

Un sol à surprises

Kuala Lumpur est dans une région de moyenne montagne, mais la ville elle-même n'a pour tout relief qu'une petite colline. Le site choisi pour la construction des tours, un ancien champ de courses, est plat. Toutefois, les ingénieurs chargés des relevés géotechniques et des structures savaient par expérience que le lit rocheux sous-jacent est irrégulier. Pendant des millions d'années, l'érosion a sculpté dans le socle calcaire des cavernes, des aiguilles, des ravins et des montagnes escarpées. Des sédiments ont recouvert ces reliefs, puis ont durci progressivement. Ce type de sol est nommé Kenny Hill.

Chaque tour pèse 300 000 tonnes : par l'intermédiaire d'une embase de béton, elle exerce sur le sol une pression de 1 140 kilopascals, plus de deux fois supérieure à celle que supporte le sol Kenny Hill. Comme nous

ne pouvions agrandir l'embase, nous avons prévu d'appuyer les piliers porteurs et les murs porteurs du noyau sur des piliers de béton qui auraient traversé le sol jusqu'au lit rocheux.

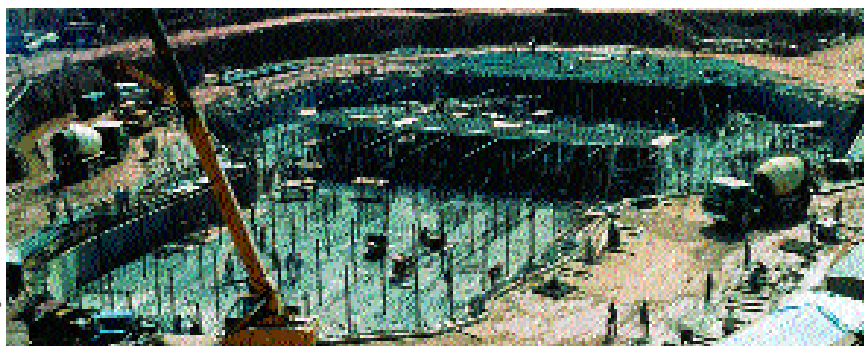
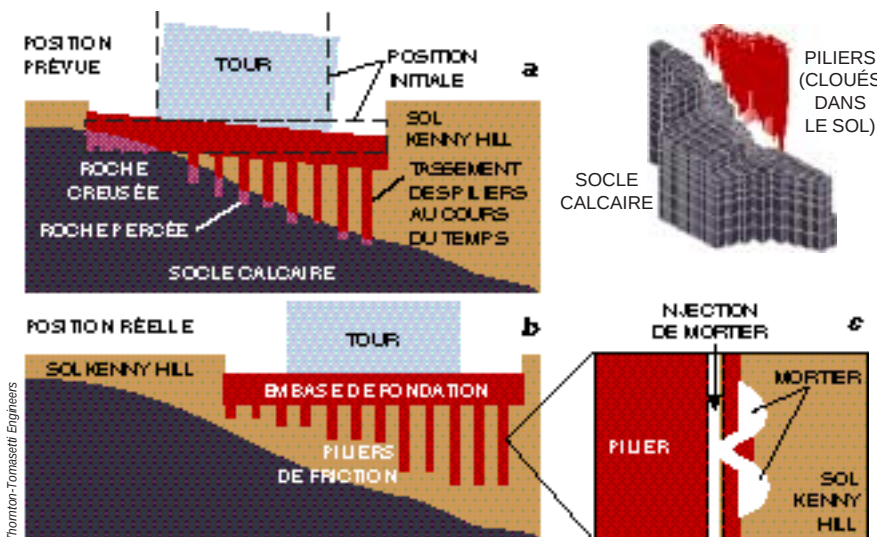
Toutefois, les sondages du terrain révélèrent que le lit rocheux situé sous les deux tours était à une quinzaine de mètres d'un côté, et qu'il s'enfonçait jusqu'à 180 mètres de l'autre côté. Les fondations des tours devaient être enterrées à 21 mètres de profondeur : d'un côté, elles auraient reposé sur le lit rocheux, tandis que, de l'autre côté, nous aurions dû creuser profondément pour enfoncer les piliers jusqu'à la roche. Cette dernière entreprise aurait été lente, risquée et coûteuse. De surcroît, le tassement des piliers, sous le poids des étages et des occupants, aurait été différent pour chacun : les tours auraient risqué de s'incliner. Ces tassements pouvaient être compensés, au prix de nouvelles excavations et d'autres mesures.

Heureusement, le site constructible était assez vaste pour que nous puissions déplacer les fondations de 60 mètres vers le Sud-Est. Ce nouvel emplacement laissait en outre davantage d'espace entre les tours et les rues avoisinantes, ce qui améliorait la circulation et laissait plus de place aux voies de dégagement partant des rues et aux rampes d'accès aux parcs de stationnement.

Sur ce nouveau site, les tours enjambent un ravin comblé par le sol Kenny Hill. Le lit rocheux est à une profondeur comprise entre 80 et plus de 180 mètres. Comme le sol Kenny Hill est meuble, un tout autre système de fondations a été utilisé. Une embase en béton transmet le poids à un ensemble de colonnes d'un diamètre de 1,3 mètre. Ces colonnes, plus étroites que les piliers, répartissent le poids de chaque tour sur le sol plus progressivement que l'embase seule. Nous avons ajusté la longueur des colonnes pour que leurs bases soient toutes à la même distance de la roche et que la stabilité des tours ne soit pas menacée par le tassement du sol.

En pratique, la mise en place des colonnes fut difficile parce que le sol Kenny Hill doit sa solidité à l'imbrication et au compactage des grains sédimentaires qui le composent ; lorsqu'on y creuse un trou, sa compacité diminue, car le poids des matériaux enlevés n'appuie plus. Pour éviter la fragilisation du sol lors du creusement, nous avons décidé d'enfoncer les colonnes à partir de la surface, comme on enfonce des clous dans une planche, sans creuser d'avant-trou.

Chacune des deux fondations est finalement composée de 104 colonnes rectangulaires coulées sur place, d'environ 1,2 sur 2,8 mètres, enfoncées pour certaines jusqu'à 125 mètres. Du béton a été coulé dans des cages formées de barres de renforcement en acier, elles-mêmes enfoncées dans le sol. Le frottement entre les colonnes et le sol a été augmenté par l'injection d'un mélange de sable et de ciment vers l'extérieur des colonnes, par des conduits percés à l'intérieur de celles-ci (voir la figure 3c). Lorsqu'il est sec, ce mortier forme des aspérités. Les colonnes sont sous deux embases en béton (une pour chaque tour) d'une épaisseur de 4,5 mètres. Pour chaque embase, 13 200 mètres cubes de béton ont été coulés : pendant deux jours, le contenu d'un camion de béton a été déversé toutes les 90 secondes.



3. COMME DES CLOUS enfoncés dans le sol, des colonnes empêchent les fondations de basculer. Si ces colonnes avaient été appuyées sur le lit rocheux sous-jacent, le bâtiment aurait risqué de s'incliner (a). Pour l'éviter, les tours ont été construites à une soixantaine de mètres de l'emplacement initialement prévu, et les colonnes reposent dans le sol sédimentaire (b). Le frottement entre les colonnes et le sol a été renforcé par l'injection sous pression d'un mortier sur les parois extérieures des colonnes (c). Un modèle informatique (en haut, à droite) montre l'écart entre les colonnes et le lit rocheux. Les fondations ont été achevées par le coulage d'une embase en béton au-dessus des colonnes (photographie en bas).



La valeur du vide

Comment donner aux tours une silhouette reconnaissable? La tendance contemporaine est la recherche d'asymétries, données soit par des différences de hauteurs, soit par des dispositions en diagonale pour les tours parallélépipédiques. À Kuala Lumpur, la Société *Cesar Pelli* a choisi la symétrie.

Non seulement chaque tour est symétrique, mais leur disposition ajoute à la symétrie, avec un axe de symétrie dans le vide. Nous avons suivi l'enseignement de Lao-Tseu, popularisé par l'architecte américain Frank Lloyd Wright, selon lequel l'existence d'un objet creux s'affirme plus grâce au vide que grâce à ses parois.

La force d'expression visuelle de ce vide a été soulignée par l'ajout d'une passerelle à mi-hauteur : avec la structure qui la soutient, cette passerelle forme un portail de 170 mètres qui ouvre vers l'infini. En cela, les tours Petronas diffèrent de tous les gratte-ciel occidentaux. Cet aspect remarquable des bâtiments n'a pas été inspiré par les traditions malaises mais, comme il s'exprime pour la première fois à Kuala Lumpur, c'est à ce lieu qu'il sera associé pour toujours, comme la tour Eiffel est synonyme de Paris, bien que ni sa structure ni sa forme n'aient été inspirées par l'architecture parisienne ni française.

Des monolithes de béton

Les premiers grands bâtiments faits en pierre, en béton classique : les piliers devaient être 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 considérée comme une résistance : on s'attend à ce que les éléments structuraux en béton plus composites «super-béton» augmentent la résistance du béton, que l'on ne peut pas pomper. Le remplacement d'une partie du béton par des cendres volcaniques et du charbon évite la sursaturation du béton et la réaction chimique avec l'eau avec les parasites, lors de la

On était un matériau pour les colonnes porteuses des tours : les constructeurs l'utilisent couramment. On le transporte en seaux ou des moules faciles en formes com-

plexes. 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).