

Des îles célestes

Comment élever une tour très haute ? Des piliers qui portent la charge totale du bâtiment la transmettent aux fondations. Ils sont reliés, à chaque étage, par des planchers et par des traverses qui laissent libre un vaste espace, aménagé ensuite selon les besoins. Des structures complémentaires assurent le contreventement (la résistance à l'action horizontale du vent) et la stabilité de l'édifice. Ainsi, un mur de refend qui s'élève sur plusieurs étages peut résister aux sollicitations dynamiques du vent ou d'un séisme.

Lorsque la hauteur augmente, l'augmentation de la prise au vent est un problème important. Le doublement de la hauteur d'un bâtiment multiplie par 16 l'amplitude des oscillations sous l'effet du vent, à rigidité égale. Cette dernière doit donc être augmentée fortement pour que les étages supérieurs ne se balancent pas trop.

L'alimentation des étages supérieurs en air conditionné, en eau et en électricité, ainsi que les réseaux de communication et les équipements sanitaires occupent une surface intérieure précieuse. Des pompes puissantes, à la base du bâtiment, doivent monter l'eau vers le sommet. Aux étages inférieurs, les tuyaux d'eau et les conduits de climatisation subissent des pressions élevées : on les réduit en disposant des réservoirs d'eau et des échangeurs de chaleur à intervalles réguliers.

Dans un bâtiment de plus de 30 mètres de haut, les camions à grandes échelles sont inutilisables pour la lutte contre les incendies. On doit installer des extincteurs, des alarmes, des systèmes de détection de fumées et des refuges contre le feu, locaux équipés d'une climatisation autonome.

Enfin, les méthodes de construction habituelles sont inadaptées à la grande hauteur : les grues, les plates-formes de travail et les coffrages (où le béton est coulé et mis en forme) doivent monter en même temps que le bâtiment. L'acheminement des ouvriers, du béton, de l'acier ou de verre au sommet du chantier ralentit celui-ci : le maître d'œuvre doit planifier le projet comme s'il travaillait sur une île isolée dans le ciel.

Malgré ces obstacles, on construit des bâtiments de plus en plus élevés. Avec les bétons à haute résistance, on réalise des éléments structuraux plus compacts et plus légers, qui réduisent les charges. Des aciers plus résistants, en cours de mise au point, seront bientôt utilisés dans les cas où la limitation du poids est primordiale. On appuie aussi les bâtiments sur des bases plus larges pour garantir la stabilité au vent : beaucoup de tours récentes couvrent l'équivalent de plusieurs pâtés de maisons.

La hauteur des bâtiments est aussi limitée par la physiologie des utilisateurs : les changements de pression créés lors des trajets en ascenseur limitent les vitesses de ces derniers. Le coût financier d'un bâtiment élevé est aussi, parfois, limitatif.



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.

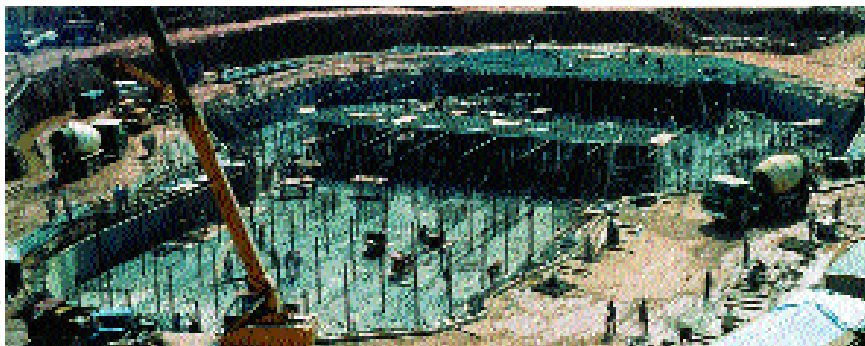
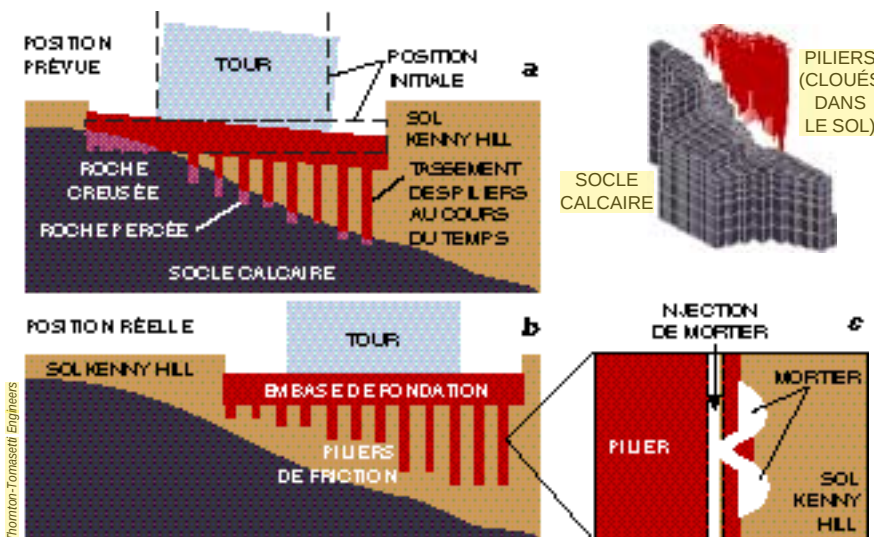
Toutefois, les sondages du terrain révélèrent que le lit rocheux situé sous les deux tours était à une quinzaine de mètres d'un côté, et qu'il s'enfonçait jusqu'à 180 mètres de l'autre côté. Les fondations des tours devaient être enterrées à 21 mètres de profondeur : d'un côté, elles auraient reposé 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).