

Qu'attend l'architecte, l'urbaniste et l'artiste de la chimie ?

Jean-Paul Viguié est architecte, diplômé de l'École nationale supérieure des beaux-arts de Paris puis de l'Université d'Harvard. Il obtient le « premier prix du jury » du concours pour l'Opéra Bastille en 1981, puis pour le projet Tête Défense en 1983. En 1986, il remporte avec Alain Provost, Patrick Berger et Gilles Clément le concours pour la construction du Parc André-Citroën à Paris, puis celui du Pavillon de la France à l'Exposition Universelle de Séville de 1992. Il remporte en 1990 le concours pour la construction de l'ensemble Cœur Défense, réalise entre autres le siège de France Télévision à Paris. Jean-Paul Viguié est membre de la Commission supérieure des monuments historiques (2002-2007), membre de l'Académie d'architecture (dont il a été le président de 1999 à 2002), Chevalier de la Légion d'honneur, Commandeur de l'Ordre des Arts et Lettres et Chevalier de l'Ordre national du mérite.

*Sublimer la matière...
les matériaux dans des situations improbables.*

Il existe entre l'architecture et la chimie un rapport d'ordre à la fois scientifique, artistique, mais aussi poétique. De même il existe une relation entre la matière, l'architecture, l'espace, l'art mais aussi la société car l'architecture est un art social. Je souhaite, dans

les lignes qui suivent, vous faire découvrir les dimensions passionnantes de ces rapports à travers quelques exemples issus de mes travaux, qui donneront un support à notre exploration et illustreront ce lien entre chimie et architecture.

1 Les trois dimensions de l'architecture

L'architecture est un art de l'espace qui, en plus de sa dimension sociale, doit être utile et fonctionnel. Ces dimensions de l'architecture sont décrites dans l'un des rares ouvrages littéraires sur cette discipline : *Eupalinos ou l'Architecte* (1921) de Paul Valéry. Le poète, philosophe, parlant du triptyque de l'architecture, écrit : « *Ainsi, le corps nous contraint de désirer ce qui est utile, ou simplement commode ; et l'âme nous demande le beau ; mais le reste du monde, et ses lois comme ses hasards, nous oblige à considérer en tout ouvrage, la question de sa solidité* ». Donc le beau, l'utile et le durable constituent d'une manière assez sommaire, mais en tout cas assez claire, les principales dimensions de l'architecture.

*Le beau, l'utile et le durable
constituent les principales dimensions
de l'architecture.*

De ces trois dimensions, les deux dernières sont totalement mesurables mais la première ne l'est pas. On sait en effet très bien mesurer l'utilité : savoir si un bâtiment sert bien ou sert mal, ou sert un peu ou pas beaucoup ; on peut aussi savoir si un bâtiment est durable ou pas : il suffit de l'observer par tous les temps, d'étudier les nombreuses agressions qu'il subit : le froid, le chaud, la pluie, le vent, l'usure, l'usage des êtres humains, etc. L'utilité et la durabilité se mesurent... mais pas le beau. Le beau est

la dimension qui ancre l'architecture dans l'art, alors que les architectes – même si certains prétendent le contraire –, ne sont pas seulement des artistes.

Mais alors, où se situe le lien de l'architecture avec la chimie ?

D'abord l'architecture, dans sa dimension de durabilité et de fonctionnalité, va devoir répondre à un ensemble d'orientations sociales, à un programme proposé par des commanditaires ; pour y répondre, l'architecte devra avoir recours à des assemblages de matériaux qu'il mettra à l'épreuve dans l'élaboration du projet. La chimie sera souvent sous-jacente dans cette stimulante mise au point.

Il me semble intéressant de rappeler que dans la langue japonaise, le mot « architecte » n'existe pas, et que le mot qui désigne « l'architecte » en japonais est un mot issu de la culture traditionnelle : le *kanteguchi*, c'est-à-dire l'homme qui assemble. Dans la tradition asiatique, et en particulier au Japon, l'architecte est décrit comme celui « qui prend certains éléments et qui les assemble ». C'est l'art de la charpente, ou la sublimation de l'assemblage des pièces de bois pour fabriquer une structure qui démultiplie les capacités de chaque pièce à tenir les efforts : on prend une simple pièce de bois qui tient à certains efforts, on en met deux, cela tient plus que deux fois en efforts et ainsi de suite. L'intelligence de l'assemblage

des pièces démultiplie les capacités de la structure créée. Cela était autrefois réalisé au Japon essentiellement avec le bois, matériau de base des constructions. Mais maintenant, les architectes, pour créer les structures, peuvent choisir et développer une gamme infinie et très large de matériaux qui non seulement peuvent être utilisés en l'état mais aussi assemblés les uns avec les autres.

Ces matériaux que les architectes assemblent doivent être mis à l'épreuve, et c'est là que s'établit un lien vraiment intéressant avec la chimie ; se posent alors des questions dans les situations créées par le projet et des problèmes sont à résoudre sur l'adéquation des matériaux choisis et leur utilisation pour lesquelles ils n'ont pas toujours été conçus.

C'est ce point que je voudrais illustrer au moyen de quelques expériences personnelles.

2 Du carbone, de l'acier et de la toile pour la beauté d'une ligne dans le ciel et d'un ciel pour toit

Exposition Universelle à Séville

Parlons de l'usage du carbone, de l'acier et de la toile à travers l'exemple du Pavillon de la France que j'ai construit à l'Exposition Universelle de Séville en 1992 (*Figure 1*). Le président François Mitterrand, qui choisissait les projets, m'avait dé-

signé comme lauréat de ce concours de projets d'architecture très disputé. J'avais pourtant pris une option paradoxale risquée qui pouvait me faire perdre ce concours... mais qui au final me l'a fait gagner. Cette option était que le Pavillon de la France ne devait montrer que son propre espace, dans cette exposition universelle où règne un fatras de discours, de propos dans lesquels on a du mal à trouver sa voie, empilage de savoir-faire ou de produits plus ou moins ordonnés, plus ou moins intéressants, tournant souvent en lieu commun. Je voulais que toutes les capacités de savoir-faire de la France, sa technologie, sa culture, soient contenues au sein même d'une structure d'accueil capable de tout représenter par un seul geste architectural. Je voulais que ce lieu soit unique, au centre de l'exposition et rassemble toutes les énergies.

Pour réaliser cela, j'ai travaillé sur la notion de vide ; c'est une notion que j'utilise très souvent dans mes travaux et que j'appelle parfois l'« absence », au sens où le manque qu'on ressent lorsqu'on regarde un bâtiment est souvent plus intéressant que ce que l'on voit. Ce que vous ne voyez pas ou ce sur quoi vous vous interrogez en observant une structure architecturale interpelle votre imagination, alors que ce que vous voyez interpelle plutôt votre capacité d'analyse. C'est la grande différence en architecture entre les systèmes structuralistes et les approches plus abstraites, qui sollicitent l'imagination plus que la vision.

Je voulais faire de ce pavillon un bâtiment dont la performance, la structure, la capacité à créer un espace soient du domaine de l'impossible. Il me fallait donc trouver les matériaux me permettant d'atteindre cet objectif ambitieux. Étant d'origine toulousaine, je regardais les avions qui se construisaient non loin de chez moi et je voyais qu'ils utilisaient des matériaux magnifiques, notamment du carbone utilisé sous forme de structures en nid d'abeilles assemblées sous la forme de tubes collés les uns aux autres. Avec cette technique, on arrivait à produire des portées et des surfaces absolument immenses en utilisant un minimum de matière (**Encart : « Des nids d'abeilles, solides et légers »**). Je me suis alors dit : c'est exactement ce qu'il me faut !

J'ai donc créé le premier lien de ma vie d'architecte avec la chimie en travaillant à l'époque avec les ingénieurs d'Airbus pour réaliser en quelque sorte un transfert de technologie et de savoir-faire sur les matériaux de l'aviation vers l'architecture. Mon but était de créer une plaque de 50 mètres par 55 mètres de côté, soulevée à 15 mètres de hauteur et dont on aurait l'impression qu'elle n'avait pas d'épaisseur. Ces plaques de carbone utilisées en aéronautique me semblaient pouvoir être adaptées à cet objectif ; nous avons dû faire au préalable un véritable projet de recherche-développement pour mettre au point des prototypes. Mais au moment de chiffrer la réalisation finale, le coût est apparu exorbitant.

Nous avons donc buté sur ce coût. Le budget de ce pavillon étant limité, nous n'avons pas pu utiliser complètement les possibilités de la technologie pour réaliser le projet d'origine, que j'ai dû adapter. Le financement qui m'était alloué ne me permettait de réaliser en carbone que la partie inférieure de la plaque de 50×55 mètres, le reste devant être fait avec des poutres en acier à inertie variable, c'est-à-dire que la section de chaque point de la poutre devait être calculée pour correspondre aux efforts qu'elle devait supporter (**Figure 1E**).

La performance architecturale a été cependant atteinte puisqu'en regardant du sol cette plaque (dont la rive était finalement de l'ordre de 10 centimètres au total), on avait vraiment l'impression qu'elle n'avait pas d'épaisseur et qu'elle ne formait qu'une seule ligne. Et le carbone permettait de réaliser, vue de dessous, une surface absolument plate, sans aucune déformation, un véritable ciel !

On voit sur ce premier exemple du lien entre architecture et matière que pour réaliser ce pavillon, il a fallu rassembler des compétences inhabituelles : celles de chimistes spécialistes des carbones, celles d'industriels de l'aéronautique et celles de l'architecte pour solliciter ou assembler les matériaux dans des conditions inusuelles et difficiles. Le passage des idées du plan sur papier aux maquettes prototypes et à la réalisation sur le terrain n'a, de plus, pu se faire qu'avec le travail conjoint des ingénieurs, des

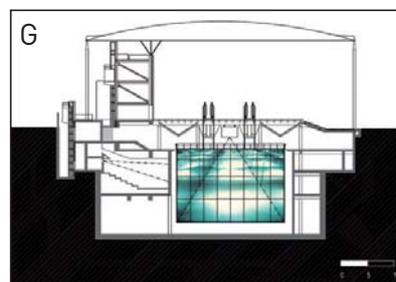


Figure 1

Le Pavillon de la France à l'Exposition Universelle de Séville (1992).

Une double poutre métallique à inertie variable de 70 cm posée selon les diagonales de la forme, revêtue au-dessous de plaques de polyester bleues et au-dessus d'un film monochrome, également bleu. Le « ciel » repose aux quatre angles sur des colonnes fines en métal creux d'inox (E).

D : Habillage en toile du Pavillon de la France ; G : coupe.



DES NIDS D'ABEILLES, SOLIDES ET LÉGERS

On appelle « nids d'abeilles » des matériaux dont les structures sont comparables aux alvéoles d'abeilles (**Figure 2**), et qui servent à renforcer la résistance d'un élément tout en garantissant une légèreté maximale. Les nids d'abeilles peuvent être constitués de papier carton, d'aluminium, de matière plastique synthétique (polypropylène), de fibres aramides (*voir le Chapitre de G. Némoz*), de fibres de verre ou de carbone, ces fibres pouvant être renforcées de résine époxy ou phénolique^{* **}.

L'âme des avions

Dans l'industrie, ces matériaux modernes sont utilisés en sandwich avec d'autres pour former des composites^{**} légers grâce au vide important (95 %), et résistants en compression, tout en ayant une grande capacité de déformation. Leur réputation vient de l'industrie aéronautique qui utilise des panneaux à âme en nid d'abeilles, dont l'excellent rapport légèreté/rigidité permet le maximum d'économie de carburant (**Figures 2 et 3**). À partir de 3 kg/m², leur rigidité est déjà supérieure à celle d'une tôle d'aluminium cinq fois plus lourde ! Leur résistance mécanique les rend adaptables à tout niveau de charge et sollicitations statiques et dynamiques.

L'âme des bâtiments

Ces performances exceptionnelles trouvent une grande utilité dans de nombreux secteurs industriels pour le remplissage de volumes creux : automobile, nautisme, éolien et, depuis les années 1980, dans les travaux publics (structures alvéolaires ultra légères), notamment pour le remblai.

Particulièrement appréciés pour leur parfaite planéité quelles que soient leurs épaisseurs, ces nids d'abeilles offrent une esthétique qui en fait un matériau très recherché pour des façades et grandes cloisons, de même que pour des planchers et plafonds. De plus, ils peuvent facilement être revêtus de toutes sortes de peaux : acier, inox, aluminium, composites, bois, voire de fines feuilles de marbre. De ce fait, ils sont très appréciés dans la décoration intérieure ou extérieure des bâtiments.

Le carbone, un matériau exceptionnel

La fibre de carbone est un matériau composé d'un alignement de cristaux de carbone très fins, d'une dizaine de micromètres de diamètre. Cet alignement rend la fibre extrêmement résistante (à la traction et à la compression) pour sa taille. De plus, elle présente une bonne tenue en température et une grande inertie chimique. Elle est donc un matériau de choix pour renforcer les matériaux composites et pour des applications exigeant une grande résistance et un poids réduit. Ces applications couvrent des domaines aussi larges que : l'aérospatial (les nez et les bords d'attaque des navettes spatiales sont en fibres de carbone), l'aéronautique (airbus A380, **Figure 3**), le sport^{**} (bateaux et rames en aviron, arcs et flèches, raquettes de tennis, planches de snowboard et planches à voile, freins de formule 1), mais aussi la musique (en remplacement de l'ébène pour des instruments à vent), ..., pour ne pas tout citer.

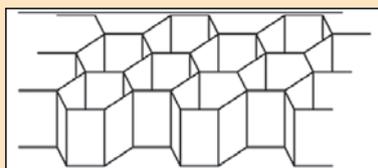


Figure 2

Structure en nid d'abeilles.



Figure 3

L'airbus A380 a bénéficié de nombreux éléments en fibres carbone qui lui confèrent à la fois une remarquable légèreté et rigidité.

* Au sujet des matériaux composites, voir le **Chapitre d'après la conférence de P. Hamelin** dans cet ouvrage.

** Voir l'ouvrage *La chimie et le sport*. Chapitre de N. Puget. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, Rose Agnès Jacquesy, Danièle Olivier et Paul Rigny, EDP Sciences, 2011.

architectes, mais aussi des entrepreneurs car l'architecture est l'art de bâtir.

La réalisation de la toiture par exemple a demandé un effort technologique tout à fait exceptionnel, d'autant qu'elle a été fabriquée dans le sud de l'Espagne, un endroit où jamais un tel ensemble n'avait été construit. Ce fut compliqué à réaliser, l'impression de légèreté du pavillon fut atteinte, grâce un ensemble de dispositifs dont celui appelé rostre, colonnes fines en acier inox qui reprenaient à chaque angle de la plaque les efforts à supporter ; le poids total étant de 500 tonnes, chaque fin poteau d'angle devait supporter de l'ordre de 160 à 180 tonnes de charge, réparties sur très peu de matière (**Figure 1E**) !

Une fois la toiture terminée, il ne restait plus d'argent pour habiller le bâtiment, et j'ai dû faire, mais cette fois pour des raisons financières, un nouveau détournement de matière en allant trouver le fabricant de toiles « Saint Frère », dont le patron m'avait dit : « *Écoutez, je ne peux pas vous aider mais je vous donne un camion de toile, je vous l'envoie, vous en faites ce que vous voulez* ». Nous avons donc reçu ce camion de toile à Séville et avons habillé le bâtiment comme un coussin, comme on le fait sur des vieux fauteuils avec des boutons qui permettent de tendre le tissu (**Figure 1D**). Cette expérience fut réussie, et j'ai retenu l'idée de l'utilisation de la toile pour concevoir quelques dizaines d'années plus tard un bâtiment à Lyon dont je parlerai plus loin (voir le paragraphe 5).

3 Le verre : peau du bâtiment ou élément de structure ? Un matériau vivant !

De tous les matériaux qui servent à construire, le verre est probablement celui qui depuis vingt ans a fait le plus de progrès. Le verre aujourd'hui n'a plus rien à voir avec celui utilisé au tout début de mon activité professionnelle d'architecte. Aujourd'hui, on y incorpore toute sorte d'autres composés ou matériaux, on le rend sensible à la lumière, on peut le rendre opaque, on le double, on le triple, on l'injecte, on y introduit toute sorte de lumières. Le verre est devenu une matière durable (**voir aussi le Chapitre de J. Ruchmann**), absolument merveilleuse, et que j'utilise abondamment dans les bâtiments.

C'est pour moi une manière de concevoir « la peau du bâtiment », un peu comme pour un corps humain, pour lequel on sait que la peau est essentielle car c'est par ce petit film que se font les échanges entre l'intérieur et l'extérieur. Le verre joue le même rôle sur les bâtiments que la peau sur le corps humain, il est donc fascinant de pouvoir travailler sur la question des échanges intérieur/extérieur.

Je recherche toujours dans l'architecture l'impression de vide, et cette idée me pousse à croire que je dois être capable de toujours faire progresser les structures dans ce sens pour susciter des émotions que l'on doit éprouver lorsqu'on regarde un bâtiment. Comme je suis avide d'expériences, j'ai donc

eu envie d'utiliser le verre pour faire de la structure : le verre ne pourrait-il pas sortir de son rôle de paroi isolante pour devenir un élément de structure ?

Deux occasions se sont présentées me donnant l'occasion d'exploiter deux merveilleuses propriétés de ce matériau pour réaliser mes rêves de beauté.

3.1. La place Vörösmarty à Budapest (Hongrie)

Le verre, que tout le monde imagine comme un matériau inerte, est en fait un matériau vivant : il flue. Et cette propriété me fascine depuis très longtemps : je l'ai découverte quand, encore étudiant, je venais observer l'immeuble de la Maison de la Radio de l'époque, construit par Henri Bernard. Je venais y admirer les feuilles de verre impressionnantes, alors les plus grandes du monde, certaines plaques atteignant onze mètres de hauteur.

Si vous regardez ces plaques avec attention, comme je l'ai fait à l'époque, vous verrez qu'elles n'ont plus la même épaisseur en haut et en bas : le verre, que l'on considère comme figé dans un état définitif, a « coulé » sous l'effet des forces de gravité, et il continue à couler sur sa propre peau et à l'intérieur de sa propre matière. Une sorte d'ampoule de verre dont l'épaisseur s'amplifie en permanence dans la partie basse des plaques.

Cette observation m'a conduit à penser que si le verre a cette capacité de couler et de se

déformer après avoir été refroidi, pourquoi ne pas utiliser cette propriété pour créer et maîtriser de nouvelles formes, et former une peau de verre sur un bâtiment ? C'est avec cet objectif que je suis parti construire un bâtiment à Budapest ; mais pour le réaliser, j'ai dû travailler en étroite coopération avec des chimistes et des industriels d'Augsbourg, la ville de Mozart. Nous avons décidé de faire fluer le verre à froid afin de donner aux plaques les formes que je désirais pour réaliser la peau du bâtiment. Après de nombreux essais, nous avons réussi à mettre au point un protocole : nous tirions sur ces plaques, juste avant la limite où elles se brisent pour obtenir la déformation souhaitée et nous stabilisons les formes obtenues par passage à l'autoclave à des températures et des pressions soigneusement déterminées par les spécialistes.

C'est ainsi que nous avons fabriqué la peau de verre de cet immeuble faite de plaques de verre flué, où vous voyez que les angles sont magnifiquement courbes (*Figure 4*). Certaines plaques ont une forme de tore conique, géométriquement compliquée. Mais une fois le protocole de traitement du verre établi, la complexité de la forme n'avait plus d'importance : nous étions capables de réaliser des moules selon le modèle géométrique choisi, dans lesquels nous appuyions les plaques de verre, et petit à petit en se déformant, ces plaques se fixaient dans la forme choisie. Ces effets tout à fait saisissants sur le



Figure 4

Immeuble mixte Vörösmarty, Budapest (Hongrie). Une deuxième double peau emballe l'immeuble sur ses trois côtés, dont l'armature s'élève depuis la rue et se galbe en toiture pour former un ample comble arrondi. La trame de cette structure tubulaire est redoublée aux niveaux des bureaux pour suspendre les écailles de verre, fixes ou mobiles, qui composent un vitrage respirant.



plan visuel ont pu être obtenus avec des verres ordinaires, donc à des coûts raisonnables, uniquement grâce au travail de mise au point des ingénieurs qui ont

accepté de m'aider : aucune autre matière n'a été ajoutée, juste des températures et des pressions bien choisies dans un autoclave et beaucoup de patience et de savoir-faire.

Cet exemple montre combien le verre est pour l'architecte un matériau plein de promesses pour l'avenir. D'ailleurs Franck Gehry, célèbre architecte américain, vient de livrer à New York Chelsea (2007), en bordure de l'Hudson, un bâtiment destiné à être le siège de IAC, une grande compagnie américaine, et qui utilise le même type de technologie de fluage à froid du verre. Mais il est allé encore beaucoup plus loin dans la complexité des formes puisqu'il a réussi à réaliser une série de cônes à double courbure tout à fait passionnante sur le plan architectural.

3.2. Le siège de France Télévisions à Paris

Une autre occasion d'explorer les possibilités du verre comme matériau de structure s'était présentée quelques années avant Budapest, quand j'ai construit le siège de France Télévisions à Paris sur les bords de Seine (*Figure 5*), et à l'intérieur duquel j'avais souhaité construire deux atriums entièrement bâtis en poutres de verre : l'atrium de France 2 et celui de France 3 (*Figure 6*). Mais comme nous avons du mal à calculer la capacité des poutres de verre à tenir les charges, j'ai dû préalablement résoudre ces difficultés de calcul par la modélisation de la structure : il m'a fallu faire de nombreux allers et retours entre l'expérimentation sur des maquettes prototypes et le calcul pour cerner peu à peu les performances d'une poutre de verre ; ce fut long et compliqué.

Pour satisfaire ce désir de vide, je voulais qu'à l'intérieur du petit atrium de France 2 on ait l'impression qu'il n'y avait pas de structure, que les passerelles tenues dans le verre, regardées du bas, donnent l'impression d'être suspendues dans le vide (*Figure 6*) ; effectivement il n'y a aucun élément de structure visible car tous les éléments sont en verre. Je n'ai pu réaliser ce défi qu'en travaillant en étroite collaboration avec les ingénieurs de Saint-Gobain (voir le *Chapitre de J. Ruchmann, Encart : « De Louis XIV à nos jours : les origines du verrier Saint-Gobain »*) car leur verres n'avaient jamais été utilisés ni pour cet usage, ni dans ces conditions. Ce fut long et cela nécessita beaucoup de calculs et d'expérimentations. Pour atteindre ce but, nous avons dû casser beaucoup de verre pour vérifier la tenue des poutres à la charge. Ce qui est très amusant au début sur des maquettes devient impressionnant quand il s'agit d'une poutre de verre d'un mètre de haut que l'on doit faire exploser pour voir jusqu'à quel point elle résiste à la charge. Nous avons donc fait tous les tests nécessaires pour fournir des preuves indiscutables de la capacité de nos poutres de verre à tenir les efforts qui leur seraient imposés. Ces tests sont obligatoires pour le bureau de contrôle qui garantit auprès des assurances la sécurité du bâtiment. Je voudrais raconter une anecdote qui montre que les précautions prises l'ont été de manière exagérée. Malgré tous les contrôles de solidité de la

structure de verre que nous avons effectués, une fois que tout a été magnifiquement et spectaculairement mis en place, il nous a été demandé de lui rajouter (je dirais plutôt de la dénaturer) une structure de protection métallique, au cas où elle casserait ! Un exemple qui témoigne combien la France, parmi les autres pays européens, est l'un des seuls à prendre autant de précautions par rapport aux nouvelles technologies. C'est bien dommage pour la beauté de ce bâtiment

car cette structure ajoutée de métal, dont l'observateur ne comprend pas la raison, masque l'effet spectaculaire de la structure de verre et le travail qui a été investi pour réaliser cette performance.

Cette question de l'innovation et des précautions qui y sont liées est centrale dans le travail de création que nous faisons tous sans doute tous les jours, et nous en verrons un autre exemple avec le Pôle de loisirs et de commerces Lyon Confluence (paragraphe 5).

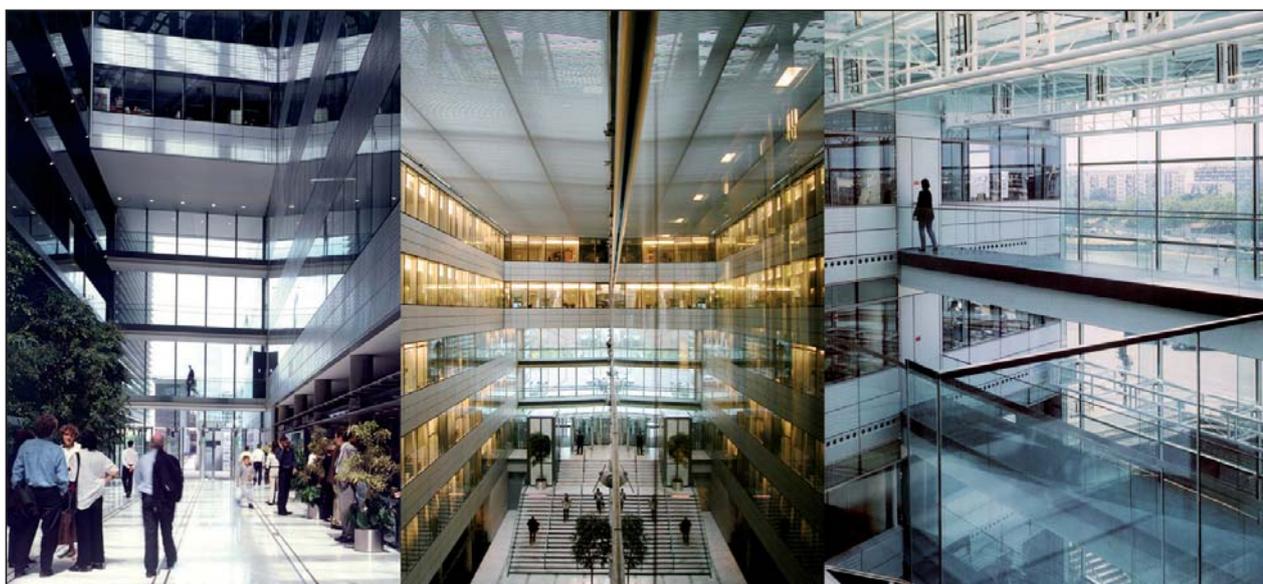


Figure 5

L'esplanade Henri de France et le siège de France Télévisions à l'arrière-plan (Paris).

Figure 6

France Télévisions, atrium.



4 Le marbre : un matériau à mémoire de forme qui s'étire

Souvenons-nous il y a quelques années à Paris des plaques de marbre de bâtiments récents tombant dans la rue. Nous avons aussi été témoins de ces filets posés sur les façades d'immeubles parisiens pour empêcher les plaques de marbre de se décrocher et de tomber. Nous nous demandions pourquoi 2 000 à 3 000 ans après la découverte des carrières de Carrare, ce marbre si souvent utilisé se met brusquement à se décrocher des façades ?

La question a été posée aux chimistes, et l'une des explications a été que dans ces carrières, explorées depuis tellement longtemps, les pierres doivent maintenant être prélevées à des profondeurs de plus en plus grandes, donc probablement dans des endroits où la pierre, pour se former, a été soumise à des pressions et à des températures plus élevées. Quand

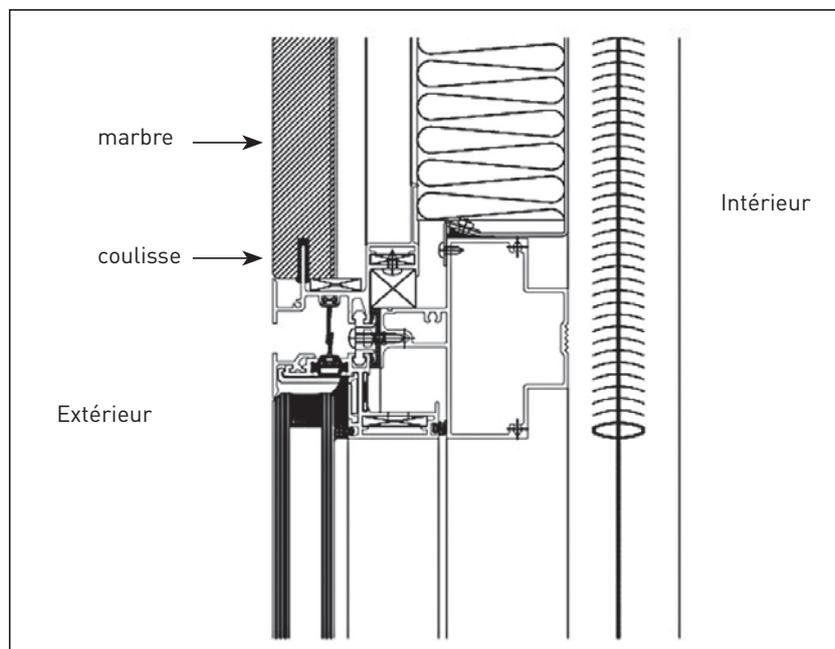
nous découpons ces plaques de marbre pour en faire des plaques pour la construction, la matière conserve la mémoire de la pression et de la température à laquelle elle a été formée, une sorte de mémoire de forme qui lui donnerait l'envie de s'étirer comme nous le faisons au lever du matin. Et lorsque cette pierre est fixée sur des éléments métalliques verticaux qui l'empêchent de s'étirer, son seul choix est de se bomber, de se courber ; arrêtée par ces éléments métalliques, elle se tend jusqu'à atteindre une courbure tellement exagérée que la pierre se brise et tombe dans la rue.

Ce phénomène a été observé par les architectes avec beaucoup d'inquiétude, d'autant que mon client pour France Télévisions, m'avait dit : « *Je veux du marbre* ». J'ai donc dû trouver du marbre qui n'ait pas trop l'envie de s'étirer et qui soit blanc. J'en ai finalement trouvé au nord d'Athènes, le célèbre marbre de Thassos qui a servi à construire l'Acropole et qui est beaucoup plus facile à extraire, car moins profond que celui de Carrare.

Mais pour néanmoins prévoir une éventuelle dilatation, nous avons préféré imaginer un système qui permette au marbre, s'il en avait envie, de s'étirer sans se briser : au lieu de le fixer sur des points immobiles, nous l'avons fixé sur une réglette coulissante ; ainsi, si le marbre a envie de bouger, il glisse et coulisse sur cette réglette métallique, ce qui lui permettra de se mettre dans la position qui lui convient le mieux sans se briser (*Figure 7*).

Figure 7

Détail de la façade lisse France Télévisions, Paris 15^e.



5 Un polymère fluoré, coussin de lumière pour un toit

Lyon Confluence

Après le marbre, changeons de siècle et abordons l'usage de matériaux nouveaux totalement issus de la chimie comme l'éthylène tétrafluoroéthylène (EFTE, *Encart* : « *L'EFTE, un matériau magique pour une architecture magique* »). C'est un polymère issu de l'industrie du fluor. Il est fabriqué par la société américaine DuPont de Nemours sous forme d'une fibre tissée qui ressemble un peu à de la toile d'abat-jour. Ce matériau très résistant, qui est insensible aux ultra-violets, ne jaunit pas, et si l'on y met le feu, se sublime. C'est donc un matériau *a priori* formidable pour l'architecte, à condition de trouver la forme sous laquelle l'utiliser. Mais nous l'avons vu, c'est souvent de la rencontre du chimiste et de l'architecte dans une perspective de création que naissent les idées intéressantes. Pour utiliser ce matériau en architecture, il faut pouvoir obtenir de grandes surfaces résistantes. L'idée a été ici de faire appel aux techniques de nos mamans, qui savaient coudre les matériaux en zigzag, comme sur nos pantalons autrefois pour résister aux efforts. De la même manière, ce matériau a été cousu en zigzag pour lui donner une résistance très forte à la traction, puis assemblé sous forme d'un coussin à l'intérieur duquel est soufflé de l'air à environ 1,5 bar avec un simple ventilateur, de façon à le gon-

fler. Nous avons obtenu un coussin sublime, beau à voir, avec lequel on peut réaliser ainsi une toiture étanche, isolante du froid, de la pluie et du vent, d'une portée de 30 à 50 mètres, et sur lequel on peut marcher, ce qui est absolument magique (*Figure 8*) ! Nous avons donc découvert une nouvelle façon totalement inattendue de faire les toitures pour les bâtiments, simplement en assemblant une toile fabriquée aux États-Unis, grâce à une technique de couture. À partir de cette opération qui au départ devait être expérimentale, ce sont finalement deux hectares de toitures qui ont été montés avec ce matériau, pour couvrir un espace de commerce et de loisirs avec des cinémas, des commerces, des restaurants construits sur la presque-île entre la Saône et le Rhône à Lyon, à Lyon Confluence (*Figure 8*). Cette toiture d'aspect tout à fait inattendu est très ludique et inscrit ce bâtiment dans les nouvelles normes de durabilité et d'écologie : il n'est en effet plus nécessaire de fermer ce mail commercial, qui ainsi ne consomme plus d'énergie pour son utilisation et n'utilise que des matériaux recyclables.

Mais une fois encore, les bureaux de contrôle sont passés par là et nous ont imposé l'ajout d'une structure en métal en dessous, dans l'hypothèse où la toile s'effondrerait, bien que cette toile gonflée ne présente aucun danger potentiel car s'il y avait un problème, elle s'affaisserait tout simplement. De plus, un simple calcul montre que les deux tiers du métal de cette



Figure 8

Le Pôle de loisirs et de commerces Lyon Confluence.

plateforme de sécurité imposée sont inutiles pour tenir cette toiture.

Une autre amélioration spectaculaire de l'usage de ce toit en EFTE a été, en plaçant sur chaque partie basse de la voûte des petites lampes LED qui consomment peu d'électricité, d'éclairer l'ensemble du toit par un véritable bain de lumière et de couleurs. Nous avons obtenu cet effet en imprimant sur la toile une petite sérigraphie de points blancs qui captent la lumière des LED, la diffusent et la diffractent à l'intérieur du coussin, en conduisant à des images fascinantes. Ce mail et le centre commercial seront ouverts au public en 2012.

Lyon Confluence illustre donc à merveille, à travers l'exemple de l'EFTE, l'intérêt de la rencontre entre le chimiste et l'architecte, et comment un matériau qui sort

brut des usines de chimie peut être détourné en architecture pour en faire des toitures originales, belles et durables.

6 Le renouveau du bois : un matériau vivant auquel on s'attache

Le bois est un matériau fantastique qui a beaucoup servi dans l'architecture, puis qui a totalement disparu et que l'on redécouvre aujourd'hui.

C'est à Montpellier que j'ai trouvé des clients pour partager avec moi le désir de réutiliser ce matériau pour faire des structures, et prêts pour cela non seulement à investir sur le plan financier, mais aussi dans les essais nécessaires pour l'adapter aux besoins et aux normes.

Nous avons donc décidé de lancer la construction d'un immeuble de neuf étages, le premier immeuble de France

L'EFTE, UN MATÉRIAU MAGIQUE POUR UNE ARCHITECTURE MAGIQUE

L'éthylène tétrafluoroéthylène, plus fréquemment connu sous son abréviation ETFE, est un polymère fluoré thermoplastique (il se ramollit sous la chaleur) (**Figure 9**). C'est un copolymère alterné éthylène/tétrafluoroéthylène.

Ce matériau semi-cristallin est utilisé comme alternative au verre. De densité 1,7, il est plus léger que le verre (densité du verre : 2,5) et transmet de manière plus efficace la lumière.

Il est capable de supporter 400 fois son poids. De plus, il a une grande résistance à l'usure et est utilisable dans une large gamme de température (de -80 à 155 °C). À la différence du verre, il peut être transformé par injection : la matière plastique est ramollie puis injectée dans un moule, avant d'être refroidie dans la forme souhaitée.

Enfin, l'ETFE est recyclable.

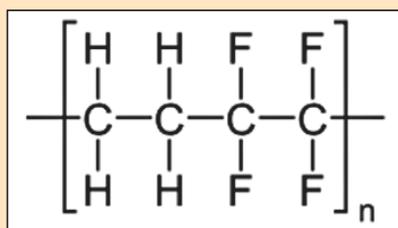


Figure 9

Structure chimique de l'ETFE.

réalisé tout en bois. Théoriquement, cela était effectivement possible car le bois est capable de tenir la charge pour supporter neuf étages, mais en fait cela n'était pas si simple car le bois est aussi un matériau qui craque, se tasse et s'entretient.

Nous avons dû prévenir les acheteurs que pendant les premiers mois après la construction, les différents éléments de la structure, les poutres, les solives, les panneaux, allaient devoir progressivement trouver leur place avec les autres matériaux, et que les habitants entendraient l'immeuble gentiment craquer ; on pouvait même prévoir qu'il allait se tasser d'environ deux centimètres sans bien sûr le moindre risque de désordre.

Nous leur avons donc proposé de peindre l'immeuble dans une jolie gamme de rouges (**Figure 10**), la même palette mode que celle des rouges à lèvres et rouges à ongles

de Guerlain, en utilisant des couleurs permanentes.

Et, alors que beaucoup achètent des logements pour faire des investissements financiers, parfois même sans regarder où ils sont situés, nous avons observé l'inverse : les acheteurs de nos appartements se sont approprié leur immeuble de bois, prêts à en accepter toutes les contraintes ; ils se sont mis à l'aimer, prêts à l'entendre craquer et à l'entretenir régulièrement. Et les soixante appartements se sont tous vendus, avec un succès populaire extraordinaire qui montre l'attachement touchant et utile du public pour l'innovation et la recherche de beaux matériaux.

Dans cet immeuble à structure de bois, l'architecte a joué le rôle d'assembleur dans la définition japonaise ; le bois est certes le chef d'orchestre, c'est lui qui règle la structure, mais la base de l'immeuble, pour être horizontale, repose



Figure 10

*Immeuble de logements,
Montpellier.*

sur un socle de béton matriciel et il y a des contreventements métalliques pour tenir et raidir la structure (**Figure 10**).

7 Le béton : un matériau de haute technologie qui peut aussi être un moyen d'expression poétique

7.1. Cœur Défense

Tout comme le verre, le béton fait partie des matériaux qui ont fait de grands progrès

techniques depuis ces vingt dernières années. Il y a vingt cinq ans, je travaillais avec des bétons dont les résistances à la pression étaient de l'ordre de huit à dix mégapascals, c'est dire qu'il fallait beaucoup de béton pour tenir un gros effort. Quand j'ai bâti, en 2001, les tours de Cœur Défense (**Figure 11**), la résistance montait jusqu'à 200 mégapascals. Ainsi, en dix à quinze ans, la résistance du béton avait été multipliée par vingt.

Le béton est un assemblage complexe : il n'est jamais utilisé seul. Ce matériau est lui-même un amalgame de différentes matières. Ses performances techniques ont augmenté parce qu'on a su diminuer la taille des agrégats qui le constituent, y incorporer des fibres, des fumées de silice... (**voir aussi les Chapitres d'A. Ehlacher et de J. Méhu**). Mais cela ne suffit pas à tout expliquer ; le béton est un matériau que l'on assemble avec de l'acier, et c'est cet assemblage de l'acier et du béton qui conduit à l'amélioration des performances. L'acier travaillant magnifiquement bien à la traction, et le béton magnifiquement bien à la compression, l'assemblage de ces deux capacités conduit à des matériaux magiques pour l'architecture, avec lesquels on peut obtenir des portées immenses pour de très faibles sections. Ces sections, grâce aux progrès récents de la recherche, s'affinent de jour en jour puisqu'aujourd'hui on annonce l'arrivée de bétons résistants à des pressions de 400-500 mégapascals qui pourront être utilisés de



manière courante sur les chantiers.

L'architecture est un art de terrain, l'esprit d'invention doit porter non seulement sur la constitution des matières qu'elle utilise, mais aussi sur la façon de les mettre en œuvre, c'est-à-dire de construire. Par exemple à Cœur Défense, nous construisions un étage de tour tous les quatre jours, c'est-à-dire que nous avions à organiser une rotation des machines mettant en œuvre les matériaux qui permettait tous les quatre jours de monter d'un étage, ce qui représente aussi un bel effort technique (*Figure 11*).

7.2. Le site du pont du Gard

Le béton n'est pas seulement un matériau de haute technologie utilisé pour faire des structures, c'est aussi un ma-

tériau ancien qui a une histoire. Le béton était déjà connu des Romains qui savaient parfaitement le travailler. Le béton romain était de la chaux mélangée avec des agrégats de marbre.

Je me suis intéressé au béton romain quand on m'a demandé de construire un musée sur le site archéologique du pont du Gard (*Figure 12*). Le pont du Gard est cet aqueduc spectaculaire, construit par les Romains en 17 après J.-C. pour transporter de l'eau sur 50 kilomètres entre Uzès et Nîmes, avec 17 mètres de dénivelé. Franchir 50 kilomètres avec si peu de dénivelé représente un exploit, et ce d'autant plus que la topographie des lieux est très compliquée ; il faut franchir des collines, traverser des ravins dont le plus spectaculaire est cette faille du Gardon, de 300 mètres

Figure 11

Chantier de Cœur Défense, la Défense.



Figure 12

Le pont-aqueduc du Gard (A) et son site touristique (entrée) (B).

d'ouverture sur 50 mètres de haut. Mais les Romains l'ont fait : ils ont construit ce magnifique pont du Gard, qui n'est pas simplement un ouvrage d'ingénierie mais un ouvrage d'art classé aujourd'hui au patrimoine de l'UNESCO.

Construire un ouvrage aussi gigantesque pour transporter de l'eau sur 50 kilomètres alors que le pays est plein de sources, de fontaines et de puits artésiens, amener de l'eau à Nîmes où il y en a déjà peut sembler étonnant. Mais en fait, ce n'est pas de l'eau que les Romains amenaient sur 50 kilomètres, mais de l'énergie : c'était la première fois que les Romains utilisaient 17 mètres de dénivelé pour créer l'eau sous pres-

sion. Cette énergie, que les Romains ont amenée dans la ville de Nîmes, a servi à nettoyer les égouts, à faire fonctionner les thermes, à faire jaillir les fontaines, à faire monter l'eau dans les étages des maisons, et grâce à ce magnifique ouvrage.

Ma mission était donc de rendre hommage, à travers un musée, à cette manifestation de l'intelligence humaine. Mais le défi était aussi d'intégrer ce bâtiment dans un superbe site classé au patrimoine de l'UNESCO, où tout est protégé et où il ne faut pas déplacer le moindre caillou sans des précautions gigantesques.

J'ai donc décidé que ce musée serait comme une nouvelle

pierre posée dans ce site magnifique, et que pour mieux s'intégrer, cette pierre serait constituée d'un béton dont les agrégats seraient pris dans la rivière qui coule sur le site : le Gardon. Et pour que la couleur de « cette pierre » s'harmonise avec celle des pierres naturelles, tous les autres composants du béton ont été trouvés localement : les sables roux dans le sol du site, la chaux et les autres matières dans la région. J'ai dû aller au Portugal chercher des ouvriers qui savaient encore sabler le béton pour enlever les laitances de surface et le travailler dans la masse de façon artisanale ; mais nous avons réussi à fabriquer un béton en harmonie avec le site, une matière touchante par son humanité et son rapport à la lumière (**Figure 12B**). Cet exemple montre que le béton n'est pas uniquement un matériau de structure et que l'innovation pour l'architecte ne consiste pas uniquement à voir augmenter sa résistance à des portées de plus en plus grandes. L'innovation dans sa fabrication peut être aussi un moyen de lui faire exprimer les qualités de l'âme humaine.

7.3. Méditerranée, Marseille

J'ai eu sur un chantier de Marseille une autre expérience du même type, où j'ai obtenu un béton blanc symbole des bords de la Méditerranée (**Figure 13**).

7.4. La tour Maroc Telecom, Rabat

Je voudrais terminer par un dernier exemple qui montre



ce que l'architecte peut faire exprimer à ce matériau : c'est celui d'une tour actuellement encore en cours de construction dans le centre de Rabat (**Figure 14**). Rabat est une ville royale où d'une part les tours n'y sont en général pas autorisées, où la tour la plus grande doit rester la tour Hassan, symbole de la légende de la fondation de ce pays. Cette tour, dont la réalisation m'a été confiée, a donc fait l'objet de nombreuses discussions préalables et il m'a été demandé de réaliser un ouvrage à la fois exemple de performances technologiques

Figure 13

Chantier de Cœur Méditerranée, Marseille.

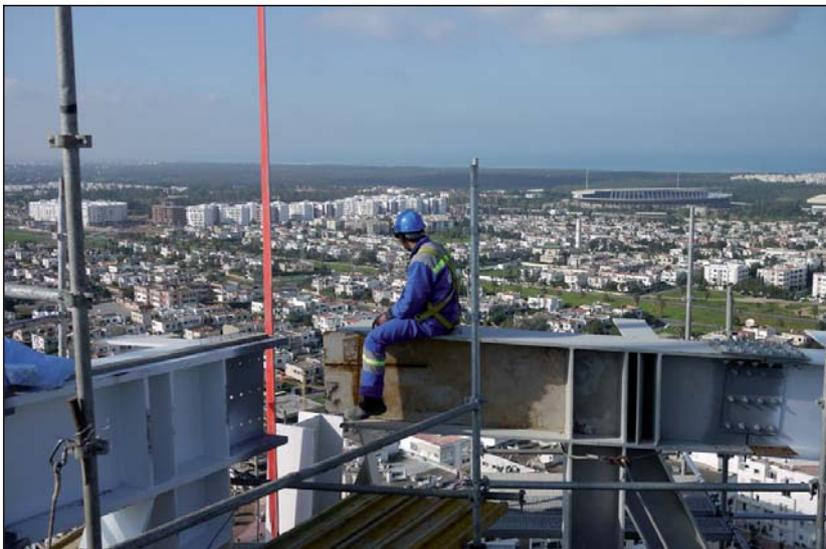
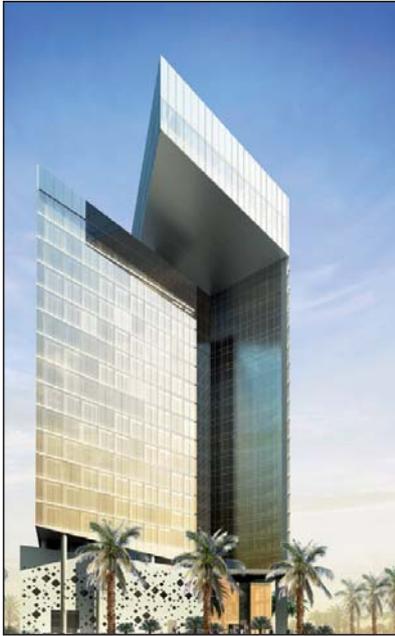


Figure 14

La tour Maroc Telecom.

mais qui soit aussi un symbole montrant, par l'architecture, la réussite de mon client Maroc Telecom.

J'ai réalisé un assemblage d'acier et de béton, et je crois que la photo de cet ouvrier

marocain (**Figure 14**), sur ce bâtiment en construction, au bout de sa poutre, montre par la fierté qu'il exprime, assis aussi haut dans les airs, que ce pays est entré dans la modernité.

Architecte et chimiste, ensemble pour l'utilité, la durabilité et la beauté des matériaux

Pour respecter les trois dimensions de l'architecture – le beau, le durable et l'utile –, l'architecte doit en permanence explorer la palette des matériaux qui lui est offerte : par la nature, comme le bois ou les matériaux naturels anciens que l'on redécouvre, et par l'homme, qu'ils soient issus de sa longue histoire comme le verre ou le béton, ou résultent des plus récents progrès de son industrie comme l'exemple des polymères fluorés.

DE L'ARCHITECTURE À LA CHIMIE : DU DÔME DE GÉODÉSIQUE AUX FULLERÈNES

Molécule en forme de ballon de football, le fullerène (C₆₀) a été découvert en 1985 par Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley (prix Nobel de chimie 1996). Il est composé de douze pentagones et vingt hexagones, chaque sommet correspondant à un atome de carbone et chaque côté est une liaison covalente. De structure identique au dôme géodésique, il est appelé « buckminsterfullerène », en hommage à l'architecte Richard Buckminster Fuller qui a conçu ce dôme (**Figure 15**).

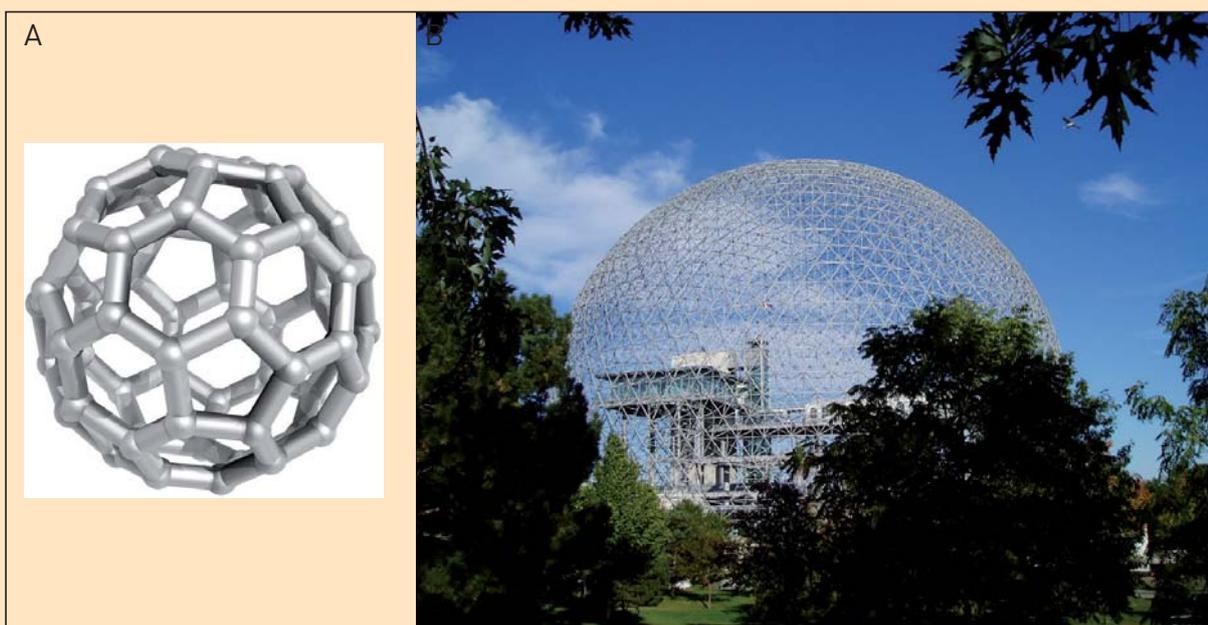


Figure 15

A) Le fullerène (C₆₀) ; B) la biosphère de Montréal. Pavillon américain de l'Exposition Universelle de 1967 à Montréal. Par R. Buckminster Fuller.

Ce chapitre nous montre que les créations de l'architecte s'enrichissent non seulement des progrès technologiques, mais aussi des échanges qu'il peut avoir avec les chimistes qui créent ces matériaux ou qui l'aident à en comprendre et en maîtriser les propriétés pour les adapter aux besoins, à sa propre créativité, et à les mettre en œuvre pour procurer du plaisir en même temps que de l'usage.

L'architecte travaille à exalter la beauté et même la poésie des matériaux créés par le chimiste, et à les pérenniser utilement et durablement.

La même recherche de la beauté d'une structure anime l'architecte et le chimiste. C'est sans doute pour cela que l'une des plus belles et plus récentes molécules créées par les chimistes, le fullerène, porte ce nom en l'hommage à un architecte célèbre, Richard Buckminster Fuller, et à son magnifique dôme en forme de gigantesque ballon de football dont les faces sont des hexagones et des pentagones (***Encart : « De l'architecture à la chimie : du dôme géodésique aux fullerènes »***).

Crédits photographiques

Fig. 1A, B, C, D et E : Véronique Paul.

Fig. 1F : François Seigneur pour l'agence Jean-Paul Viguié et Jean-François Jodry et Associés.

Fig. 1G, 7, 10 et 14 : Jean-Paul Viguié et Associés.

Fig. 4 : Christian Michel.

Fig. 5 et 6 : Georges Fessy.

Fig. 8 : Renaud Araud.

Fig. 12 : Xavier Testelin et Pierre Bourdis.

Fig. 15A : Licence CC-BY-SA-3.0, Yassine.

Fig. 15B : Licence CC-BY-SA-3.0, Eberhard von Nellenburg.