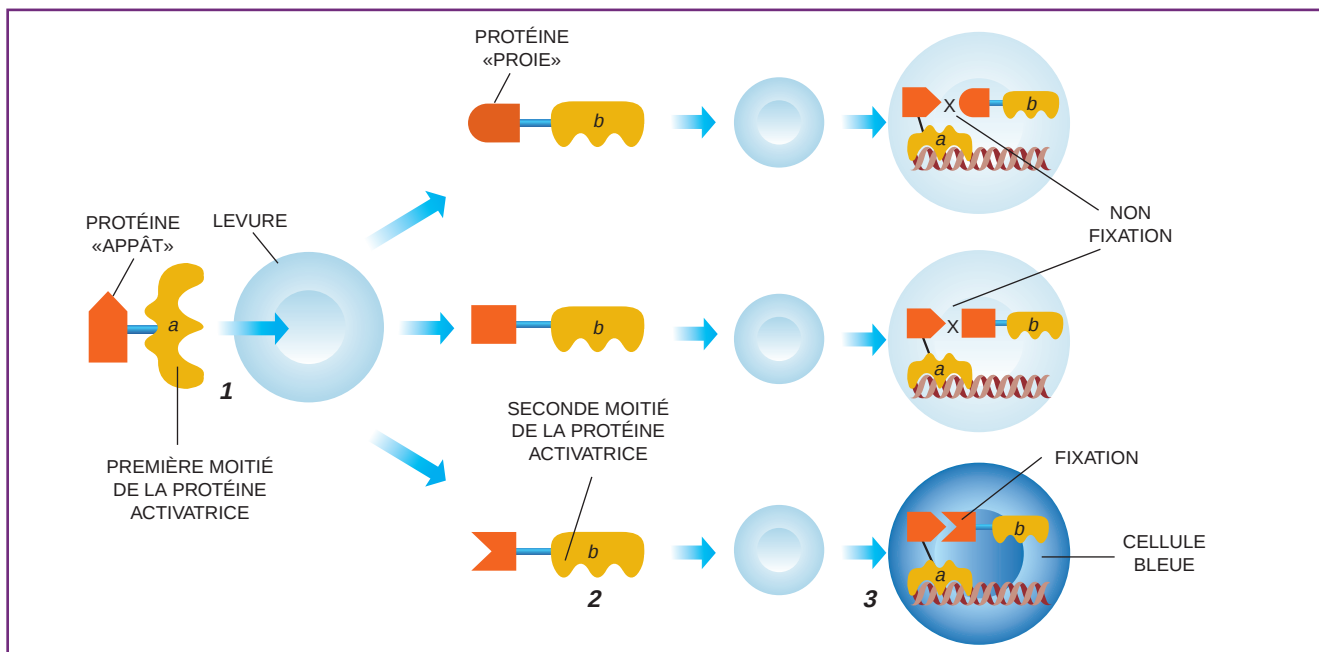




Laure Grace, assisté de Curagen

3. DANS LA TECHNIQUE DE «DOUBLE HYBRIDE» de la levure, on utilise deux moitiés (a et b) d'une protéine qui active un gène, tel celui qui active la synthèse d'un pigment bleu. Grâce à cette technique, on détermine quelle protéine d'un ensemble de protéines «proies» inconnues se lie à une protéine «appât» connue : l'ADN codant la protéine «appât»,

lié à l'ADN codant la moitié (a) de la protéine activatrice, est introduit dans le noyau de la levure (1). Puis, l'ADN codant l'autre moitié (b) de la protéine activatrice liée à l'ADN codant une des protéines «proies» est également introduit dans le noyau de la levure (2). Lorsque la couleur de la cellule change, la protéine «proie» s'est liée à la protéine «appât» (3).

«proie» et «appât» interagissent, les deux moitiés de la protéine activatrice sont réunies : le gène s'exprime, et la présence de la protéine codée par le gène révèle l'association (voir la figure 3).

Depuis le séquençage du génome de la levure en 1996, les fonctions d'un tiers de ses 6 000 gènes restent mystérieuses. Cependant, grâce au système de double hybride, une partie des protéines codées par ces gènes ont été classées en catégories fonctionnelles, telles la production d'énergie, la réparation de l'ADN, le vieillissement... Le plan des interactions protéiques de la drosophile est également en cours de déchiffrement.

La levure était un prototype ; avec la drosophile, on obtient des informations sur un organisme multicellulaire, et on utilise la protéomique pour trouver de nouveaux médicaments.

Certaines sociétés appliquent une variante du système de double hybride de la levure à l'étude des voies métaboliques spécifiques de maladies. Par exemple, l'une d'elles teste les interactions biochimiques des protéines codées par le gène *MMAC1*, qui, quand il est muté, conduit parfois à un cancer du cerveau et de la prostate.

Enfin, des biopuces d'un type nouveau apparaissent. Certaines, sous la forme de bandelettes, adsorbent, c'est-

à-dire retiennent à leur surface, les protéines selon des propriétés telles que leur solubilité dans l'eau, leur affinité pour des ions métalliques, etc. Ensuite placées dans un lecteur de puces, qui inclut un spectromètre de masse, les protéines des bandes sont identifiées.

En mars 2000, une telle biopuce à protéines a été utilisée pour la découverte de 12 marqueurs potentiels d'une maladie bénigne de la prostate et de six marqueurs du cancer de la prostate. On espère que les tests fondés sur les marqueurs ainsi identifiés seront plus fiables et précis que le test utilisé aujourd'hui.

De la structure à la fonction

L'identification des protéines humaines sera un premier travail, qui devra se poursuivre par l'étude de la fonction des protéines, l'élucidation de leur forme et de leur structure. Un groupe de biologistes a récemment proposé un programme d'exploration de la structure des protéines normales et anormales par des techniques de radiocristallographie quasi automatisées.

Classiquement, pour déterminer la structure d'une protéine, on doit utiliser un cristal pur de cette protéine, que l'on irradie avec des rayons X. Ces derniers rebondissent sur les atomes

de la molécule et forment une figure de diffraction dont on déduit la forme tridimensionnelle de la molécule entière. Le programme proposé veut perfectionner et automatiser les techniques actuelles.

Connaissant la structure exacte de chacune des protéines du protéome humain, les concepteurs de médicaments élaboreront des molécules qui s'adapteront aux sites protéiques et les activeront ou les empêcheront d'agir. À ce jour, de telles tentatives de conception rationnelle ont eu peu de succès. Cependant, l'espoir subsiste pour les 99 pour cent de protéines humaines dont on ne connaît pas encore la structure.

Carol EZZELL est journaliste à *Scientific American*.

The Chipping Forecast, supplément spécial de *Nature Genetics*, vol. 21, n° 1, janvier 1999.

A. ABBOTT, *A Post-Genomic Challenge : Learning to Read Patterns of Protein Synthesis*, in *Nature*, vol. 402, pp. 715-720, 16 décembre 1999.

R. JAMES, *Differentiating Genomics Companies*, in *Nature Biotechnology*, vol. 18, pp. 153-155, février 2000.

R.F. SERVICE, *Structural Genomics Offers High-Speed Look at Proteins*, in *Science*, vol. 287, pp. 1954-1956, 17 mars 2000.

Les ponts légers

DAVID BILLINGTON

L'ingénieur suisse Robert Maillart a construit quelques-uns des ponts les plus remarquables du XX^e siècle. Grâce à ses innovations, il a obtenu des ouvrages fins et élancés, qui supportent des charges énormes.

Les ouvrages d'art les plus remarquables du XIX^e siècle sont les ponts ferroviaires. Au XX^e siècle, ce sont les ponts routiers : pour l'automobile, qui se développe, on construit des routes et des ponts. Ces derniers sont fondamentalement différents des ponts de chemin de fer : ils doivent supporter des charges inférieures, mais le tracé des routes exige parfois qu'ils soient en courbe ou en pente. Pour les réaliser, les constructeurs du début du siècle utilisent un

nouveau matériau : le béton armé. Ingénieur suisse, Robert Maillart est un de ceux qui construisirent les ponts les plus originaux et les plus modernes.

Né en 1872 à Berne, Maillart fait ses études d'ingénieur en génie civil à l'École polytechnique de Zurich. Dès les débuts de sa carrière, il utilise une démarche originale, qu'il applique aux ponts et aux bâtiments en béton : il rejette l'analyse mathématique des charges et des contraintes que prônent

ses contemporains ; il rompt avec les styles architecturaux du passé ; il évite les ornements inutiles.

Maillart est un créateur intuitif : il a le don de concevoir de nouvelles formes qui résolvent parfaitement les problèmes classiques de construction. Il a aussi le souci de l'économie : souvent, il décroche ses contrats parce que les ponts qu'il propose sont moins chers que les projets concurrents. Pour comprendre la démarche de Maillart, examinons la structure de quelques

de Robert Maillart



ponts, où transparaît le mieux son esprit original.

Les méthodes mathématiques occupent une place importante dans la conception moderne des ouvrages d'art : en appliquant les principes de la mécanique, les ingénieurs calculent les contraintes et les déformations des futurs édifices sous l'action des forces auxquelles ils seront soumis, tels le poids des véhicules sur un pont ou la force du vent sur un gratte-ciel. Ainsi, les ingénieurs estiment

la résistance de leurs ouvrages aux séismes ou aux ouragans. Néanmoins, ces méthodes mathématiques ont souvent entravé la créativité de nombreux ingénieurs. Trop souvent, on suppose qu'on ne doit pas construire une structure dont on ne sait pas calculer le comportement.

Le premier grand pont de Maillart réfute ce principe. En 1900, la Société *Froté et Westermann* confie à Maillart la réalisation d'un pont de 30 mètres de long au-dessus de l'Inn, dans la



Avec l'autorisation de Marie-Claire Blumer-Maillart

1. LE PONT DES GORGES DE SALGINA, qui enjambe un ravin de 80 mètres de profondeur, est le plus connu des ponts de Robert Maillart. Cet ouvrage élancé, qui date de 1930, se trouve en Suisse, dans le canton des Grisons.

petite ville suisse de Zuoz. La ville a demandé un pont en acier, mais Maillart propose un pont en béton armé, plus élégant, pour un coût presque identique. Ses plans prévoient un seul arc, articulé à la clé et près des culées (les blocs de béton qui s'opposent à la poussée de l'arc, aux extrémités du pont) pour limiter les contraintes de flexion. Ce projet est novateur parce qu'il intègre

en une même structure l'arc et le tablier (la chaussée du pont) ; il invente ainsi l'«arc caissonné», qui réduit considérablement les quantités de béton nécessaires à la construction du pont et, par conséquent, son coût.

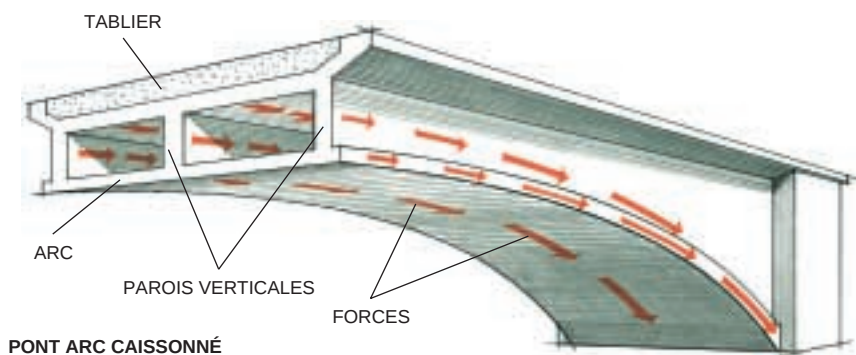
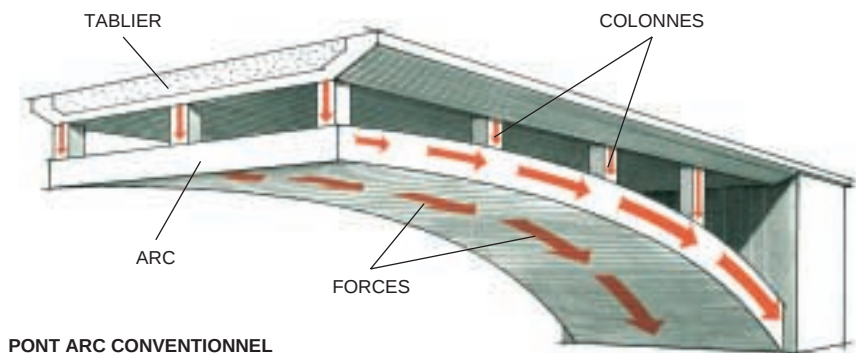
L'arc d'un pont classique supporte le poids du tablier par l'intermédiaire de piliers, qui doivent être assez solides pour résister aux contraintes de flexion

engendrées par la charge de la circulation routière. Dans l'ouvrage conçu par Maillart, le tablier routier et l'arc sont reliés par trois parois verticales qui courent sur toute la longueur du pont, formant deux caissons sous le tablier (voir la figure 2). Ainsi, la charge se répartit sur les trois faces des caissons (le tablier, l'arc et les murs d'appui) et sur presque toute la longueur du pont (aux articulations des culées, seul l'arc supporte la charge). L'arc, n'ayant pas à supporter la charge à lui seul, est trois fois moins épais que celui d'un pont classique.

Maillart évalue la faisabilité de son projet à l'aide d'une analyse graphique simplifiée : une analyse mathématique rigoureuse est impossible à l'époque, car les calculs sont trop complexes pour être effectués à la main, sans ordinateur. L'expert Wilhelm Ritter, à qui le projet est soumis, ne réussit pas à résoudre le problème mathématique que pose le pont, mais il trouve sa forme intéressante et en conseille la construction. Le pont est testé dès son achèvement, en 1901 : on mesure les déformations de la structure au passage de lourdes charrettes attelées ; malgré son mystère mathématique, le pont est une réussite.

Au cours des deux années qui suivent, les murs d'appui se fissurent près des culées : leur raccourcissement, dû à leur dessèchement progressif, est bloqué par l'arc et par le tablier, dont le dessèchement est plus lent (ils sont plus exposés à l'humidité ambiante). Pour son deuxième pont, Maillart corrige ce défaut, qui ne menace toutefois pas le pont de Zuoz.

Ce deuxième ouvrage, le pont de Tavanasa, enjambe le Rhin dans les Alpes suisses. Dans ce premier grand chef-d'œuvre, construit en 1905, Maillart évite les murs verticaux : à ces endroits, les pans de mur sont inutiles, car ils ne supportent aucune charge. Il évite ainsi la fissuration et affine la silhouette de l'ouvrage (voir la figure 3). Cette forme est bien adaptée aux contraintes internes du pont engendrées par les charges appliquées : peu épaisse à la clé et aux culées, elle est plus massive aux quarts de portée (à mi-chemin entre la clé et les culées), où la charge due à la circulation est maximale sur un pont à trois articulations. Malheureusement, le pont de Tavanasa sera détruit, en 1927, par une avalanche à laquelle aucun pont n'aurait résisté.



2. L'ARC CAISSONNÉ fut la première grande innovation de Maillart. Dans un pont classique, l'arc supporte le poids du tablier (de la chaussée) par l'intermédiaire de piliers, qui doivent être suffisamment épais pour compenser les contraintes de flexion. Dans un pont arc caissonné, des murs verticaux remplacent ces piliers. La charge se répartit sur les trois éléments du caisson : les murs verticaux, l'arc et le tablier. Maillart appliqua ce principe lors de la construction du pont de Zuoz, en 1901.

Barry Ross

Citernes et entrepôts

Les innovations de Maillart passent d'abord inaperçues. Le pont de Tavanasa n'est guère apprécié en Suisse, où l'on préfère les copies de styles anciens, avec revêtement en pierre. Toutefois, Maillart a créé sa propre entreprise de construction en 1902 : comme il n'a pas assez de commandes de ponts, il construit des bâtiments, des réservoirs hydrauliques et d'autres structures en béton armé.

À Saint-Gall, en Suisse, il réalise les enceintes en béton de deux citernes à gaz : dans ces enceintes cylindriques, de l'eau bloque les fuites éventuelles de gaz. Il cherche un dessin qui allège l'ouvrage... et n'utilise finalement que le quart des quantités de béton prévues : comme ses ponts, ses enceintes sont affinées. Il s'inspire de la structure des tonneaux, où les douves (les lattes) sont maintenues par des cerceaux métalliques, qui compensent la pression exercée par le liquide. Afin de réduire l'épaisseur de ses enceintes, Maillart arme le béton avec des anneaux en acier, comparables aux cerceaux des tonneaux (voir la figure 7).

Maillart publie l'analyse graphique de ses enceintes en 1907 : applicable à n'importe quel réservoir cylindrique, elle évite une analyse mathématique que l'on n'obtient que cette même année et qui se révèle si complexe que les ingénieurs ne trouvent de solutions que pour quelques formes simples. Cependant, cette approche gagne progressivement du terrain dans la profession.

Lorsque Maillart étudie des bâtiments industriels, tels des entrepôts, il rencontre un autre problème technique : comment soutenir les dalles formant le plancher de chaque étage, destinées à supporter des charges particulièrement lourdes ? Dans les bâtiments classiques, les dalles (de grandes plaques en béton) sont soutenues par des poutres horizontales, elles-mêmes soutenues par des colonnes. Maillart veut éliminer les poutres, pour simplifier la structure et réduire son coût. Il sait en outre que d'autres ingénieurs ont échoué dans l'analyse mathématique du problème. Au lieu d'y perdre son temps, il réalise des maquettes de dalles en béton et il teste divers dessins dans la cour de son entreprise.

Pour son premier entrepôt à plancher-dalle (le plancher de chaque étage est formé de dalles), construit en 1910 à Zurich, Maillart imagine des colonnes

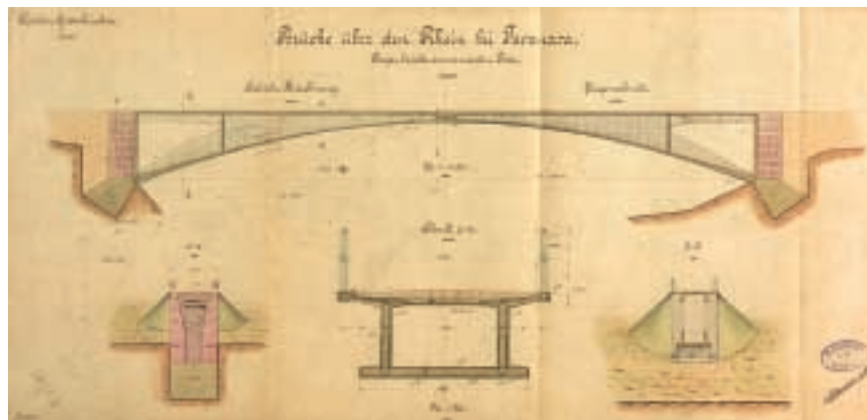
dont les chapiteaux évasés se fondent dans le plafond, c'est-à-dire dans les dalles de l'étage supérieur (voir la figure 8). Ces élégantes colonnes octogonales, avec leur profil hyperbolique, réduisent considérablement la portée libre des dalles, qui sont ainsi mieux soutenues. Maillart utilise le même type de colonnes pour l'immeuble Filter, qu'il construit en 1912, à Rorschach, en Suisse. De telles structures illustrent l'objectif que Maillart s'était fixé : réaliser des édifices à la fois élégants, fonctionnels et peu coûteux.

Un esprit libre

À partir de 1912, l'entreprise de Maillart prospère grâce à des grands projets en Russie, où l'industrialisation est naissante. Quand la Première Guerre mon-

diale éclate, Maillart et sa famille sont contraints de rester en Russie. Maillart perd toute sa fortune et évite la mort de peu pendant la révolution communiste. Il rentre en Suisse en 1919 et se remet à travailler sur des ponts en béton quelques années plus tard. Il met alors au point les arcs raidis par le tablier, dont le pont de Flienglibach, de 1923, est le plus bel exemple. L'idée lui en vient quand il cherche à prendre simultanément en compte le poids du pont lui-même et celui de la charge utile (la charge engendrée par la circulation) qui s'exercent sur l'arc d'un pont.

Un pont arc est comme un câble inversé : le câble, tendu horizontalement, se déforme quand il soutient une charge (il forme une ligne brisée), de sorte que sa tension compense le poids de la charge. De même, dans un pont,



Zürich Maillart Archive



Avec l'autorisation du canton de Graubünden

3. LES PLANS DU PONT DE TAVANASA montrent les améliorations que Maillart apporta à ses ponts arc caissonnés. Dans cet ouvrage, deux murs d'appui seulement supportent le tablier. Les pans de mur proches des culées, où la charge se répartit entre l'arc et le tablier, sont inutiles : Maillart les évita. Achévé en 1905, ce pont, qui traversait le Rhin, fut détruit par une avalanche en 1907.

la poussée de l'arc, due aux forces de pression exercées par les culées, compense le poids du tablier. Toutefois, la poussée de l'arc dépend de sa forme qui, une fois le pont construit, ne varie plus. La charge utile provoque un fléchissement de l'arc (exagéré sur la figure 4), surtout quand elle est asymétrique (par exemple, quand un lourd camion passe au quart de la portée du pont). L'arc doit alors être suffisamment robuste et épais pour que la flexion reste minime.

Pour des raisons esthétiques, Maillart veut toutefois amincir l'arc. Il trouve une solution : reliant le tablier par des parois verticales transversales (voir la figure 4), il contraint ces deux éléments à fléchir ensemble. Les efforts de flexion se répartissent entre l'arc et le tablier, en fonction de leur rigidité relative. Selon le raisonnement de Maillart, si le tablier est beaucoup plus rigide que l'arc, le

moment de flexion se reporte presque entièrement sur le tablier ; il est quasi nul sur l'arc, qui peut alors être aminci. Maillart rigidifie le tablier du pont de Flienglibach en renforçant l'armature des parapets (en béton armé).

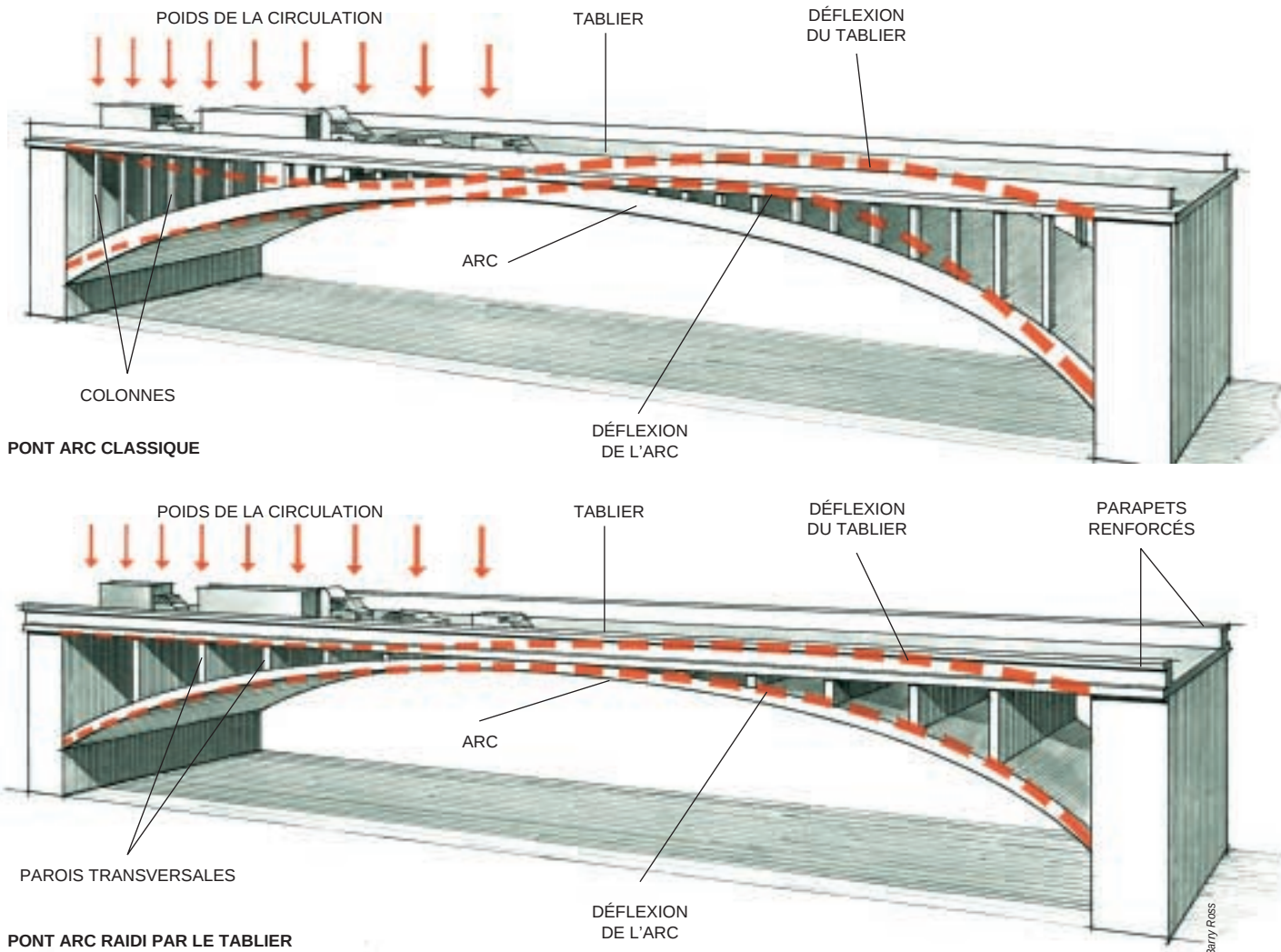
Les essais du pont confirment les prévisions. Cependant, les principaux experts suisses en génie civil – les anciens professeurs de Maillart – décrieront ses méthodes pendant près d'un quart de siècle : ils les jugent négligentes et dangereuses. Ils réclament une analyse mathématique approfondie de l'interaction du tablier, des parois et de l'arc... bien qu'un tel traitement soit souvent irréalisable, en raison du nombre colossal d'équations à résoudre, même pour un petit pont (aujourd'hui, les ordinateurs se chargent des calculs).

Au cours des dix années suivantes, Maillart cherche à embellir ses arcs rai-

dis par le tablier. On a une idée des progrès quand on compare le pont de Valterschielbach, de 1925, au pont de Schwandbach, de 1933. Dans les deux cas, l'arc est extraordinairement fin, mais le premier pont est plus classique : ses culées sont de style roman, l'arc est arrondi et le tablier rectiligne. En revanche, les culées du pont de Schwandbach sont en béton, l'arc est polygonal et le tablier décrit une courbe (voir la figure 5). Grâce à ces innovations, ce pont, en pleine forêt suisse, est l'un des plus ingénieux et des plus originaux de ce siècle.

Ingenierie contre architecture

L'ouvrage de Maillart le plus connu est le pont de Salginatobel, achevé en 1930 (voir la figure 1). Son arc à caisson est



4. L'ARC RAIDI PAR LE TABLIER améliore la résistance aux charges asymétriques. Sur un pont classique, lorsque la charge est supérieure sur la moitié gauche du pont, la moitié droite du tablier se soulève. L'arc doit alors être suffisamment épais pour que la déformation reste

minime. En revanche, dans un arc raidi par le tablier, les parapets sont armés de barres d'acier. Le tablier est relié à l'arc par des parois transversales, qui empêchent le pont de se déformer. Les efforts de flexion qui s'exercent sur l'arc sont moindres, de sorte qu'il peut être aminci.



5. EN COMPARANT LE PONT DE VALTSCHIELBACH, de 1925 (*en haut*), au pont de Schwandbach, de 1933 (*au milieu et en bas*), on constate une évolution des conceptions de Maillart. Le premier, dans le Sud-Est de la Suisse, a des culées en pierre de style roman ; son arc est arrondi, et sa chaussée rectiligne. Le second, au Sud de Berne, ne possède pas de culée en pierre ; son arc est polygonal, et sa chaussée décrit une courbe.

une version améliorée de celui du pont de Tavanasa. Maillart a supprimé les éléments de style ancien, telles les culées romanes en pierre. Son projet est retenu, car il est le moins coûteux des 19 projets proposés : l'arc et le tablier ne coûtent que 20 millions de francs d'aujourd'hui. Avec une portée de 90 mètres, le pont de Salginatobel est le plus long que Maillart ait construit, et aussi le plus spectaculaire : son arc s'élance à 80 mètres au-dessus des gorges de la Salgina. En 1991, il est classé monument international de génie civil.

Toutefois, après la construction du pont, Maillart regrette d'avoir fait un arc arrondi, ce qui manque d'originalité à son goût. Pour le pont de Fel-segg, qu'il réalise en 1933, il conçoit un

David P. Billington



arc brisé, constitué de deux demi-arcs qui se rejoignent à la clé du pont, formant une ligne brisée.

En 1936, Maillart construit un autre pont à Vessy, dans les environs de Genève. Il peaufine la conception de l'arc brisé en décalant les articulations des extrémités vers la clé ; une coupure verticale, à l'endroit de l'articulation centrale, accentue encore la discontinuité de l'arc (*voir la figure 6*). Les parois transversales qui supportent le tablier ont une forme de X qui fait l'originalité de l'ouvrage. Elles donnent une impression de mouvement, tout en résistant parfaitement aux efforts de flexion : avec leur forme en X, elles compensent les déformations induites par la dilatation thermique du

E. Oberweiller



David P. Billington



FBM Studio Ltd.

6. LES DERNIERS PONTS DE MAILLART ont des formes très modernes. L'arc du pont de Vessy, de 1936, est brisé en son milieu. Les murs d'appui, en X, sont ornés de traits horizontaux, produits par les cof-

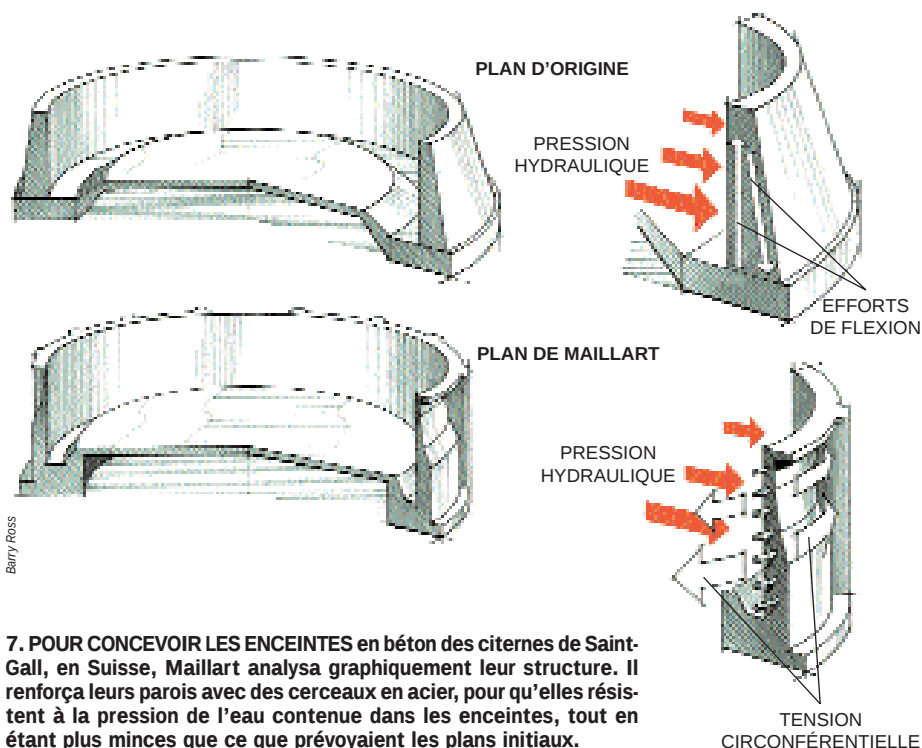
rages en bois utilisés lors de la construction. Sur le pont de Lachen, de 1940, ces traits horizontaux soulignent à la fois la finesse de l'arc et son épaississement, près des articulations des culées.

tablier. En effet, les moments de flexion sont importants en haut et en bas des parois transversales, mais presque nuls à mi-hauteur. Les traits horizontaux que présentent ces parois sont produits par les coffrages en bois qui ont servi à les fabriquer. L'ensemble du pont, avec ses traits et sa forme en X, rappelle le tableau de Paul Klee (un compatriote et contemporain de Maillart), intitulé *Doppelzelt* (double tente).

Les ingénieurs utilisent souvent les coffrages pour créer des motifs ou des textures sur les surfaces visibles des ouvrages. En 1939, Maillart reprend ce système pour le pont de Lachen, au bord du lac de Zurich : la surface de l'arc et les parois verticales des caissons qui le surmontent sont striées de traits horizontaux (voir la figure 6). Ces traits soulignent à la fois la finesse de l'arc et son épaissement près des articulations des culées.

Maillart meurt en 1940, après une vie indépendante. Pendant toute sa vie, il s'est préoccupé d'esthétique, sans jamais faire appel à un architecte, sauf au début de sa carrière, lorsqu'on l'y contraignait, afin de satisfaire les autorités communales. D'après lui, celles-ci avaient une «antipathie atavique» pour ses innovations. Il conçut seul tous ses grands ouvrages, méprisant les architectes qui voulaient donner aux ponts une allure «monumentale». En revanche, il partageait avec eux et avec quelques journalistes spécialisés un goût pour l'analyse esthétique des ouvrages d'art. D'ailleurs, les architectes furent les premiers à reconnaître l'intérêt des structures de Maillart, bien avant les ingénieurs en génie civil. En 1947, la galerie architecturale du Musée d'art moderne de New York consacra une grande exposition à ses travaux, alors que la plupart des ingénieurs américains n'avaient jamais entendu parler de lui.

Quelques années plus tard, les experts en génie civil comprirent enfin que les ponts de Maillart étaient des merveilles techniques. Aux États-Unis, après la Seconde Guerre mondiale, l'arc à caisson s'imposa pour les ponts en béton à moyenne ou longue portée. En Suisse, les professeurs de l'École polytechnique finirent par enseigner les concepts de Maillart. L'un des plus éminents adeptes de Maillart est l'ingénieur suisse Christian Men, qui a conçu plusieurs ponts arc raidi par le tablier, dès la fin des années 1950. Les ingé-



7. POUR CONCEVOIR LES ENCEINTES en béton des citernes de Saint-Gall, en Suisse, Maillart analysa graphiquement leur structure. Il renforça leurs parois avec des cerceaux en acier, pour qu'elles résistent à la pression de l'eau contenue dans les enceintes, tout en étant plus minces que ce que prévoyaient les plans initiaux.



8. LES COLONNES ÉVASÉES de l'immeuble Filter (construit par Maillart en 1912, à Rorschach, en Suisse), se fondent dans le plafond, c'est-à-dire dans les dalles de l'étage supérieur, qu'elles soutiennent à elles seules, sans poutres horizontales.

nieurs américains ne construisirent ce type de ponts qu'après 1970.

Avec du recul, on comprend que Maillart appartient à l'école de John Roebling, qui conçut le pont de Brooklyn, et de Gustave Eiffel, qui construisit également de nombreux ponts et

viaducs. La préoccupation première de ces trois hommes était l'esthétique : ils commençaient par dessiner la silhouette de leur ouvrage et, ensuite seulement, ils utilisaient des techniques d'analyse simples pour les rendre viables.

David BILLINGTON est professeur en ingénierie à l'Université de Princeton.

Sigfried GIEDION, *Space, Time and Architecture : The Growth of a New Tradition*, Harvard University Press, 1963.

Max BILL, *Robert Maillart : Bridges and*

Constructions, Artemis, 1969.

Elizabeth B. MOCK, *The Architecture of Bridges*, Ayer, 1972.

David P. BILLINGTON, *Robert Maillart : Builder, Designer and Artist*, Cambridge University Press, 1997.

