outre, le béton, par sa raideur, divise par deux l'amplitude des oscillations du bâtiment, sous l'action du vent, par rapport à l'acier, à masse égale. Sa masse augmente la période d'oscillation des tours, qui est de neuf secondes pour les tours Petronas.

La résistance et la rigidité latérales sont des caractéristiques essentielles pour des tours. Des structures moins hautes s'appuient seulement sur leur noyau central, mais le noyau compact des tours Petronas ne fournirait que la moitié de la résistance et de la rigidité nécessaires pour qu'elles ne se déforment pas sous l'effet du vent. Nous avons donc relié les murs de ce noyau à une structure de bras et de colonnes en béton réparties sur son périmètre par l'intermédiaire de traverses rigides. Des ceintures d'armature d'acier s'étendent au-delà des colonnes périphériques, formant des saillies en forme de branches d'étoile qui, en outre, offrent aux occupants des vues dégagées.

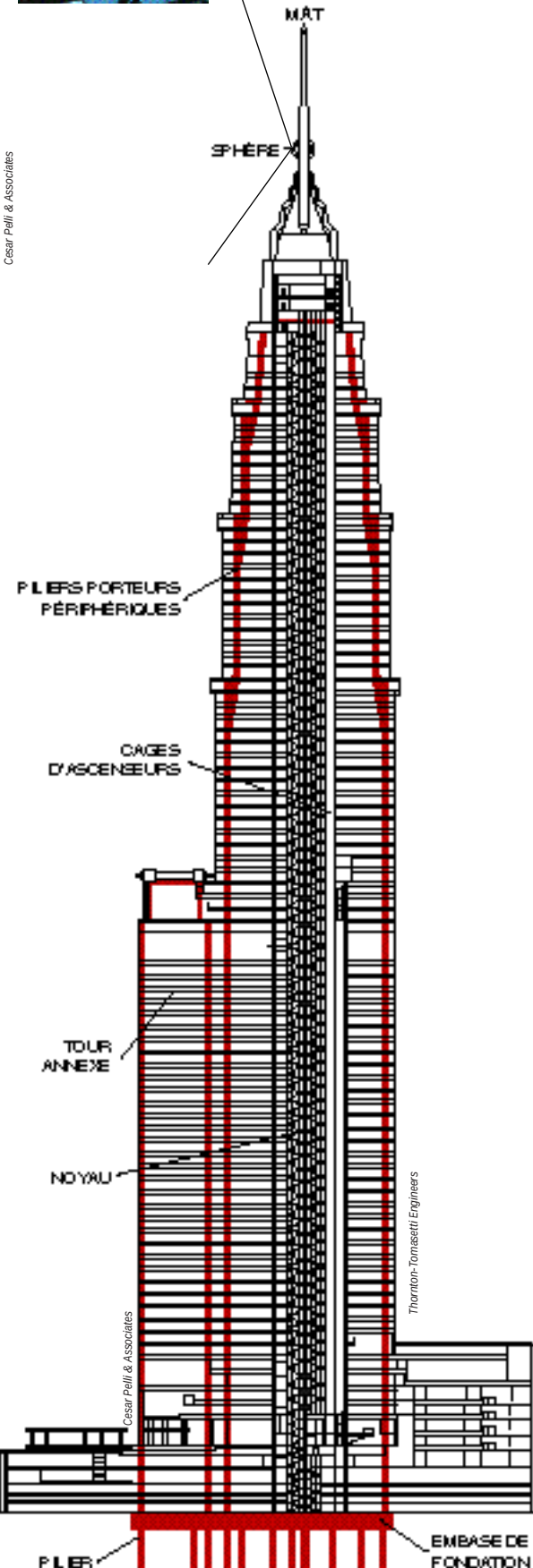
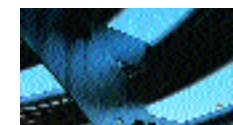
La façade est composée de panneaux de la hauteur d'un étage (quatre mètres) et de 1,4 mètre de large ; un système de joints imbriqués par tenon et mortaise a accéléré leur mise en place. Pour leur éviter la corrosion, dans le climat tropical de la Malaisie, on les a réalisés en acier inoxydable et en verre (teinté et autonettoyant) ; le tout forme une structure légère.

Les effets du vent sont réduits par plusieurs aménagements. L'amincissement des tours vers leur sommet diminue la prise aux vents plus rapides qui soufflent à grande hauteur. Aux étages supérieurs, les colonnes se rapprochent du noyau central. La prise au vent de la forme arrondie et nervurée des tours, quoique supérieure à celle d'un cylindre lisse, est inférieure à celle de tours rectangulaires. D'autre part, les nervures sur la surface extérieure des bâtiments créent de petites zones de turbulence qui disloquent les gros tourbillons, éventuellement menaçants pour la stabilité des bâtiments. Enfin, des essais en soufflerie ont montré que la circulation d'air entre les deux tours n'augmente que modérément leur oscillation.

Par chance, à Kuala Lumpur, les conditions naturelles sont favorables aux bâtiments élevés. La ville n'est pas située dans une zone d'activité sismique. Proche de l'Équateur, elle ne subit pas d'ouragans ni de typhons. Les orages tropicaux sont l'occasion de pluies abondantes et de violents coups de foudre, mais pas de vents trop rapides.

Comme la durée de construction d'un bâtiment élevé dépend du temps nécessaire à la construction d'un étage, les constructeurs ont mis en œuvre plusieurs techniques pour accélérer cette étape. Pour la construction des murs du noyau central, des plates-formes de travail et des coffrages ont été montés d'un seul tenant. La construction des planchers a aussi été accélérée par la suppression de plusieurs étapes nécessaires à la réalisation d'étages entièrement en béton (mise en forme, montage des barres de renforcement, étape de coulée, finitions et rattrapages), qui prend plus de temps que la construction des colonnes : des traverses en acier ont été fixées au corps du bâtiment et aux colonnes, recouvertes d'une dalle métallique, puis d'une dalle de béton assez mince.

4. LES 88 ÉTAGES DES TOURS sont coiffés d'un mât de 63,2 mètres de haut (à gauche). Les colonnes des étages supérieurs sont en retrait, ce qui amincit le sommet des bâtiments et réduit leur prise au vent (photographie en bas). Un observateur placé dans la coupole du mât donne une idée de l'échelle des bâtiments (photographie en haut).

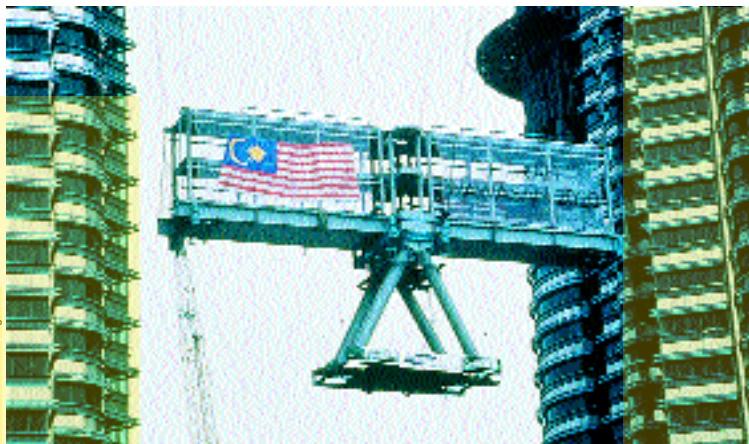


Une passerelle sur le ciel

La passerelle aérienne est un élément fonctionnel essentiel des tours Petronas. La jonction de deux niveaux à mi-hauteur des tours facilite l'accès à des salles de réunion, à un lieu de prière, à un restaurant et à des bureaux. La passerelle est prévue pour résister au feu, et elle permettrait l'évacuation d'une tour à l'autre en cas d'incendie, réduisant l'encombrement des autres trajets d'évacuation.

Elle a la forme d'une arche, soutenue du dessous. Cette forme permet l'utilisation de travées de passage assez minces. Les supports, des tubes d'acier de 1,1 mètre de diamètre, s'élèvent obliquement à partir d'appuis situés sur chaque tour et se rejoignent au milieu de la passerelle. Les emplacements des points d'appui minimisent l'élévation ou l'abaissement du plancher de la passerelle lorsque les tours bougent. Des essais en soufflerie sur une maquette ont montré que les vibrations de ces jambages flexibles, sous l'effet du vent, font apparaître des fissures de fatigue sur certains joints soudés ; nous avons donc ajouté des dispositifs d'amortissement pour réduire ces vibrations.

Fabriquée en Corée du Sud, la passerelle est arrivée en Malaisie en pièces détachées. L'entrepreneur chargé de sa construction l'assembla presque



5. LE LEVAGE DE LA PASSERELLE de 325 tonnes a duré trois jours, les équipements de commande ayant été endommagés par la foudre.

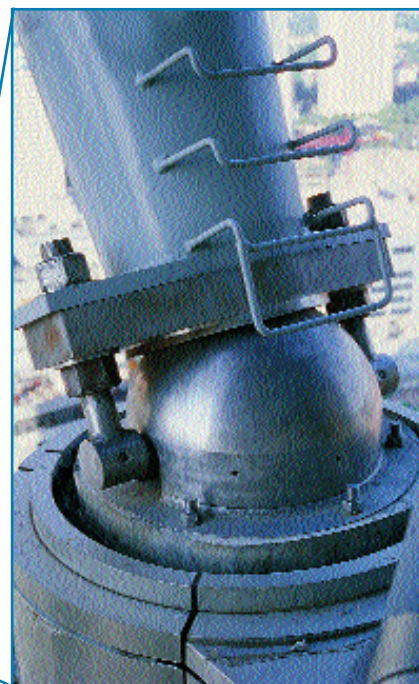
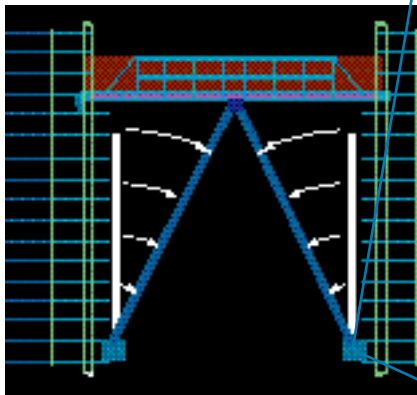
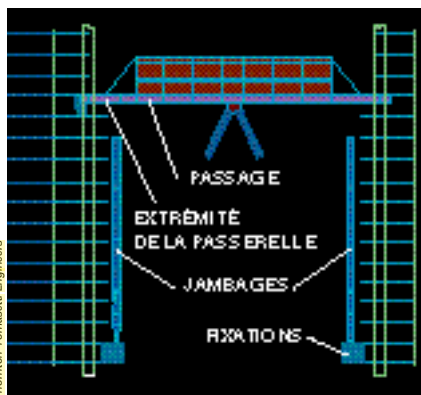
complètement au sol, puis fit monter les jambages de support et les extrémités de la passerelle. La principale difficulté était la mise en place de la section centrale (les trois quarts de la longueur du passage), qui pèse 325 tonnes. Les engins de levage, qui tiraient huit câbles à haute résistance, auraient pu élever cette structure en 20 heures, mais l'opération a finalement pris trois jours, les équipements de contrôle ayant été grillés deux fois par la foudre.

La réalisation des coiffes a également posé d'intéressants problèmes techniques. Elles sont si hautes et si difficiles d'accès qu'elles doivent nécessiter peu d'entretien et être facilement inspectables sur leurs faces internes et externes (la rouille est une menace importante dans l'atmosphère humide des tropiques). Le sommet de chaque bâtiment comporte trois parties : au-dessus du dernier étage, un local de forme cylindrique abrite un

dispositif de lavage des fenêtres à double niveau. Au-dessus, une structure conique porte un mât de 63,2 mètres de haut. Ce dernier est entouré par la structure conique sur 14 mètres de haut, et son diamètre varie de 2,6 mètres à 0,6 mètre ; à la moitié de sa hauteur, une boule, formée de 14 tubes de 30 centimètres de diamètre recourbés en anneaux et fixés les uns aux autres, symbolise les 14 États de la Malaisie ; une sphère de 1,9 mètre de diamètre coiffe la pointe du mât.

Le local de lavage des fenêtres et la structure conique ont une armature classique, en acier, sur laquelle des panneaux de façade en acier inoxydable sont fixés. Le mât aussi est en acier inoxydable, ce qui empêche toute corrosion et réduit l'entretien. Une seule couche pour la façade et le support de la structure facilite les inspections à partir d'échelles internes ou de gréements externes. L'utilisation de petits panneaux a facilité le transport et l'assemblage de ces structures : chaque mât a été assemblé à l'intérieur du bâtiment, puis dressé en deux étapes. Cette procédure a minimisé les risques d'accident, ainsi que la hauteur de la grue nécessaire.

6. LES JAMBAGES DE LA PASSERELLE ont été mis en place sur leurs supports à roulements, puis maintenus contre chaque tour. Les extrémités de la passerelle et le centre de celle-ci ont été ensuite successivement élevés (à gauche). Après le soudage des différentes parties, les jambages ont été détachés des tours et fixés à la partie inférieure de la structure (au milieu). Des roulements assurent la mobilité des jambages lorsque les tours bougent sous l'effet du vent (à droite).





J. Apicella, Cesar Pelli & Associates

Querelle de hauteur

Le Conseil des bâtiments élevés et de l'habitat urbain, basé aux États-Unis, a analysé le projet malais avant de décider s'il était le plus haut bâtiment du monde. Le 12 avril 1996, il a décidé que les tours Petronas méritaient cette désignation, en se fondant sur les mesures de distance entre la base et le sommet de la structure. Puis, le 10 juillet 1997, il a donné une nouvelle définition : les tours Petronas ne sont plus que le bâtiment le plus haut du monde « jusqu'au sommet de la structure ». Le plus haut bâtiment jusqu'à l'extrémité de la flèche ou de l'antenne est le One World Trade Center, à New York, tandis que la tour Sears de Chicago détient les records de la hauteur jusqu'au sommet du toit et de la hauteur jusqu'au plus haut étage occupé.

Des silhouettes contre le ciel

À mesure que chaque tour s'élève, elle se rétrécit, en six étapes. Dans les étages supérieurs, les murs sont légèrement inclinés vers le centre, ce qui parachève la forme et renforce la perception de l'axe vertical central.

Les bâtiments ont finalement une forme assez proche de celle qui avait été proposée lors du concours. Une différence... de taille toutefois : les coiffes ajoutées aux tours leur donnent une hauteur de 451,9 mètres, encore jamais atteinte. L'aspect final du sommet est plus typiquement malais ; il ne ressemble ni à celui des gratte-ciel ni aux clochers des églises.

Cesar PELLI dirige le cabinet d'architectes *Cesar Pelli & Associates*, à New Haven. Charles THORNTON dirige le Groupe *Thornton-Tanarelli Engineers LZA*, à New York, dont Leonard JOSEPH est le vice-président.

Hamdan MOHAMAD, Tiam CHOON, Tarique AZAM et Stephen TONG, *The Petronas Towers – The Tallest Building in the World*, in *Habitat and the High-Rise : Tradition and Innovation*, Proceedings of the Fifth World Congress, sous la direction de Lynn S. Beedle, Council on Tall Buildings and Urban Habitat and the Dutch Council on Tall Buildings, 1995.

Cesar PELLI, *Cosmic Pillars : Philosophy of Tall Buildings*, in *Collected Papers of Habitat and the High Rise*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, 1996.