ter un adjuvant entraîneur d'air, lors du gâchage, afin de stabiliser, dans la pâte de ciment, une myriade de petites bulles qui accueillent l'eau mise en mouvement par le gel.

Le béton de demain

Ces phénomènes, et bien d'autres sont explorés par les centres de recherche, qui continuent inlassablement leur quête de nouveaux bétons plus performants ou mieux adaptés aux circonstances de construction, ou de matériaux qui feront oublier la grisaille de l'après guerre.

Après cette période où la fureur de construire l'a emporté sur la recherche de l'agréable, l'architecture et le génie civil s'efforcent ainsi de faire du beau, en utilisant les possibilités des bétons modernes. Le coffrage devient moule, le matériau devient réplique ; le mot «aspect de parement» est dans toutes les bouches, de l'architecte au concepteur, au producteur ou au constructeur. Là, on utilise du ciment blanc ; là on colore le béton. Les bétons se font jolis, et l'on doit regarder de près pour distinguer l'origine des parements.

Simultanément une mutation technique profonde, fruit d'un siècle de recherche, rend le béton dix fois plus performant qu'avant. Il devient perméable ou imperméable aux agents agressifs les plus courants, il possède des résistances mécaniques inégalées, permet de créer des ponts «dentelle», tel le pont de Normandie, ou des arches à portée jamais atteinte comme celle de la Défense.

Bernard CLAVAUD, François SAUCIER et Laurent BARCELO travaillent au Service béton du Laboratoire central de recherche du Groupe *Lafarge.*

Michel VENUAT, *La pratique des ciments*, éditions du Moniteur, Paris, 1989.

Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, *Les bétons, bases et données pour leur formulation*, éditions Eyrolles, 1996.

Véronique BAROGHEL-BOUNY, Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons, LCPC, Paris, 1994.

Adam NEVILLE, *Properties of Concrete*, Longman Scientific and Technical USA.

Kumar MEHTA, *Concrete, Structure, Properties and Materials*, Prentice Hall, 1986.

Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, *La durabilité des bétons*, Presses de l'ENPC, Paris, 1992.

INRA EDITIONS

UN EDITEUR SCIENTIFIQUE FRANCOPHONE QUI SURFE...

NOUVEAUTÉ 1998
LE CATALOGUE DES EDITIONS INRA EN LIGNE
www.inra.fr/Editions/index.html

VIENT DE PARAITRE

1997, Réf. 01337, **295 F**

L'EAU DANS L'ESPACE RURAL
Production végétale et qualité de l'eau
C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin, A. Neveu, F. Papy, éd.
L'agriculture de demain devra prendre en compte une double préoccupation : valoriser au mieux la ressource en eau et en maintenir la qualité. Cet ouvrage présente les connaissances fondamentales sur les relations eau-plante, la régulation de ces échanges, le fonctionnement du système racinaire, les méthodes génétiques visant à améliorer la tolérance à la sécheresse, les processus physico-chimiques de la diffusion des produits qui peuvent affecter la ressource en eau et le rôle de l'eau dans la chimie de l'atmosphère. Il propose de nouvelles pratiques d'agriculture et d'élevage qui mettent en application l'économie de l'eau et la maîtrise de la pollution.

ASSIMILATION DE L'AZOTE CHEZ LES PLANTES
Aspects physiologique, biochimique et moléculaire
J.F. Morot-Gaudry, éd.
Pour la première fois en langue française, cet ouvrage rassemble les principales connaissances acquises ces vingt dernières années sur l'assimilation de l'azote nitrique, ammoniacal et moléculaire et sur la synthèse des acides aminés et des protéines chez les plantes d'intérêt agronomique. Il signale les conséquences d'un apport excessif d'azote sur le rendement et la qualité des récoltes ainsi que sur la préservation de l'environnement et permet d'envisager de nouvelles stratégies d'amélioration des espèces et de nouveaux itinéraires techniques de culture.

1997, Réf. 01338, **290 F**

POUR COMMANDER

Contactez **votre libraire habituel**
ou **INRA Editions** - Route de St-Cyr 78026 Versailles Cedex - FRANCE
Tél : (33) 01.30.83.34.06 - Fax : (33) 01.30.83.34.49
web : www.inra.fr/Editions/index.html

FRAIS DE PORT
. France-CEE : 30 F pour 1 ou 2 exemplaires et ajouter **8 F** par exemplaire supplémentaire.
Commande inférieure à 60 F : **20 F** Franco de port pour plus de 10 ex.
. Autres pays : le tarif prioritaire sera systématiquement appliqué
(nous consulter : dessauva@versailles.inra.fr).

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE - **INRA Editions** Rte de St-Cyr - 78026 Versailles Cedex
Minitel : 3614 INRA - Fax : 01 30 83 34 49 - web : www.inra.fr/Editions/index.html

Avec l'aimable autorisation de Honshu-Shikoku Bridge Authority

Le plus long pont suspendu

SATOSHI KASHIMA • MAKOTO KITAGAWA

Le pont Akashi-Kaikyo est le plus long pont suspendu jamais construit ; il a pourtant résisté à un séisme, alors même qu'il était encore en construction.

Lorsqu'il sera ouvert, en avril 1998, le pont Akashi-Kaikyo aura une longueur de près de 3 910 mètres. Il reliera l'île de Shikoku au reste du Japon, tout en permettant la circulation des navires dans le détroit d'Akashi, qu'il enjambe. Sa travée centrale aura une portée de 1990 mètres ; ses pylônes s'élèveront à 283 mètres au-dessus du niveau de l'eau, et ses câbles porteurs supporteront des tensions de 120 000 tonnes. Ce pont sera le dernier élément d'un réseau qui reliera les quatre îles principales du Japon : Honshu, Hokkaido, Kyu Shu et Shikoku. La plus petite, Shikoku, compte quatre millions d'habitants ; la mer fermée de Seto la sépare de Honshu, la plus grande des îles.

Vers 1930, Chujiro Haraguchi, qui était alors ingénieur du ministère de l'Intérieur (ultérieurement, il devint maire de Kobe), proposa de relier les deux îles par un pont suspendu. À l'époque, les finances japonaises et les techniques de construction étaient insuffisantes, mais, en 1959, le ministère de l'Équipement et les Chemins de fer japonais reprirent l'idée : une Commission du pont Honshu-Shikoku fut créée en 1970 pour concevoir, construire et entretenir un ensemble de routes et de voies ferrées. Les ingénieurs proposèrent la création de trois tronçons : l'axe Kojima-Sakaide, qui fut terminé en 1988, l'axe Kobe-Naruto, avec le pont Akashi-Kaikyo, et l'axe Onomichi-Imabari.

Des tronçons de ces deux derniers ponts sont aujourd'hui ouverts à la circulation routière. Alors que la construction du pont Akashi-Kaikyo s'achève, entre Honshu et l'île d'Awaji, en direction de Shikoku, plusieurs ponts de la voie Onomichi-Imabari sont encore en travaux. Ils devraient être terminés avant la fin du siècle.

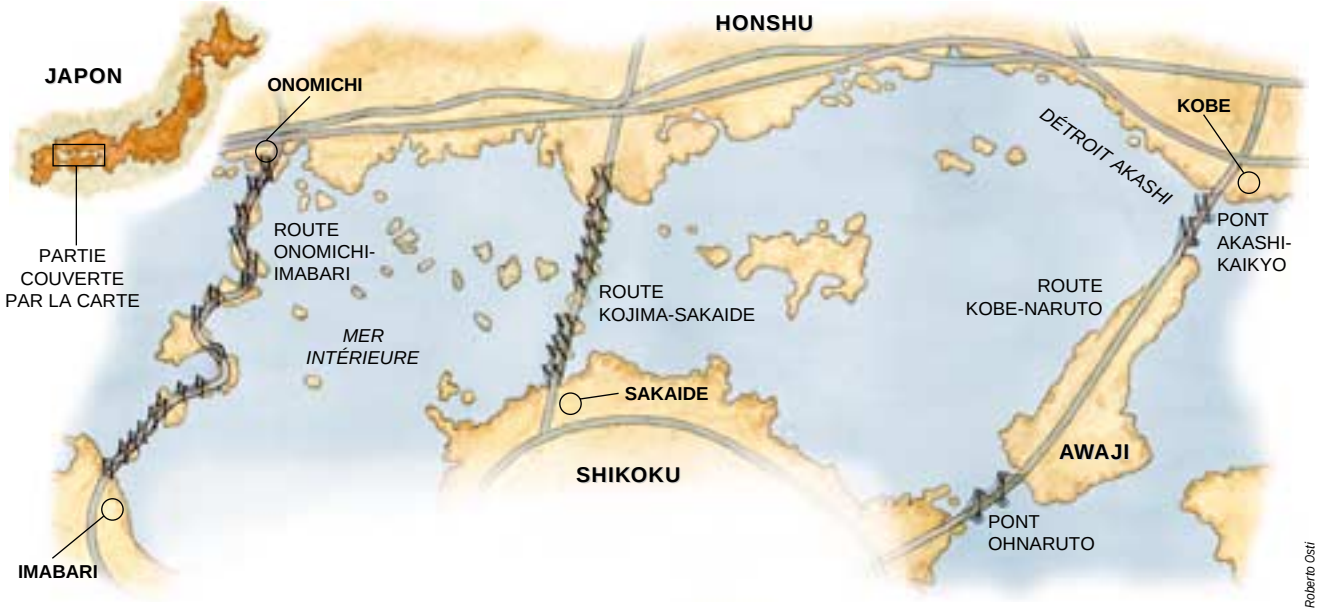
Quand il sera réalisé, le pont Akashi-Kaikyo aura coûté environ 500 milliards de yens (soit 20 milliards de francs).

1. ENTRE DEUX ÎLES japonaises, le pont Akashi-Kaikyo sera le plus long pont suspendu du monde. Sa construction a été difficile, parce qu'il surplombe une voie de navigation de quatre kilomètres de large qui ne doit jamais être obstruée. Pour tendre les câbles porteurs entre les deux pylônes, on a utilisé un hélicoptère qui a tiré un câble de guidage plus léger *(cartouche)*.

Il supportera trois voies de circulation dans chaque sens. Plus de 400 ingénieurs employés par le Comité du pont et un grand nombre d'ingénieurs des secteurs public et privé ont participé à sa modélisation et à sa construction. Sa portée record était une difficulté importante, mais, surtout, même pendant les travaux, le détroit d'Akashi devait rester ouvert au trafic maritime, de sorte que l'équipe technique a dû envisager l'éventualité d'une collision catastrophique entre un bateau et l'un des pylônes. Aussi a-t-on placé les deux pylônes du pont en dehors de la zone navigable, à presque deux kilomètres l'un de l'autre : de ce fait, chaque pylône a été construit sur des graviers sablonneux et sur des roches tendres qui constituent le fond.

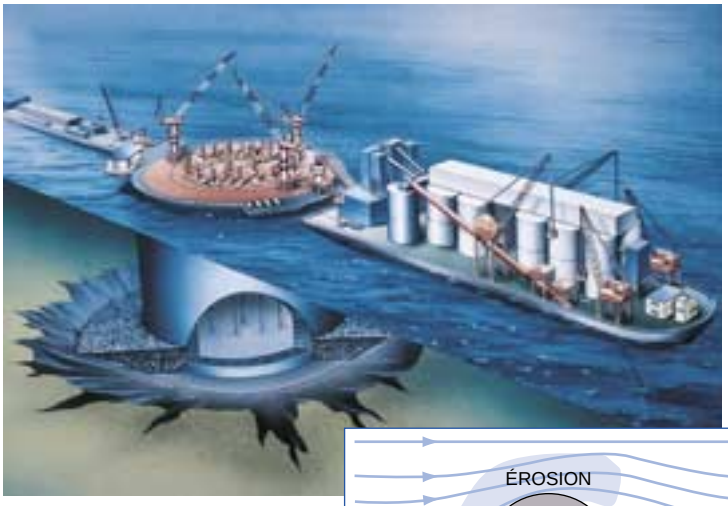
L'île d'Awaji repose sur du granite, une roche dure qui soutient la majorité des longs ponts du monde, mais ce lit de granite s'enfonce rapidement sous le détroit, où il est recouvert par une couche superficielle de vase durcie et de grès. À proximité de l'île de Honshu, le fond est couvert de graviers, recouverts par endroits de sédiments mous et mouvants, si bien que les fondations du pont Akashi-Kaikyo ont dû être posées non sur des roches dures, mais sur des roches sédimentaires et des graviers à demi consolidés.

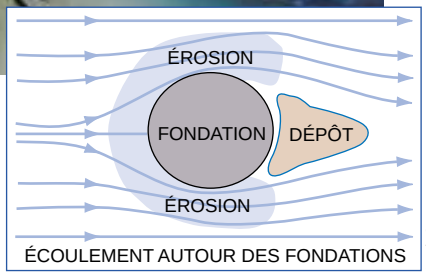
Les ingénieurs ont placé les fondations des deux têtes de pont sur du



2. UN RÉSEAU de routes et de ponts, établi dans les années 1970, relie la petite île de Shikoku à l'île de Honshu. La liaison entre les villes de Kobe et de Naruto s'effectuera par le pont Akashi-Kaikyo (encore inachevé), ainsi que par le pont Ohnaruto, mis en service en 1985. L'axe Kojima-Sakaide a été ouvert en 1988, mais plusieurs grands ponts sont encore en construction sur l'axe Onomichi-Imabari. Toutes ces voies de communication devraient être ouvertes d'ici la fin du siècle.

Avec l'aimable autorisation de Honshu-Shikoku Bridge Authority





3. LES PYLÔNES du pont Akashi-Kaikyo reposent sur des caissons d'acier qui ont été assemblés au sec et remorqués jusqu'à leurs emplacements respectifs *(en bas, à gauche)*. Ces caissons, de 80 mètres de large et de 70 mètres de haut, ont été remplis d'eau et immergés à un emplacement creusé au fond de l'eau. Une barge a ensuite préparé et versé du béton immergé en continu pendant trois jours et trois nuits, afin de remplacer l'eau par du béton et d'ancrer les caissons sur le fond *(à droite)*. Comme les courants océaniques risquaient de raviner le fond autour des caissons et de déplacer ces derniers *(cartouche)*, l'équipe de construction a posé des blocs de roche d'une tonne chacun autour de la base des caissons.

terrain gagné sur l'eau et asséché. Avant de construire les fondations des pylônes, ils ont prélevé des échantillons des couches sous-marines et vérifié que le sol était suffisamment résistant pour supporter un pylône de 25 000 tonnes sans qu'il s'enfonce ni qu'il s'incline. Finalement, un pylône a été ancré dans du grès et l'autre dans des graviers, de sorte que les travées externes du pont mesurent 960 mètres chacune, tandis que la travée centrale atteint 1 990 mètres.

Comme une travée centrale d'une telle longueur donne une prise au vent considérable, les ingénieurs en charge de la conception aérodynamique ont dû construire un modèle réduit du pont, 100 fois plus petit que le pont réel, afin d'étudier son comportement dans une soufflerie. La structure qui a été élaborée d'après ces tests devrait supporter des vents qui souffleraient à plus de 290 kilomètres à l'heure.

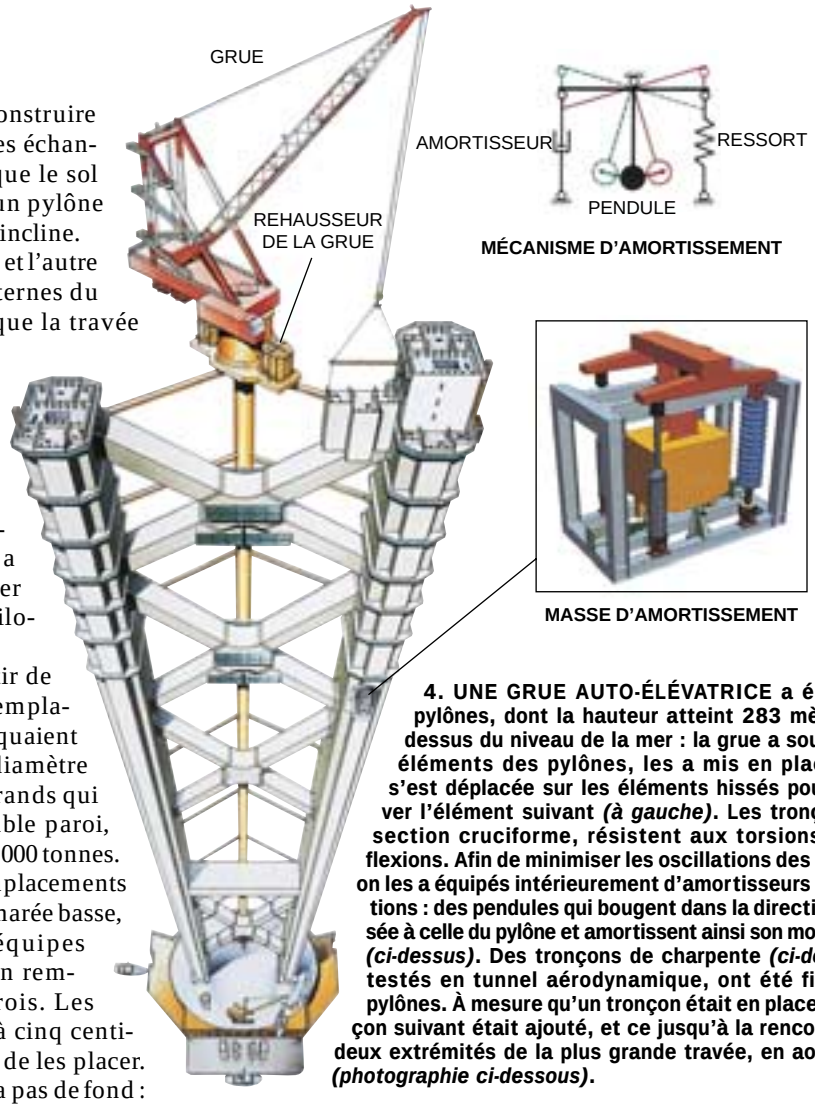
Tandis qu'une drague, manœuvrée à partir de la surface, creusait et aplanissait le fond à l'emplacement des pylônes, les chantiers navals fabriquaient deux caissons cylindriques de 80 mètres de diamètre et de 70 mètres de hauteur : ce sont les plus grands qui aient jamais été construits. Dotés d'une double paroi, ils flottaient, malgré leur masse supérieure à 19 000 tonnes. Douze remorqueurs les ont halés vers leurs emplacements respectifs et, profitant des quelques heures de marée basse, où les courants marins sont ralentis, les équipes techniques ont procédé à leur immersion, en remplissant d'eau l'espace entre les deux parois. Les cylindres ont ainsi été déposés sur le fond à cinq centimètres près de l'endroit où il avait été prévu de les placer.

Le compartiment central de ces caissons n'a pas de fond : il repose directement au fond de l'eau. Ce dernier a été nettoyé, par aspiration. Puis une barge établie en surface a préparé du béton immergé, un béton très fluide qui ne se dissout pas dans l'eau. Pour minimiser les imperfections du béton, ce dernier fut préparé et versé dans le compartiment central du caisson, en continu, pendant trois jours et trois nuits. Puis les ingénieurs ont coulé du béton dans le compartiment externe. Le coulage du béton a duré un an !

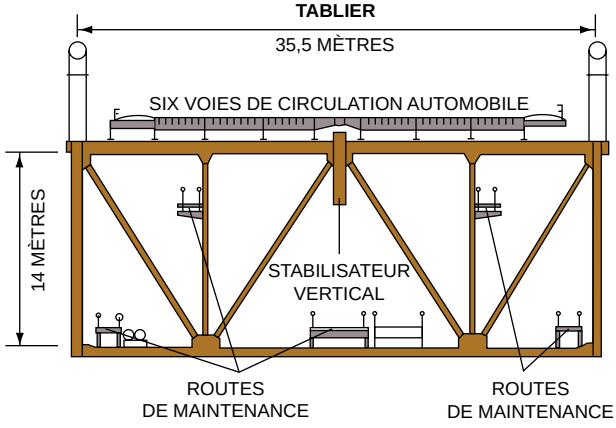
Lors de ce travail, les ingénieurs se sont inquiétés de la stabilité des fondations sous-marines : lorsqu'un courant rapide est dévié par une structure immergée, un remous en fer à cheval arrache le sol et les graviers autour de la structure. Par des tests en laboratoire et par des expériences sur place, les hydrodynamiciens avaient observé que ce ravinement se produirait quand la vitesse du courant serait supérieure à deux mètres par seconde. Après l'immersion des caissons, on disposa juste autour d'eux des filets remplis de graviers. Puis, afin d'assurer une protection durable, des rocs d'une tonne chacun furent placés sur une distance couvrant deux fois le rayon du caisson. Il n'y a aujourd'hui aucun ravinement, excepté sur le pourtour des assises protectrices.

Des pylônes jumeaux

Les pylônes du pont, plus haut de 56 mètres que ceux du Golden Gate de San Francisco, sont flexibles : leur partie supérieure se courbe facilement avec le mouvement des câbles. Intérieurement, chaque pylône est divisé en



4. UNE GRUE AUTO-ÉLÉVATRICE a érigé les pylônes, dont la hauteur atteint 283 mètres au-dessus du niveau de la mer : la grue a soulevé les éléments des pylônes, les a mis en place, puis s'est déplacée sur les éléments hissés pour soulever l'élément suivant *(à gauche)*. Les tronçons, de section cruciforme, résistent aux torsions et aux flexions. Afin de minimiser les oscillations des pylônes, on les a équipés intérieurement d'amortisseurs de vibrations : des pendules qui bougent dans la direction opposée à celle du pylône et amortissent ainsi son mouvement *(ci-dessus)*. Des tronçons de charpente *(ci-dessous)*, testés en tunnel aérodynamique, ont été fixés aux pylônes. À mesure qu'un tronçon était en place, le tronçon suivant était ajouté, et ce jusqu'à la rencontre des deux extrémités de la plus grande travée, en août 1996 *(photographie ci-dessous)*.

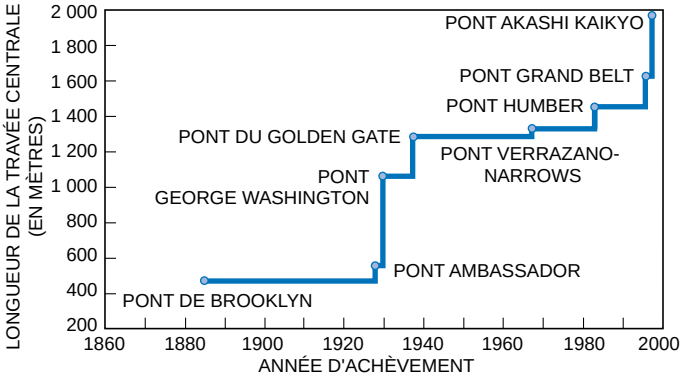


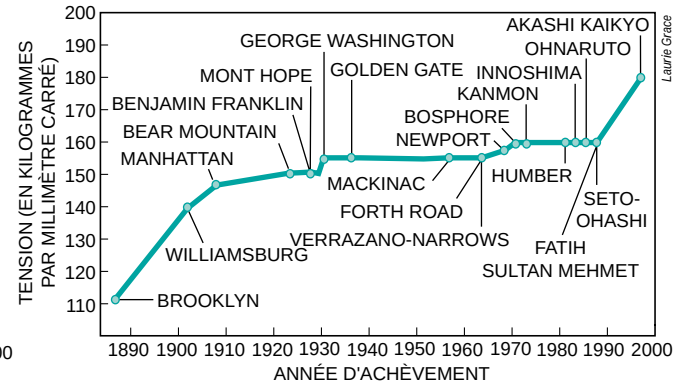
Avec l'aimable autorisation de Honshu-Shikoku Bridge Authority

102 niveaux par des cloisons horizontales, et il renferme un ascenseur en son centre. Un pylône est ainsi comme une tour de 102 étages, avec une superficie de 100 mètres carrés par étage.

Les études en soufflerie avaient montré qu'un vent tourbillonnant autour des extrémités supérieures des pylônes les ferait vibrer parallèlement à la longueur du pont. Aussi les ingénieurs ont adopté une section cruciforme pour chacun d'eux, et ils les ont intérieurement garni de systèmes qui amortissent les vibrations : ces dispositifs comportent des pendules qui oscillent dans une direction opposée à celle du pylône, ce qui amortit son mouvement.

Pour fabriquer les pylônes, on les a subdivisés en 30 blocs d'environ dix mètres de hauteur chacun. Chaque

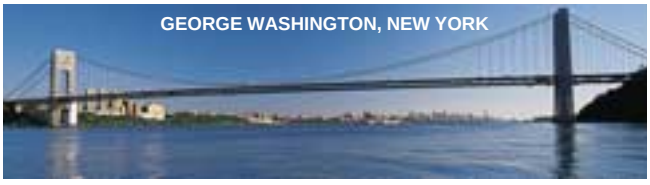




Laurie Grace

K. Yamashita, Panoramic Images

V. Palmisano, Tony Stone Images

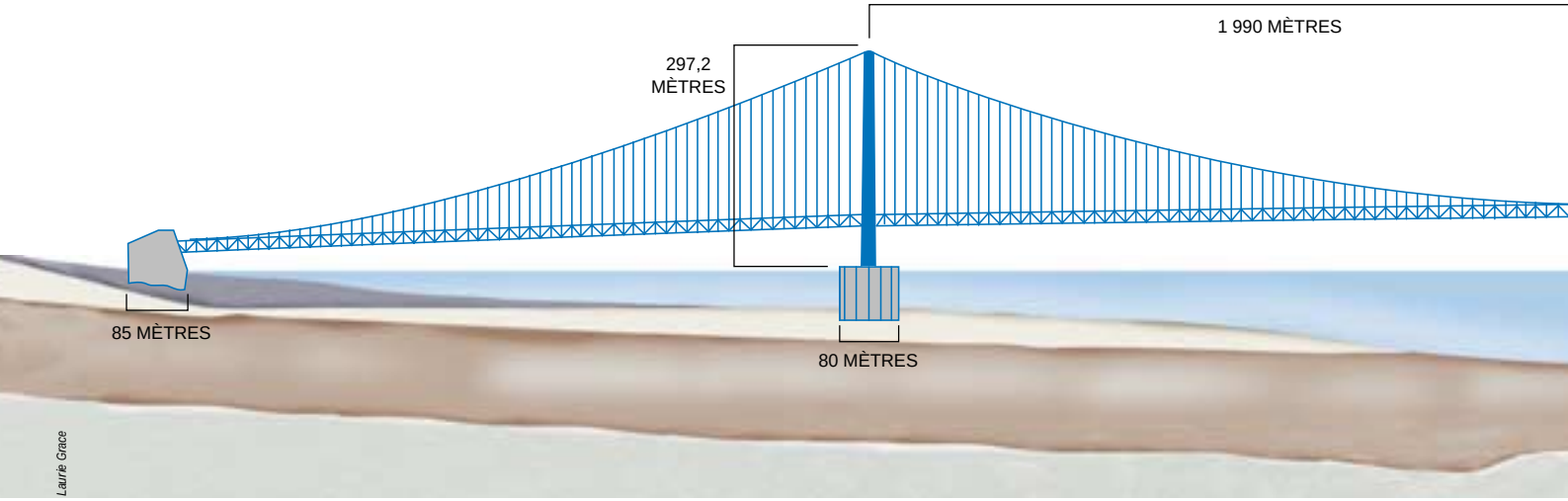


R. Laird, FPG International

D. Brown, Panoramic Images

S. Jauntey, Tony Stone Worldwide

5. LES PONTS SUSPENDUS se sont considérablement allongés, depuis un siècle *(voir les photographies)*. Pour les ingénieurs, la principale difficulté consiste à soutenir le poids considérable de la travée centrale. La force de tension des câbles a augmenté en même temps que la longueur et le poids des travées *(graphiques supérieurs)*. Le pont Akashi-Kaikyo restera le plus long des ponts suspendus jusqu'en 2006, quand sera construit le pont de Messine, entre la Sicile et l'Italie continentale : la travée centrale de ce pont atteindra 3,3 kilomètres.



Laurie Grace

6. COMME LE TRAFIC maritime devait se poursuivre pendant la construction du pont Akashi-Kaikyo, les deux pylônes principaux ont été érigés hors du détroit, sur des roches sédimentaires et une couche de fondation consolidée. En 1995, à la suite du séisme de Kobe, une

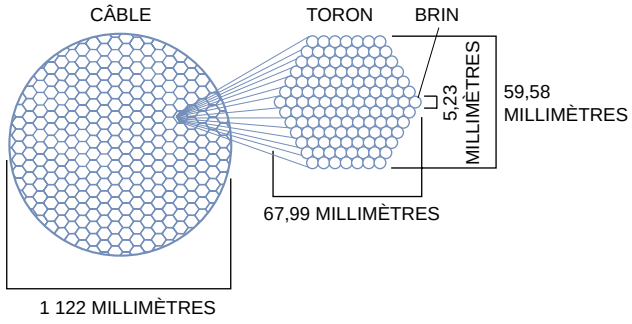
Avec l'aimable autorisation de Honshu-Shikoku Bridge Authority

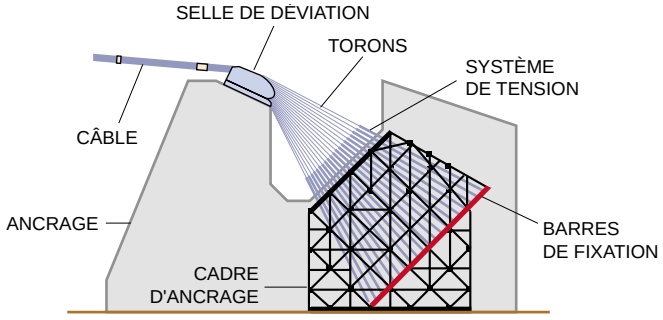
7. DEUX CÂBLES composés chacun de 290 torons, soutiennent le tablier. Chaque toron se compose de 127 brins d'acier résistant *(en haut, à droite)* ; la longueur totale de ces brins correspond à sept fois et demie le tour de la Terre ! Après la mise en place des câbles entre les pylônes, les ouvriers ont réalisé une coursive et mis en place des treuils pour tendre tous les torons au profil voulu. Les câbles ont été fixés aux fondations sur le rivage au moyen d'une charpente conçue pour que chaque toron supporte une proportion équivalente du poids *(en bas, à droite)*.

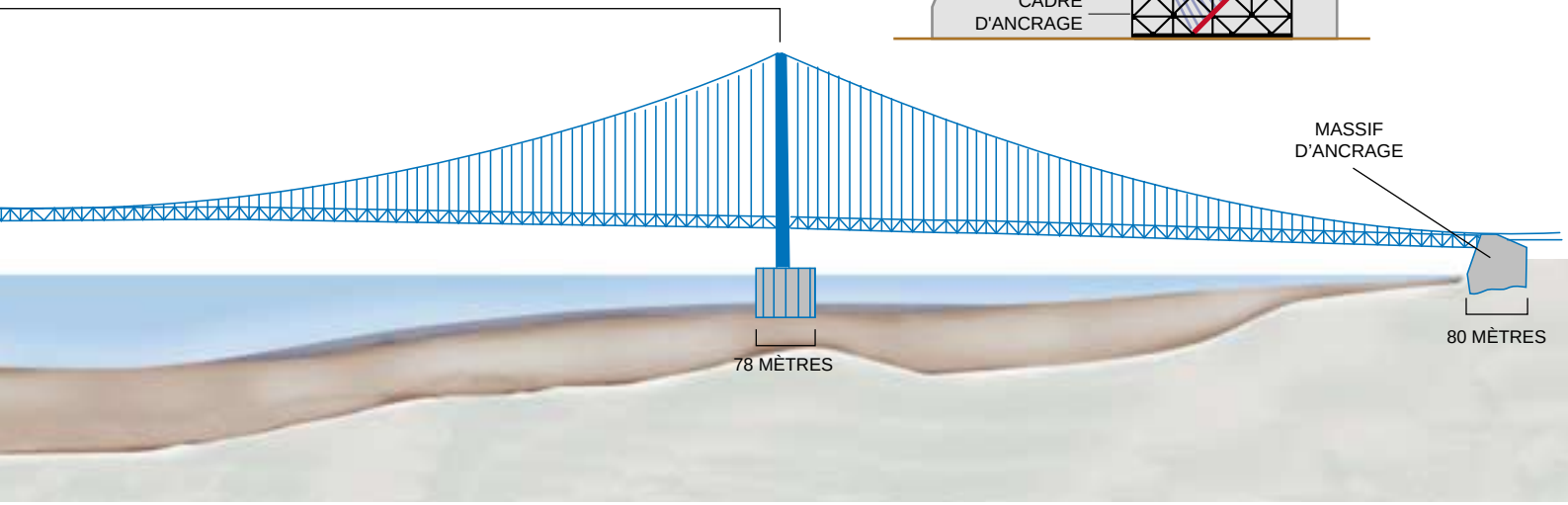
bloc était ensuite divisé en trois parties qui, avec une masse inférieure à 160 tonnes, pouvaient être soulevées par les grues.

Le maître d'œuvre s'est soucié d'obtenir une verticalité quasi parfaite des pylônes : leur extrémité est à moins de six centimètres de l'axe vertical. Pour les disposer aussi précisément, les techniciens ont réalisé en atelier un assemblage temporaire des blocs, puis ils ont meulé et poli leurs faces jusqu'à ce qu'elles soient suffisamment aplanies. Enfin ils ont transporté séparément les blocs vers le site du pont. Une grue auto-élévatrice a alors érigé les pylônes : après avoir posé chaque bloc, la grue se soulevait elle-même jusqu'au niveau suivant, puis hissait un autre bloc, et ainsi de suite. Ce procédé novateur a limité l'emploi d'échafaudages temporaires ; il a réduit la durée et le coût de la construction.

Les câbles qui ont été posés sur les pylônes ont également été conçus spécialement. Des câbles classiques, qui supportent une tension de 160 kilogrammes par millimètre carré, auraient été trop faibles. Après des études de métallurgie, les ingénieurs ont opté pour un alliage d'acier







faille s'est ouverte à 14 kilomètres de profondeur dans le sol, au-dessous du pont. Heureusement, les travées n'avaient pas encore été posées, car elles auraient probablement été endommagées. Le déplacement des fondations du pont allongèrent ce dernier de 1,1 mètre.

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*, 2e 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

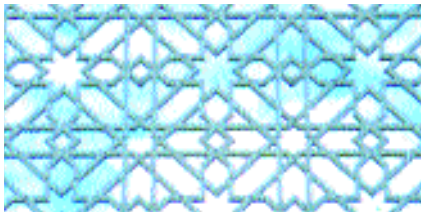
Les tours jumelles Petronas, construites à Kuala Lumpur, en Malaisie, sont un symbole culturel et économique.

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 41e et 42e 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 & Associates

P. Follett, Cesar Pelli & Associates

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

Peter Hyatt

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.

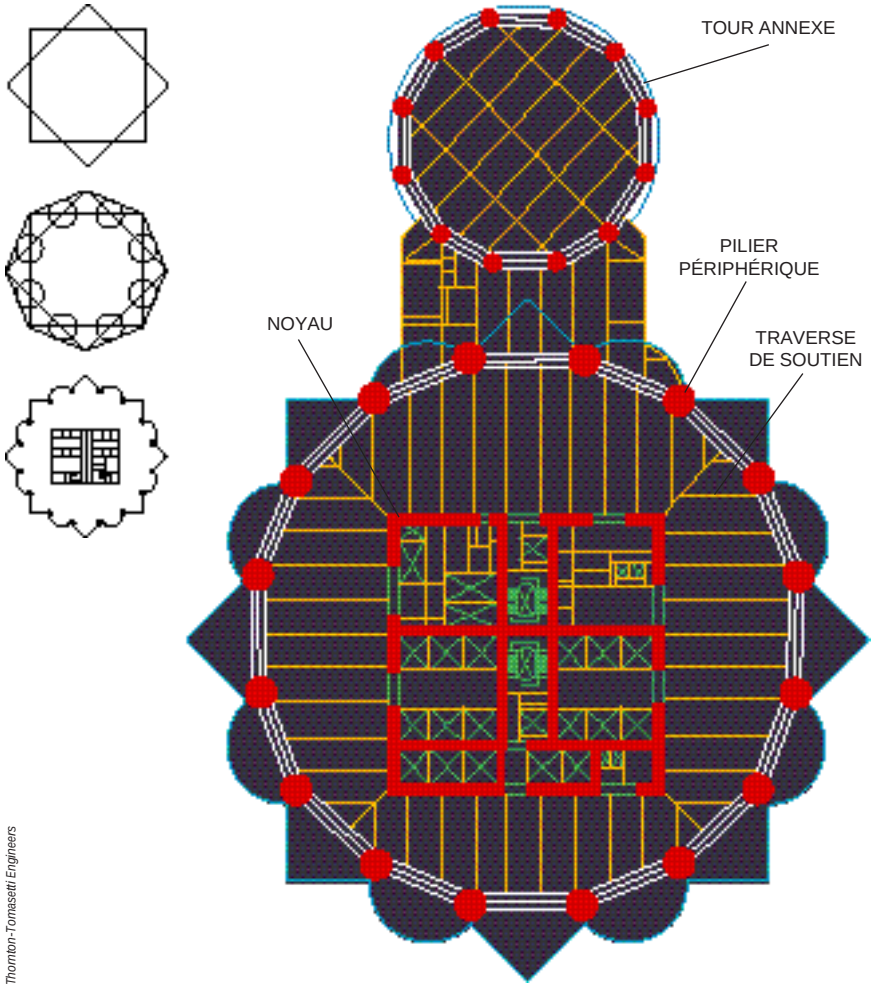
Lors de l'appel d'offres, la Société *Cesar Pelli* avait proposé un élégant contour en forme d'étoile à 12 branches qui permettait un usage fonctionnel de l'espace. Toutefois le Premier ministre malais avait alors laissé entendre que d'autres motifs seraient plus représentatifs de l'art islamique. Après 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.



Thornton-Tomasetti Engineers

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 44e étage des tours.

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 centreventement (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.

Peter Hyatt

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 avions 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.

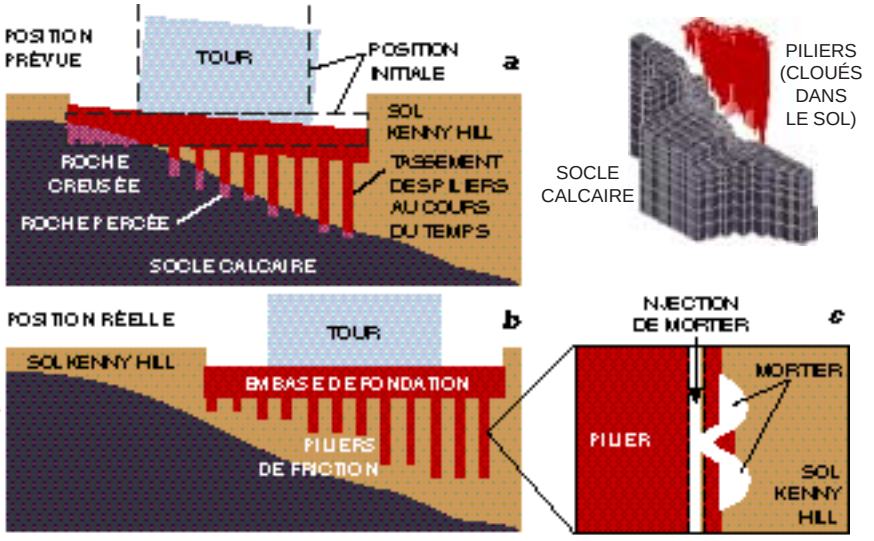
Toutefois, les sondages du terrain révélèrent que le lit rocheux situé sous les deux tours était à une quinzaine de mètres d'un côté, et qu'il s'enfonçait jusqu'à 180 mètres de l'autre côté. Les fondations des tours devaient être enterrées à 21 mètres de profondeur : d'un côté, elles auraient reposé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



Thorton-Tomasetti Engineers

H. Young, Cesar Pelli & Associates

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.

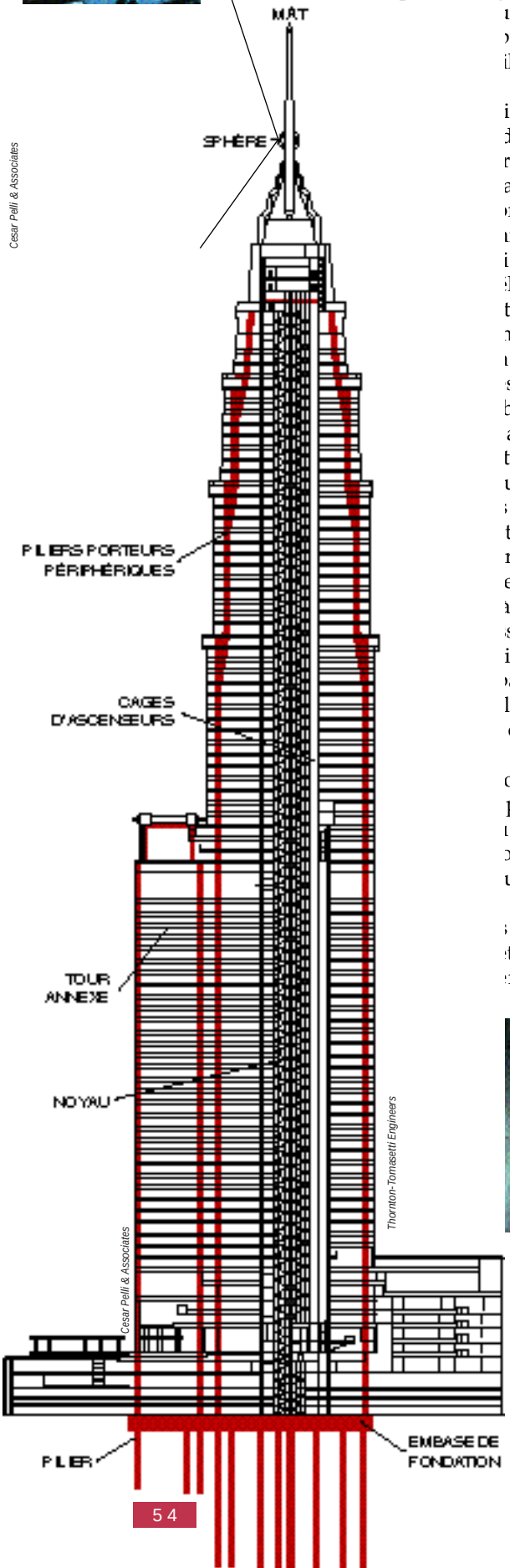
La force d'expression visuelle de ce vide a été soulignée par l'ajout d'une passerelle à mi-hauteur : avec la structure qui la soutient, cette passerelle forme un portail de 170 mètres qui ouvre vers l'infini. En cela, les tours Petronas diffèrent de tous les gratte-ciel occidentaux. Cet aspect remarquable 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.

J. Pickard, Cesar Pelli & Associates

Des monolithes de béton

Les premiers grands bâtiments
uits en pierre, en
béton classique :
iliers devaient être
solides. Les pre-
iel bénéficièrent
de l'acier. Aujour-
redevient intéres-
améliorations qui
rtées. Ainsi, l'ad-
icro silice (pous-
ine produite par
lectronique) et de
tifs au béton clas-
nente considéra-
résistance : on
s éléments struc-
béton plus com-
additifs «super-
ts» augmentent la
u béton, que l'on
pomper. Le rem-
t d'une partie du
r des cendres pro-
e centrales ther-
charbon évite
suration du béton
ion de la chaleur
ar la réaction chi-
l'eau avec les par-
ciment, lors de la

on était un maté-
pour les colonnes
rs porteurs des
nas : les construc-
ux l'utilisent cou-
On le transporte
seaux ou des
t on le moule faci-
n 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 à 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.

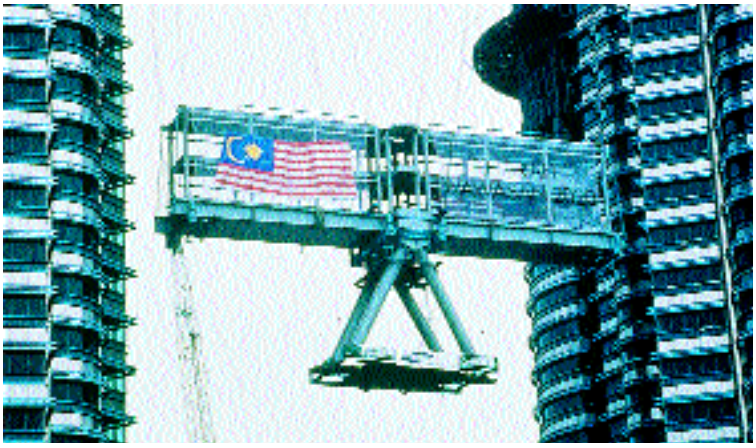
Par chance, à Kuala Lumpur, les conditions naturelles sont favorables aux bâtiments élevés. La ville n'est pas située dans une zone d'activité sismique. Proche de l'Équateur, elle ne subit pas d'ouragans ni de typhons. Les orages tropicaux sont l'occasion de pluies abondantes et de violents coups de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



Thornton-Tomasetti Engineers

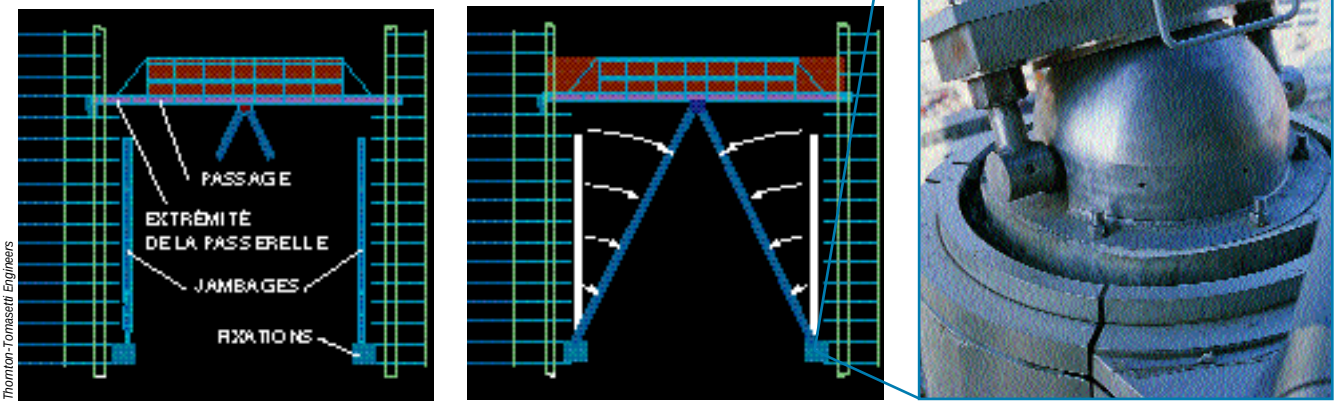
5. LE LEVAGE DE LA PASSERELLE de 325 tonnes a duré trois jours, les équipements de commande ayant été endommagés par la foudre.

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 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.



Thornton-Tomasetti Engineers

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.

Un nouvel accès à la Chine

JOHN KOSOWATZ

En Chine, le plus grand projet de génie civil au monde comprend un aéroport, deux très grands ponts et deux tunnels sous-marins, sous le port Victoria.

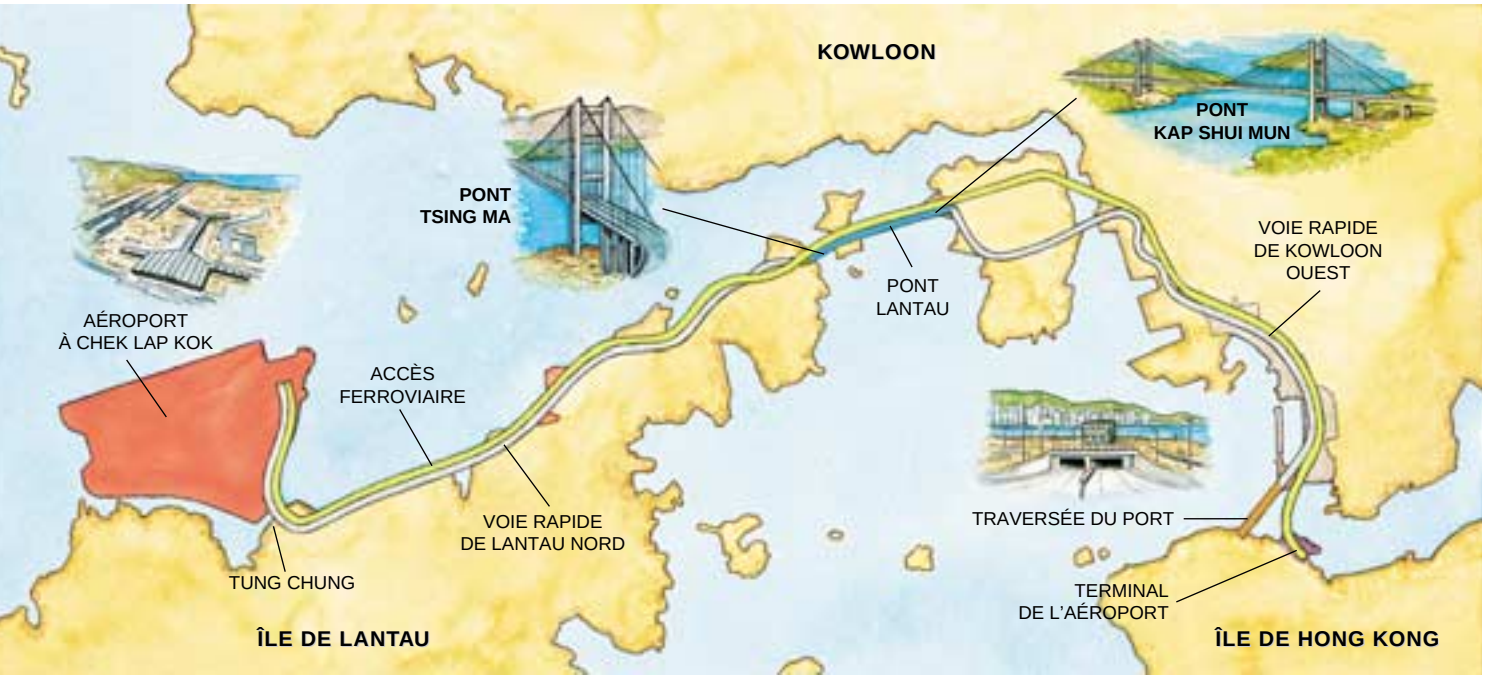
Le rattachement de Hong Kong à la Chine, en juillet 1997, a déclenché les spéculations : comment ce minuscule bastion du capitalisme évoluerait-il, une fois rattaché au dernier grand pays communiste? Les opinions divergeaient, mais tout le monde admettait que Hong Kong deviendrait le principal accès à la Chine : un programme de génie civil ambitieux, qui coûtera plus de 100 milliards de francs, s'achèvera en 1998. À Hong Kong seulement, un tel programme pouvait être entrepris, et achevé en moins de sept ans.

À Chek Lap Kok, au large de l'île de Lantau, 25 kilomètres à l'Ouest du cœur financier de Hong Kong, sera ainsi construit le plus grand aéroport du monde. Plus de 30 kilomètres de routes et de voies ferrées nouvelles, deux grands ponts et deux tunnels sous la baie de Victoria relieront l'aéroport au centre-ville de Hong Kong. La ville nouvelle de Tung Chung, qui sera créée sur l'île de Lantau, abritera plus de 200 000 personnes qui, pour la plupart, travailleront à l'aéroport.

Les plans de cette ville ont été proposés dès la fin des années 1980, quand Hong Kong devenait l'une des principales destinations mondiales des voyages d'affaires. L'aéroport actuel, à Kai Tak, était

Photographies : Andy Ryan

1. HONG KONG, qui appartient à nouveau à la Chine, sera le principal accès à ce pays, grâce au nouvel aéroport de Chek Lap Kok.



Roberto Osti

difficilement extensible, car il se trouve en plein Kowloon, dans une zone si peuplée que les avions doivent déjà faire leurs manœuvres d'approche en piquant directement au-dessus des bâtiments. En 1989, le gouvernement décida la construction du nouvel aéroport, créant le Bureau de coordination du nouvel aéroport (le NAPCO), qui regroupe des représentants de l'aéroport, de la Société des chemins de fer et du Port, et qui dirige la conception et la réalisation du projet.

Le NAPCO réalisa rapidement un cahier des charges. Pour imposer de rapides délais de réalisation à des coûts aussi faibles que possible, il décida d'adjuger des contrats forfaitaires à des sociétés qui présenteraient des solutions ne mettant en œuvre aucune technique nouvelle ; des méthodes qui n'auraient pas été préalablement éprouvées auraient pu ralentir considérablement le chantier, car les problèmes de logistique abondaient. Tout d'abord, les sites choisis pour l'aéroport de Chek Lap Kok et les ponts étaient éloignés et manquaient de voies d'accès. En outre, les sites constructibles situés à proximité de Kowloon et de Hong Kong étaient gênés par la circulation et l'exiguïté du territoire.

Le NAPCO, qui devait également rassembler les fonds nécessaires à la construction, a pâti des difficultés politiques entre la Chine et le Royaume-Uni : pendant longtemps, la Chine n'a pas été convaincue de l'intérêt du projet. Puis, en 1995, les négociateurs se mirent d'accord sur une clause qui débloqua la situation : Hong Kong financerait 75 pour cent des travaux par l'intermédiaire d'un placement sur le projet, en tirant des fonds sur des réserves fiscales à hauteur de 117 milliards de francs et sur des sommes mises de côté pour le commerce extérieur, pour la valeur de 345 milliards de francs ; des emprunts couvriraient le quart restant. Ainsi doté, le NAPCO put rapidement signer des contrats.

La Chine semble impressionnée par les résultats. Au début de 1997, les autorités ont donné leur accord pour la construction d'une deuxième piste de 3 800 mètres et d'une extension du terminal vers le Nord-Ouest. Aujourd'hui, les autorités chinoises ont accordé 3,8 milliards de francs pour financer l'extension Nord-Ouest : c'est la preuve de leur confiance dans cet investissement.

John KOSOWATZ est rédacteur en chef adjoint de la revue *Engineering News-Record*.

Chek Lap Kok

Le site de l'aéroport

Avant la construction du nouvel aéroport, les équipes techniques ont dû créer une zone plane de 1 248 hectares *(photographie de la page ci-contre)* : Chek Lap Kok était trop petit et trop accidenté pour recevoir des pistes assez longues. La Société *Gammon Construction*, la Société japonaise *Nishimatsu* et plusieurs autres furent chargées d'une partie importante des travaux : elles réalisèrent pour sept milliards de francs d'équipement, finissant leur travail en 1995, après seulement 41 mois de travail. Les Sociétés *Gammon* et *Nishimatsu* nivelèrent Chek Lap Kok, dont la superficie était égale à 302 hectares, ainsi qu'une île voisine plus petite, afin de créer un terre-plein à six mètres au-dessus du niveau de la mer ; elles durent gagner du terrain sur l'eau pour obtenir la superficie manquante. Elles déplacèrent ainsi 347 millions de mètres cubes de roches et de terre ; une partie notable de la flotte de dragage mondiale fut employée à ces travaux.

Le plan

Le bureau d'études *Foster Asie*, dirigé par l'architecte anglais Norman Foster, conçut l'énorme terminal de Chek Lap Kok. Le plan initial, élaboré par le gouvernement, comportait une suite de bâtiments en béton, avec des communications entre les bâtiments. Le bureau d'études *Foster Asie* proposa un espace

TUNG CHUNG

plus ouvert et davantage de lumière naturelle. Les dessinateurs jugèrent qu'un bâtiment unique ferait un meilleur effet, et serait plus facile à réaliser dans le peu de temps alloué ; en outre, un bâtiment massif résisterait mieux aux typhons saisonniers de Hong Kong.

Le projet retenu emploie 350 000 mètres cubes de béton, 21 000 tonnes d'acier pour la toiture et 2 400 tonnes d'acier tubulaire pour le soutien des murs et des vitres. Le bâtiment, en forme d'avion *(photographie de gauche)*, a une surface au sol de 516 000 mètres carrés. Les 490 000 mètres carrés de la zone d'échange et des accès aux portes principales s'étendent sur 1,3 kilomètre, tandis que les accès aux portes les plus éloignées se dédoublent comme une queue d'hirondelle. Les 39 portes s'adaptent aux gros avions civils.

Le terminal s'élève sur huit niveaux. Le premier, qui abrite un trottoir roulant, comporte un souterrain de un kilomètre de long, réalisé par les Sociétés *Gammon* et *Nishimatsu*. Au second niveau, un hall à bagages, de 320 mètres sur 160, est fermé au public. Les six autres niveaux abritent un centre commercial, les salles de départ et d'arrivée, des promenoirs et des zones de contrôle de billets. Ces niveaux possèdent peu de cloisons intérieures, ce qui permet aux visiteurs d'avoir une vue dégagée sur tout le terminal. Tout autour des 4,4 kilomètres de périmètre du terminal, des murs de verre donnent sur les pistes.

Le toit

Martin Manning, de la Société *Ove Arup et Associés*, a dirigé l'équipe chargée du toit, où creux et arrondis se succèdent sur toute la longueur de l'édifice. Ce profil ondulé est créé par un grillage en acier léger, recouvert d'une toile. Les traverses du grillage forment une suite d'arceaux semi-circulaires, un peu comme les arcs-boutants de certaines églises médiévales. Des lucarnes s'ajustent dans chacun des 129 modules du toit, qui mesurent généralement 36 mètres sur 36 et pèsent 120 tonnes. Ils sont soutenus par des piliers et reliés aux meneaux des murs extérieurs (les barres verticales séparant des éléments de fenêtres dans une paroi vitrée). Pour ces dernières fixations, les ingénieurs ont prévu des joints en acier qui permettront aux murs et au toit de bouger horizontalement et verticalement l'un par rapport à l'autre, en cas de vents violents.

La construction

Le contrat de 6,3 milliards de francs, prévu pour la réalisation du projet *Foster Asie*, fut attribué à un consortium de cinq sociétés britanniques, chinoises et japonaises : la *Société chinoise de construction*, la Société *Kumagai Gumi,* la Société *Maeda*, la Société internationale de construction *Amec* et la Société *Balfour Beatty*. L'ouvrage fut terminé à l'automne 1997, avec un peu de retard dû aux fortes pluies de 1994 et aux conditions de sols difficiles à Chek Lap Kok. Quand les travaux de construction du terminal battaient leur plein, la *Société chinoise de construction* employait simultanément plus de 1 600 ouvriers.

PONT DE TSING MA

Le pont de Tsing Ma

Un pont suspendu

Le pont de Tsing Ma relie l'île de Lantau au continent par-dessus un détroit très fréquenté par les navires : il mène au delta de la rivière des perles. Avec une longueur de 2,17 kilomètres, ce pont suspendu à deux niveaux a été le plus long pont suspendu jamais construit, portant à la fois des voies ferroviaires et des voies routières. Les Sociétés *Trafalgar House, Costain Civil Engineering* et *Mitsui* avaient signé un contrat de 5,4 milliards de francs pour la construction du pont, en 1992. Les travaux se sont achevés en 1996.

Le tablier

La construction d'un tel pont en seulement quatre ans est étonnamment rapide. L'ouvrage devrait résister à des vents de plus de 300 kilomètres à l'heure : non seulement la Chine du Sud est fréquemment balayée par les typhons, mais le pont de Tsing Ma surplombe une passe étroite où le vent s'engouffre. Cinquante et un voussoirs à profil

PONT DE KAP SHUI MUN

PYLÔNE DU PONT DE TSING MA

aérodynamique et à double plancher ont été assemblés. Dans chacun des voussoirs, des orifices canalisent les vents violents et renforcent la stabilité.

Les éléments des travées en acier ont été fabriqués par des industriels japonais et britanniques qui les ont expédiés par bateaux jusqu'en Chine, juste avant le début des travaux. Des barges ont transporté les voussoirs assemblés, qui pesaient 1 000 tonnes ; une grue à portique les hissait alors à marée basse. Ces voussoirs ont généralement 40 mètres de large, 36 mètres de long et 7,3 mètres de haut ; ils portent six voies de circulation automobile au niveau supérieur, deux voies ferrées et deux voies de secours au niveau inférieur.

Les pylônes

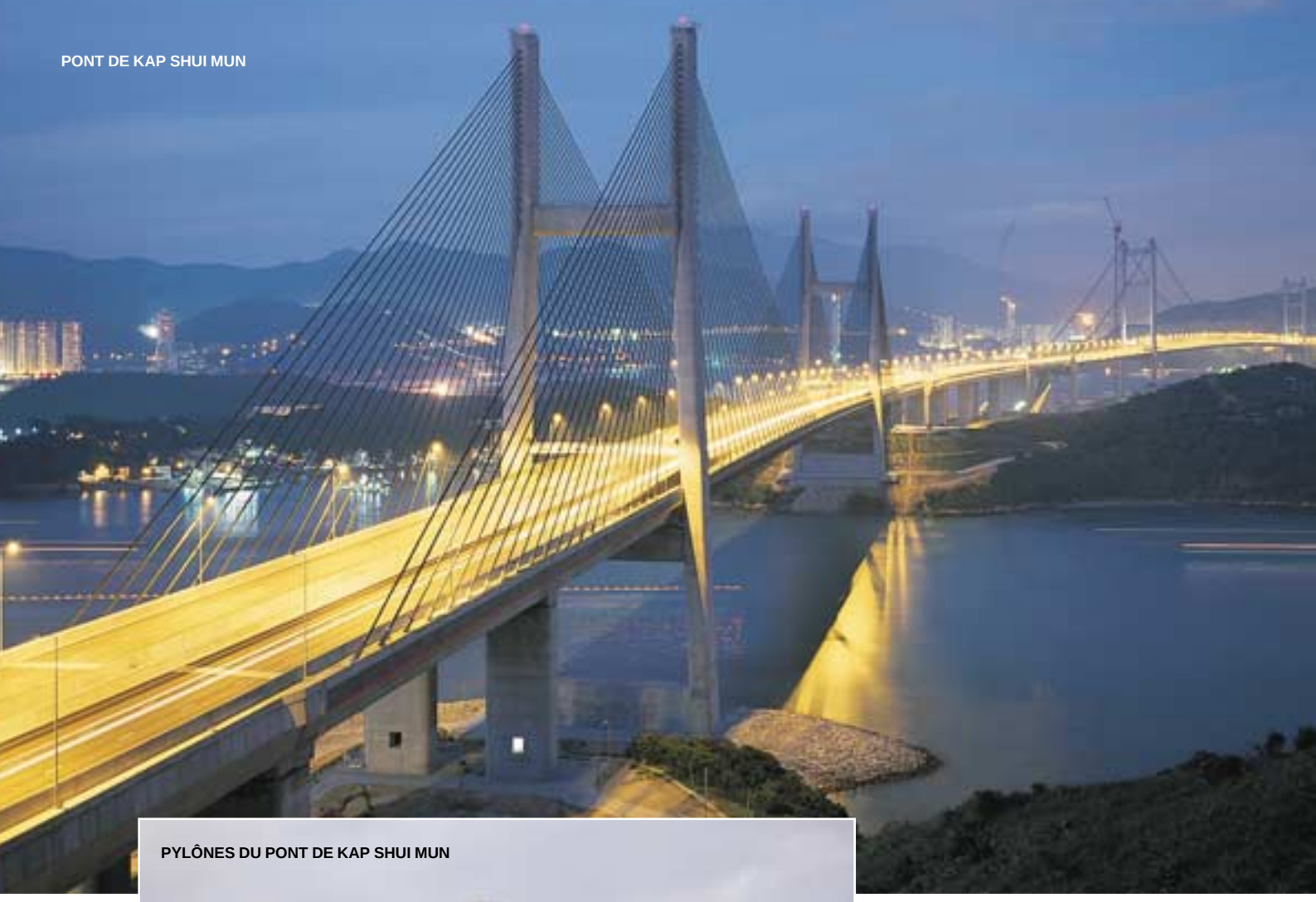
Deux pylônes en béton armé, d'une hauteur de 206 mètres chacun, soutiennent la travée principale du pont de Tsing Ma. La Société *Mitsui/Costain* les érigea en utilisant un cintre mobile, que l'on déplaçait à mesure que l'on coulait le béton. Les entreprises terminèrent ce travail en trois mois à peine. Le pylône situé à l'Est repose sur un substrat rocheux de l'île Tsing Yi. À l'extrémité Ouest, une fondation du pylône de Ma Wan est ancrée dans le substrat rocheux au-dessous du détroit. Une île artificielle a été construite autour de cette fondation, afin de protéger le pylône des accidents de navigation.

Les câbles

Le pont est soutenu par des câbles de 1,1 mètre de diamètre. Des soldats de l'armée britannique ont travaillé en l'air sur de légères passerelles de bois pour assembler les 27 500 tonnes de fil d'acier galvanisé qui composent ces câbles. Cette méthode, dite «tissage aérien», fut choisie pour son coût et son efficacité, prouvée lors de précédents chantiers.

Elle présente des dangers, mais des câbles de cette dimension auraient été trop encombrants pour être réalisés en atelier. Une fois assemblés, les câbles ont été passés sur des selles d'acier fixées au sommet des pylônes et tendus par des masses d'ancrage à chaque extrémité. Les câbles de suspension, espacés de dix mètres, descendent des deux câbles principaux et soutiennent la travée principale du pont (1 377 mètres) ainsi que la travée Ouest, de 359 mètres de long. La travée Est, légèrement plus courte, repose sur des piliers de béton.

PONT DE KAP SHUI MUN



PYLÔNES DU PONT DE KAP SHUI MUN

Le pont de Kap Shui Mun

Les pylônes

Le pont de Kap Shui Mun prolonge le pont de Tsing Ma. Sa travée principale a une portée de 430 mètres. Il s'étend sur une longueur totale de 750 mètres et possède l'un des plus lourds tabliers du monde pour sa longueur.

Il a été construit par la Société *Kumagai Gumi*, la Société *Maeda*, la Société de construction *Yokogawa* et la Société japonaise *Hitachi Zosen*. L'ouvrage repose essentiellement sur deux pylônes en forme de H, d'une hauteur de 145 mètres chacun.

La travée

Le tablier du pont est composé de deux types de structures. Les voussoirs du centre de la travée principale sont des doubles caissons, composés d'un mélange d'acier et de béton : le béton des niveaux inférieur et supérieur est coulé sur des cadres d'acier pré-

fabriqués dans l'île de Lantau, acheminés par bateaux, puis hissés et mis en place.

En revanche, les travées latérales et le reste de la travée centrale sont constitués de poutres de métal (quatre plaques soudées formant une boîte) qui ont été renforcées par du béton et qui ont été progressivement poussées à partir de chacune des culées vers les pylônes.

La largeur du pont étant de 35,2 mètres, les ouvriers ont dû placer deux poutres à la fois, côte à côte, pour assembler la travée ; ils ont utilisé du béton pour assembler chaque paire, au niveau inférieur, et des traverses pour relier les dalles du dessus.

Les rampes qui ont servi à mettre en place les voussoirs ont été incorporées à l'ouvrage. Elles servent d'éléments de transition entre la partie médiane, composée d'éléments d'acier et de structures en béton, et les voussoirs latéraux, en béton seulement.

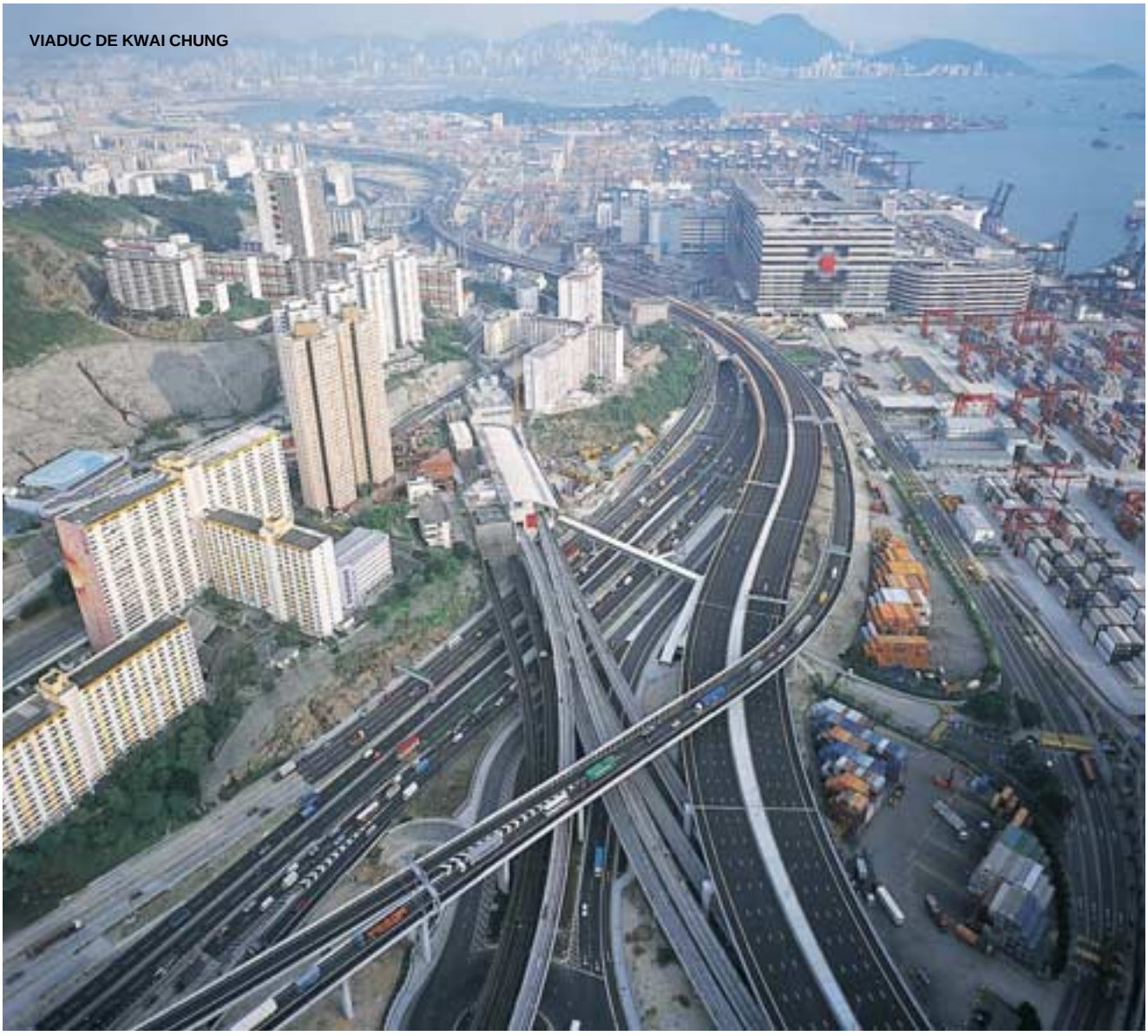
Le viaduc de Ma Wan

À proximité, le viaduc de Ma Wan *(non représenté)* a 504 mètres de long. Il a été construit par réalisation, sur place, de voussoirs de béton, étayés par des palées provisoires. Six travées, de 84 mètres de long chacune, ont été préparées en quatre segments de 21 mètres de long. Ces voussoirs de béton ont ensuite été mis en compression par des câbles tendus : ainsi le béton ne risque pas de travailler en extension, et les risques de fissuration sont réduits.

Le viaduc de Kwai Chung

La construction du viaduc de Kwai Chung a présenté de nombreuses difficultés, car ce pont routier devait supporter le trafic routier et le trafic ferroviaire sur trois kilomètres, dans un site déjà occupé : de nombreuses structures différentes ont dû être utilisées.

La route principale court au-dessus de poutres de béton préfabriquées, en forme de U. Pour renforcer le béton, on l'a comprimé par des câbles tendus ou par des barres, avant la pose. Puis les hourdis en béton ont été coulés sur place. Les équipes ont construit les tronçons ferroviaires à partir de segments de béton préfabriqués et mis en post-tension. Ces sections ferroviaires courent entre des piliers, qui reposent sur de longs poteaux massifs, enfoncés dans le sol et sur des traverses de portique. Une grande partie de ce viaduc est bâtie sur un remblai, ce qui est très courant à Hong Kong. Des entreprises françaises ont dû creuser jusqu'à 40 mètres de profondeur pour trouver un terrain stable où ancrer les piliers. En plusieurs endroits, on a construit le viaduc au-dessus de 15 voies routières, que l'on ne pouvait pas interrompre.



VIADUC DE KWAI CHUNG

Le tunnel de l'Ouest du port

Les Sociétés *Nishimatsu* et *Kumagai Gumi* ont construit le dernier tronçon, un tunnel de deux kilomètres de long, entre le port Victoria et le centre de Hong Kong. De chaque côté du port, les abords du tunnel ont été construits sur du terrain pris sur l'eau. Du côté de Hong Kong, le chantier fut difficile en raison de la présence de vase : il fallut mettre en place des murs de filtrage – pour isoler la vase et stabiliser le sol sous les fondations – jusqu'à 40 mètres de profondeur. Du côté de Kowloon, le travail fut plus facile : les abords furent assurés à l'aide de dalles de béton armé, coulées sur place.

De l'autre côté de l'île de Hong Kong, un chantier à ciel ouvert, en bordure de mer, coulait les voussoirs du tunnel proprement dit. Après l'assemblage des voussoirs, le chantier fut inondé, et les voussoirs furent remorqués par bateau jusqu'au site. Les tronçons du tunnel ferroviaire furent construits au même endroit. Une fois les voussoirs descendus dans la tranchée, on a étanchéifié le tunnel et pompé l'eau qui s'y trouvait.

ENTRÉE DU TUNNEL

TRAVERSÉE DU PORT

L'aérogare

L'aérogare a été construite sur un terrain de six hectares, devant la place des échanges, où se trouve la Bourse de Hong Kong. Elle comprend une gare souterraine à cinq niveaux, de nombreux tunnels ferroviaires et un bâtiment dont le toit d'acier s'étend sur 25 mètres. Une allée piétonnière souterraine relie le terminus à la gare centrale préexistante.

Le tunnel, d'une longueur de 300 mètres, serpente sous la Bourse : l'équipe de la Société japonaise *Aoki* a dû percer entre les fondations de la Bourse sans couper les réseaux de fibres optiques ni les autres lignes de communications. Aucun aménagement ne devait pouvoir causer un affaissement du bâtiment. Le tunnel passe également sous la rue Connaught, l'une des artères les plus animées de Hong Kong. Malgré ces difficultés, il est prévu que la liaison ferroviaire ouvrira en juin 1998, deux mois après la mise en service de l'aéroport de Chek Lap Kok.

RUE CONNAUGHT

NAVETTE DE L'AÉROPORT

Le chantier de l'aéroport de Chek Lap Kok est présenté sur le site Internet, à l'adresse http://www.hkairport.com

Les gratte-ciel sont-ils encore nécessaires ?

WILLIAM MITCHELL

Les tours et les gratte-ciel étaient adaptés à l'organisation du travail du XX^e siècle. À l'époque des réseaux de communication numériques, ils semblent obsolètes. Reste leur fonction symbolique.

Les peuples de l'Antiquité ont construit des ouvrages étonnamment hauts, en se servant de la résistance à l'écrasement de la pierre et de la brique, mais ces monuments étaient compacts : avec ses 146 mètres de haut, la pyramide de Chéops affirme le pouvoir du pharaon, mais sa surface utile est très faible par rapport à la surface brute ; avec une base carrée de 230 mètres de côté, cette pyramide renferme une chambre royale de seulement cinq mètres de diagonale. Pis encore, le minaret hélicoïdal de la grande mosquée de Samarra, en Iraq (52 mètres de haut), est totalement massif, sans espace intérieur. Les flèches de la cathédrale de Chartres, qui culminent à 107 mètres, ne renferment que d'étroits espaces vides et des escaliers étriqués, malgré leur structure perfectionnée.

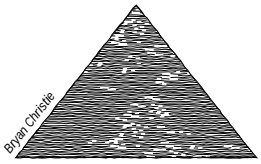
La révolution industrielle a permis la construction de grandes tours creuses, utilisables par de nombreux occupants : les architectes du XIX^e siècle découvrirent qu'en utilisant des cadres en acier et en béton armé et des cloisons légères, ils augmentaient la proportion de surface utile. À l'aide d'ascenseurs, ils accélérèrent la circulation verticale, et ils intégrèrent des systèmes mécaniques pour chauffer, ventiler ou refroidir des volumes internes de plus en plus spacieux. Vers les années 1870 et 1880, les architectes et les ingénieurs visionnaires de New York et de Chicago inventèrent ainsi les gratte-ciel modernes : l'Equitable Building, le Western Union Building et le Tribune Building, à New York, et le gigantesque Montauk Building, à Chicago.

Ces inventions architecturales répondaient à un besoin du capitalisme, parce que l'installation en un même lieu d'armées d'employés de bureau permettait de les faire travailler ensemble, utiliser les mêmes fichiers et les mêmes outils de travail et facilitait leur contrôle par la hiérarchie. Ces bâtiments élevés correspondaient aussi à une nouvelle conception de la ville, qui devenait un lieu d'échanges, avec un quartier d'affaires central, très dense, entouré d'une banlieue dortoir très étalée, ces deux zones communiquant par des liaisons radiales. Cette centralisation a fait augmenter la valeur immobilière du centre-ville : il devenait intéressant financièrement de construire la plus grande surface utile possible sur un terrain de superficie donnée.

Des contraintes techniques ont toutefois limité cette extension verticale des gratte-ciel : le poids des étages et la prise au vent, le transport des personnes, de l'eau et des équipements. Plus on monte, plus il faut de structures de soutien au sol, d'ascenseurs et de gaines de service. À partir d'une certaine hauteur, le surcoût des étages supplémentaires n'est plus compensé par le gain de surface, de plus en plus faible.

La planification urbaine limite aussi la hauteur des bâtiments : les grandes tours projettent de grandes ombres, masquent le ciel et sont parfois à l'origine de rafales de vent, dangereuses et désagréables au sol. Elles concentrent la circulation des piétons et des automobiles, engorgeant les artères environnantes, de sorte que les aménageurs imposent des limites de hauteur, de rapport entre la surface habitable et la surface au sol ou, plus subtilement, appliquent des formules qui réglementent la hauteur et le volume autorisés en fonction des dimensions des rues (d'où les formes en retrait et fuselées caractéristiques des gratte-ciel de Manhattan).

En raison de ces limitations, les bâtiments exceptionnelle-



Grande pyramide de Chéops
Vers 2600 avant J.-C.
146 mètres
Égypte

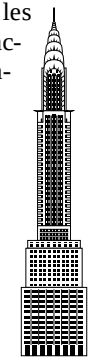
Minaret de Samarra
IX^e siècle
52 mètres
Iraq

Cathédrale de Chartres
XIII^e siècle
107 mètres
France

Equitable Building
1870
43 mètres
New York

Western Union Building
1875
70 mètres
New York

Tribune Building
1875
79 mètres
New York



Chrysler Building
1930
319 mètres
New York

ment grands sont coûteux, rares et remarqués : des sociétés font ainsi parler d'elles et acquièrent du prestige par la construction des plus hauts gratte-ciel d'une ville, d'une nation ou du monde. La publicité assurée par de telles constructions est alors plus importante que leur utilité pratique.

À partir des années 1920, le bâtiment Chrysler (319 mètres) et l'Empire State Building (381 mètres) ont rivalisé de hauteur : des antennes de radio et même un mât d'amarrage pour les dirigeables ont été ajoutés pour gagner les quelques derniers mètres. La compétition a repris dans les années 1960 et 1970 entre les tours jumelles du World Trade Center (417 mètres), à New York, la tour John Hancock (344 mètres), à Chicago, et la gigantesque tour Sears (443 mètres), aussi à Chicago. Plus récemment, à Kuala Lumpur, les tours jumelles Petronas (452 mètres), reliées par une passerelle aérienne, ont ravi le titre d'édifice le plus haut du monde.

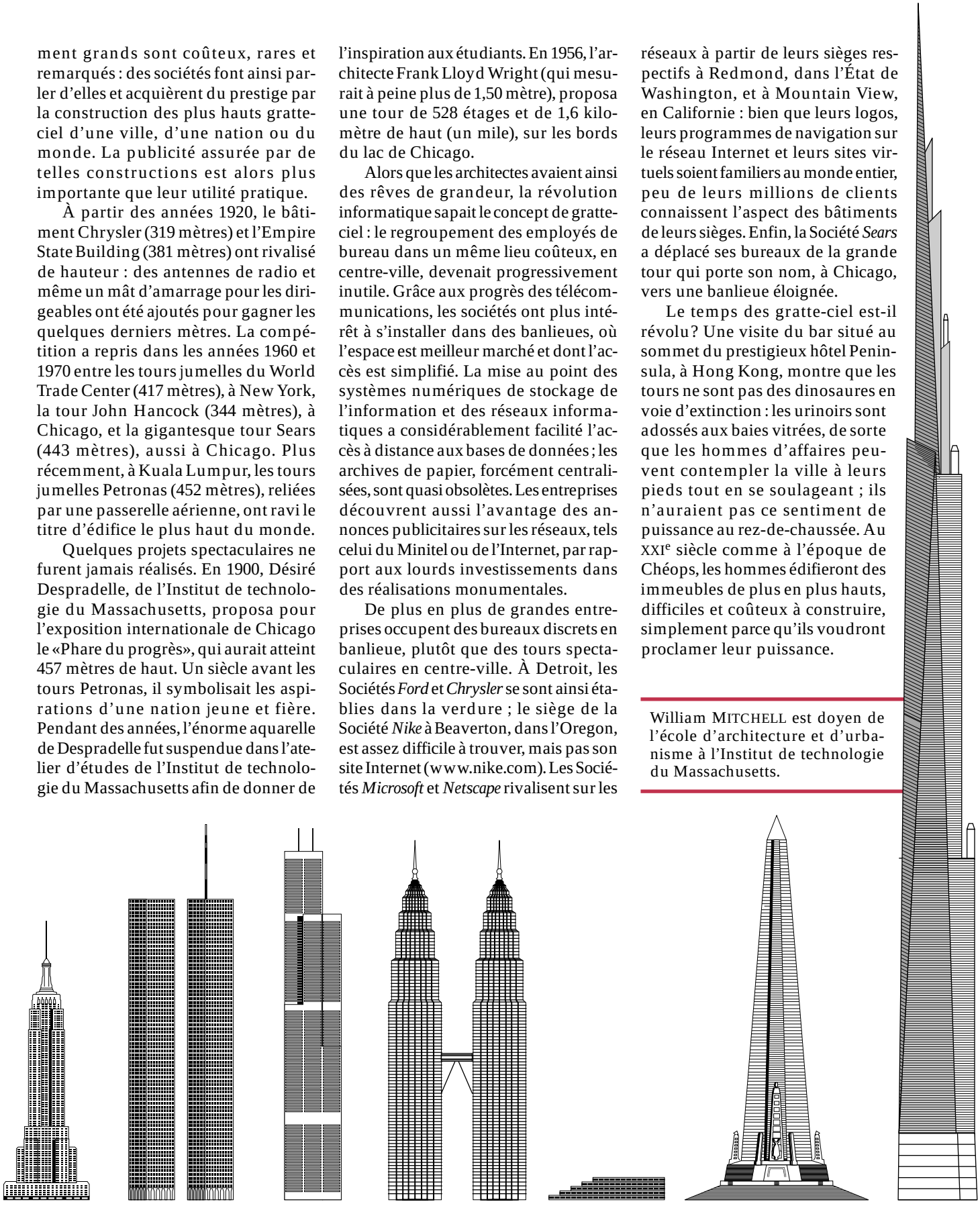
Quelques projets spectaculaires ne furent jamais réalisés. En 1900, Désiré Despradelle, de l'Institut de technologie du Massachusetts, proposa pour l'exposition internationale de Chicago le «Phare du progrès», qui aurait atteint 457 mètres de haut. Un siècle avant les tours Petronas, il symbolisait les aspirations d'une nation jeune et fière. Pendant des années, l'énorme aquarelle de Despradelle fut suspendue dans l'atelier d'études de l'Institut de technologie du Massachusetts afin de donner de l'inspiration aux étudiants. En 1956, l'architecte Frank Lloyd Wright (qui mesurait à peine plus de 1,50 mètre), proposa une tour de 528 étages et de 1,6 kilomètre de haut (un mile), sur les bords du lac de Chicago.

Alors que les architectes avaient ainsi des rêves de grandeur, la révolution informatique sapait le concept de gratte-ciel : le regroupement des employés de bureau dans un même lieu coûteux, en centre-ville, devenait progressivement inutile. Grâce aux progrès des télécommunications, les sociétés ont plus intérêt à s'installer dans des banlieues, où l'espace est meilleur marché et dont l'accès est simplifié. La mise au point des systèmes numériques de stockage de l'information et des réseaux informatiques a considérablement facilité l'accès à distance aux bases de données ; les archives de papier, forcément centralisées, sont quasi obsolètes. Les entreprises découvrent aussi l'avantage des annonces publicitaires sur les réseaux, tels celui du Minitel ou de l'Internet, par rapport aux lourds investissements dans des réalisations monumentales.

De plus en plus de grandes entreprises occupent des bureaux discrets en banlieue, plutôt que des tours spectaculaires en centre-ville. À Detroit, les Sociétés *Ford* et *Chrysler* se sont ainsi établies dans la verdure ; le siège de la Société *Nike* à Beaverton, dans l'Oregon, est assez difficile à trouver, mais pas son site Internet (www.nike.com). Les Sociétés *Microsoft* et *Netscape* rivalisent sur les réseaux à partir de leurs sièges respectifs à Redmond, dans l'État de Washington, et à Mountain View, en Californie : bien que leurs logos, leurs programmes de navigation sur le réseau Internet et leurs sites virtuels soient familiers au monde entier, peu de leurs millions de clients connaissent l'aspect des bâtiments de leurs sièges. Enfin, la Société *Sears* a déplacé ses bureaux de la grande tour qui porte son nom, à Chicago, vers une banlieue éloignée.

Le temps des gratte-ciel est-il révolu ? Une visite du bar situé au sommet du prestigieux hôtel Peninsula, à Hong Kong, montre que les tours ne sont pas des dinosaures en voie d'extinction : les urinoirs sont adossés aux baies vitrées, de sorte que les hommes d'affaires peuvent contempler la ville à leurs pieds tout en se soulageant ; ils n'auraient pas ce sentiment de puissance au rez-de-chaussée. Au XXIe siècle comme à l'époque de Chéops, les hommes édifieront des immeubles de plus en plus hauts, difficiles et coûteux à construire, simplement parce qu'ils voudront proclamer leur puissance.

William MITCHELL est doyen de l'école d'architecture et d'urbanisme à l'Institut de technologie du Massachusetts.



Empire State Building
1931
381 mètres
New York

World Trade Center
1972
417 mètres
New York

Tour Sears
1974
443 mètres
Chicago

Tours Petronas
1997
452 mètres
Kuala Lumpur

Siège de Microsoft
1986
20 mètres
Redmond

Phare du progrès
Proposé en 1900
Jamais construit
457 mètres
Prévu pour Chicago

Tour d'un mile
Proposé en 1956
1 609 mètres
Prévu pour Chicago

L'attaque d'un dinosaure

DAVID THOMAS • JAMES FARLOW

Un sculpteur et un paléontologue se sont associés pour reconstruire une agression qui a eu lieu il y a 100 millions d'années.

À la fin des années 1930, de nombreux paléontologues américains étaient à la recherche de fossiles de dinosaures. L'une des fouilles n'a pas fourni d'ossements, mais des empreintes. Sur les bords de la rivière Paluxy, au Texas, une piste de dinosaures a été mise au jour : elle est matérialisée par une série d'empreintes laissées sur une ancienne plage de vase. Les traces imprimées dans le sol ont été conservées grâce aux sédiments qui les ont recouvertes et qui se sont ensuite

1. UN DINOSAURE PRÉDATEUR, ***Acrocanthosaurus*****, poursuit sa proie, l'énorme** ***Pleurocoelus*****, un quadrupède herbivore qui s'est probablement éloigné du troupeau. Ces herbivores géants avaient la même démarche que les mammifères quadrupèdes modernes : les deux pattes du même côté se soulevaient quasi simultanément, et les pattes postérieures se plaçaient dans les empreintes laissées par les pattes antérieures.**

Sano Kazuhiko

solidifiés. Après 100 millions d'années d'érosion, des traces de dinosaures gravées dans la roche, ont été mises à nu.

Les paléontologues, qui doivent souvent se contenter d'hypothèses, trouvent dans les empreintes fossiles des preuves tangibles de la façon dont les dinosaures se déplaçaient : ils en déduisent les allures, les attitudes et la vitesse de déplacement des diverses espèces éteintes. On y découvre même des comportements : les empreintes ont montré que de nombreux dinosaures se déplaçaient en troupeaux.

Roland Bird, qui découvrit ces curieuses empreintes de la rivière Paluxy en 1938, les dégagea partiellement en 1940. Avant de découper de grandes plaques de la roche marquée d'empreintes et de les envoyer au Musée américain d'histoire naturelle de New York, il fit un relevé précis des traces et les photographia. Il observa alors que les empreintes de l'un des dinosaures, un bipède carnivore (probablement un *Acrocanthosaurus*, pesant deux à trois tonnes), étaient parallèles aux traces d'un quadrupède herbivore plus massif (sans doute un *Pleurocoelus* géant), qui se déplaçait avec son troupeau. Plus tard, il nota que le dinosaure carnivore semblait avoir fait un saut curieux, laissant dans la boue deux empreintes successives de la patte droite.

Bird supposa que ces traces indiquaient le moment où le dinosaure carnivore avait attaqué son volumineux cousin herbivore. La plupart des paléontologues rejetèrent cette interprétation, mais une série d'événements fortuits semble montrer que Bird avait raison.