

sommaire

- 8 Préface de Gilles Bœuf
- 12 Avant-propos de Dame Ellen MacArthur
- 15 **INTRODUCTION**
- 25 **CHAPITRE 1**
Comment pouvons-nous bâtir des structures plus efficaces ?
- 73 **CHAPITRE 2**
Comment fabriquerons-nous les matériaux ?
- 105 **CHAPITRE 3**
Comment créerons-nous des systèmes zéro déchet ?
- 125 **CHAPITRE 4**
Comment gérerons-nous l'eau ?
- 141 **CHAPITRE 5**
Comment contrôlerons-nous les ambiances thermiques ?
- 161 **CHAPITRE 6**
Que nous apprend la biologie sur la lumière ?
- 173 **CHAPITRE 7**
Avec quelle énergie alimenterons-nous les bâtiments ?
- 189 **CHAPITRE 8**
Synthèse
- 213 **CONCLUSION**
Que signifie le biomimétisme pour les êtres humains ?
- 218 Appliquer le biomimétisme : guide pratique pour les architectes
- 223 Lectures complémentaires
- 225 Crédits iconographiques
- 226 Remerciements
- 228 Postface de Kalina Raskin et Bruno Lhoste

Il peut paraître *a priori* étrange de relier biodiversité, bien-être humain, architecture et biomimétisme. Mais à l'analyse, ce lien s'impose.

En octobre 2007, l'humanité basculait d'un monde essentiellement rural à un monde citadin : pour la première fois, nous étions plus nombreux dans les villes que dans les campagnes! Cela n'a pas été sans révolutions sociales dans des pays d'Afrique, d'Amérique latine ou d'Asie. L'humain s'agglutine dans des villes de plus en plus transformées en mégalofoles. La plupart sont situées en bord de mer : plus de la moitié de l'humanité vit actuellement à moins de 50 km de l'océan...

Dans ce contexte, comment recréer une relation harmonieuse entre humain et non-humain? Entre humain et « nature » dit-on souvent... au risque de sortir l'humain de cette nature, dont il fait pourtant intimement partie. C'est ici que l'architecture et le biomimétisme jouent un rôle déterminant! Quel type de villes voulons-nous? Dans quelles conditions voulons-nous vivre? La vie urbaine a participé de la coupure entre citadin et nature: certains enfants ne savent même plus ce qu'est une forêt ou une plage, ou encore que ce sont les vaches qui nous donnent du lait! Comment avons-nous construit ces villes? Sommes-nous aujourd'hui capables de juguler leur multiplication et leur étalement, alors que la démographie est galopante – la population mondiale a quadruplé en moins d'un siècle – et que le climat change trop vite? Comment seront développés les flux constants des denrées alimentaires de la campagne vers la ville? Comment va-t-on contrôler l'artificialisation massive des sols (en France, nous perdons l'équivalent d'un département tous les 7 ans)? Et surtout, comment ville et architecture vont-elles s'entrelacer pour résoudre ce nouveau défi qui se présente à nous: accueillir tous ces migrants en provenance des campagnes, les alimenter et leur offrir du bien-être?

Les prévisions climatiques du GIEC ne sont pas réjouissantes. Que fera-t-on à Paris durant l'été 2050 si la température y dépasse les 50 °C? Comment éviter de tels îlots de chaleur? Comment thermoréguler une ville dans des conditions énergétiques acceptables?

En fait, l'architecture a plusieurs missions:

- Conserver le patrimoine ancien (l'incendie de Notre-Dame de Paris est emblématique à ce propos),
- Développer un habitat agréable et soutenable, malgré les trop nombreuses erreurs du passé,
- Contribuer aux économies d'énergie grâce à au choix des matériaux, à l'isolation thermique, à la neutralité carbone, voire même au stockage du CO₂,
- Harmoniser logements et activités économiques diverses,
- Favoriser la verticalité et mettre un terme à l'artificialisation infinie de la périphérie des villes,
- Multiplier les initiatives pour que le vivant revienne en ville.

préface

De nombreux projets architecturaux intègrent déjà ces objectifs pour réduire le mal-être des habitants et résoudre les problèmes liés à la concentration urbaine. Comment l'architecture peut-elle contribuer à reconstruire une relation harmonieuse entre le citadin et le vivant non humain? Certainement en développant les trames «vertes» et «bleues» grâce aux fleuves, aux bords de mer ou à la végétation, et au retour du «sauvage» en ville. À Paris, le programme de sciences participatives Vigie-Nature intitulé «Sauvages de ma rue» a fait ses preuves. Il a été démontré que le seul accès régulier à des parcs boisés améliore considérablement l'état de santé des citadins et «gomme» en partie les inégalités sociales – au bénéfice de ceux qui ne peuvent échapper à la ville quelques semaines chaque année. Quant aux arbres, ils réduisent les pics de température. Alors, pour le bien-être des citadins, ne faudrait-il pas cultiver davantage de complicité entre architectes et écologues?

Comment améliorer nos réponses techniques aux problèmes actuels par des solutions inspirées du vivant? Car le vivant innove en permanence, pour tous, et il le fait avec une grande parcimonie d'énergie, sans créer de nouvelles substances qu'il ne sait dégrader, comptant toujours un «acheteur pour ses déchets». Il innove en optimisant et c'est pourquoi nous devons changer nos méthodes actuelles pour nous adapter. Aucune espèce ne s'est jamais adaptée sans changer!

Alors, pourquoi ne miserions-nous pas, comme le fait dans cet ouvrage Michael Pawlyn, sur une architecture totalement inspirée par le vivant? C'est de mon point de vue la seule option pour que la ville redevienne soutenable, et qu'humains et non-humains puissent y vivre en harmonie.

Gilles Bœuf,

*Professeur à Sorbonne Université,
Président du conseil scientifique de l'Agence française pour la biodiversité,
Ancien président du Muséum national d'Histoire naturelle,
Professeur invité au Collège de France,
Ancien Conseiller scientifique au ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer.*

préface

Dans ce livre remarquable, Michael Pawlyn défend l'idée que la construction et l'architecture doivent être au cœur d'un futur bio-inspiré et biomimétique. Mais cet ouvrage est bien plus que cela. Il expose des principes et des actions pour le ^{xxi}^e siècle et nous permet de considérer le monde sous un autre prisme : celui de la vision systémique, qui peut rendre possible la transition vers une société régénératrice, inclusive et prospère.

Michael fait sienne l'ambition de R. Buckminster Fuller : « Faire en sorte que l'humanité tout entière trouve sa place dans le monde, le plus rapidement possible, en coopérant spontanément, sans nuire à l'environnement et sans désavantager quiconque. » Mais cette citation ne décrit en rien les moyens d'action. À l'inverse, *Biomimétisme et architecture* abonde d'exemples de changements à l'œuvre dans l'usage des matériaux, les structures, l'énergie, les fonctions et les formes qui s'inspirent des systèmes vivants, pour apporter de vraies solutions.

Nous entrons dans une ère où la connaissance se substitue à la matière. Dans le vivant, pour ne citer que quelques exemples parmi les plus fascinants de ceux qui sont présentés, « les structures hiérarchiques » s'opposent aux « structures monolithiques », « l'auto-assemblage sous l'influence du milieu » à « la forme imposée de l'extérieur », et il n'est fait usage que « d'un sous-ensemble très restreint d'éléments non toxiques » tandis que nous recourons à la totalité des éléments du tableau périodique !

On parcourt cet ouvrage avec un sentiment d'exaltation et d'ouverture du champ des possibles, car Michael y aborde d'autres thèmes que ceux des matériaux, des espaces et de leurs relations en plaçant l'humain au cœur de sa démarche : « La transposition du paradigme biologique à l'architecture implique de replacer l'humain au centre : en ayant recours à son ingéniosité durant la phase de conception, en l'impliquant dans l'acte profondément gratifiant de la construction, enfin, en lui permettant d'en apprécier la beauté. » Par cette hauteur de vue,

il peut sans nul doute être considéré comme le digne héritier d'autres pionniers renommés tels que Christopher Alexander et Victor Papanek.

Le ^{xxi}^e siècle restera probablement dans l'histoire humaine comme celui de la transition, pas seulement de l'environnement bâti, mais de toute l'économie. Pour satisfaire avec élégance et efficacité les besoins de 9 milliards d'êtres humains, le mode opératoire de toute l'économie doit être modifié en profondeur. L'économie circulaire, un modèle qui me passionne, est une autre expression de la même transition stimulante que Michael a identifiée : celle de l'ère industrielle et de sa vision linéaire et mécaniste « extraire-fabriquer-jeter » vers une ère où les opportunités résideront de plus en plus dans des systèmes en boucle fermée, riches en feedback. Plus important encore, ce nouvel âge devrait nous apporter des formes de prospérité inédites, en nous libérant des contraintes liées aux matériaux et à l'énergie. Lire *Biomimétisme et architecture* est essentiel pour aborder ensemble cette transition.

Dame Ellen MacArthur

avant-propos

introduction

Que faire pour que nos sociétés deviennent réellement durables? Les améliorations progressives des performances et l'atténuation des impacts environnementaux négatifs suffiront-elles? Ou bien serons-nous obligés de fixer à l'ensemble de l'humanité des objectifs plus ambitieux? Je montrerai dans ce livre que le biomimétisme, un mode de conception qui s'inspire des réponses que les organismes biologiques ont apportées à différents problèmes fonctionnels, est une des meilleures sources de solutions pour construire un avenir positif et mener à bien la transition de l'âge industriel vers celui de l'écologie. L'avènement d'une nouvelle ère pour l'humanité est tout à fait possible et nous disposons déjà de toutes les solutions ou presque pour y parvenir.

Si le biomimétisme modifie de plus en plus notre manière de construire, ce que je pense qu'il doit faire, alors, dans les prochaines décennies, nous pouvons créer des villes saines pour leurs habitants et régénératrices pour leur arrière-pays, des bâtiments à la fois économes en ressources et agréables à utiliser comme lieux de vie ou de travail et des infrastructures intégrées aux systèmes naturels. La culture humaine multiséculaire peut continuer à s'épanouir à condition qu'elle apprenne à vivre en harmonie avec la biosphère. Cet ouvrage n'évoque pas une Arcadie inaccessible, mais propose une feuille de route fondée sur des données scientifiques rigoureuses qui peut être traduite en une réalité tangible grâce à l'imagination humaine.



1. Les coccolithophorales, des micro-organismes marins, construisent leur squelette à partir de carbonate de calcium issu d'éléments présents dans l'eau de mer. On pense qu'ils appartiennent au cycle du carbone de très long terme de la Terre. Durant les périodes géologiques, lorsque le dioxyde de carbone atmosphérique a augmenté, les coccolithophorales se sont beaucoup développés et, une fois morts, se sont déposés sur le fond marin pour former des couches de calcaire, transférant ainsi du carbone depuis l'atmosphère à la lithosphère. L'humanité est confrontée à une vitesse d'augmentation du taux de dioxyde de carbone bien supérieure à ce qu'il est advenu jusqu'à présent et au-delà de ce qui peut être compensé par des mécanismes correctifs semblables à l'action des coccolithophorales.

Selon moi, il n'est pas de meilleure définition de mission que celle de R. Buckminster Fuller : « Faire en sorte que l'humanité tout entière trouve sa place dans le monde, le plus rapidement possible, en coopérant spontanément, sans nuire à l'environnement et sans désavantager quiconque¹. » Comment y parvenir ? Trois changements interdépendants majeurs devront être opérés :

- utiliser les ressources de façon radicalement plus efficace² ;
- faire passer les bases de notre économie des combustibles fossiles au solaire ;
- transformer le modèle linéaire actuel en un système totalement circulaire, où toutes les ressources sont gérées en boucles fermées et où rien n'est perdu.

Des objectifs ambitieux ? Certainement. Mais si nous décidons d'y travailler, alors il n'y a pas pour moi de meilleure démarche que le biomimétisme pour nous aider à découvrir les solutions dont nous avons besoin.

Biomimétisme et architecture décrit la richesse de cette démarche. En appliquant le biomimétisme, nous tirons parti d'une mine d'idées issues de 3,8 milliards d'années de recherche et développement : cette source, ce sont les multiples espèces qui ont survécu à la sélection naturelle. Les organismes biologiques incarnent des procédés qui, dans bien des cas, résolvent des problèmes analogues aux nôtres, mais avec une plus grande économie de moyens. Les êtres humains ont accompli des choses remarquables, comme la médecine moderne et la révolution numérique, mais lorsque l'on étudie certaines des adaptations extraordinaires mises en œuvre dans la nature, un sentiment d'humilité nous envahit face à tout ce qu'il nous reste à apprendre.

Pourquoi est-ce maintenant le bon moment pour le biomimétisme ? Les êtres humains ont sans doute été fascinés par la nature depuis

le début de leur existence sur Terre. Mais aujourd'hui, nous sommes en mesure de revisiter les avancées en biologie avec d'énormes atouts : une connaissance scientifique qui ne cesse de s'étendre, des outils numériques jusqu'à présent inimaginables et un sens de l'esthétique qui s'est émancipé des conventions stylistiques. Une aussi belle occasion ne s'est jamais présentée pour que les architectes repensent leur art et améliorent la qualité de vie de leurs contemporains, tout en restaurant la relation à notre planète commune, ce « vaisseau Terre³ » selon les termes de R. Buckminster Fuller.

Comme le dit François Jacob⁴, le vivant bricole avec l'existant et produit des solutions non optimales⁵, tandis que les êtres humains sont capables de créations complètement originales. Toutefois, à travers la sélection naturelle, la nature offre les aboutissements d'un processus d'amélioration s'étendant sur des milliards d'années. Le biomimétisme n'est ni thèse ni antithèse, mais synthèse entre les capacités inventives des êtres humains et les meilleures solutions biologiques⁶. Le résultat dépasse en puissance chacune des composantes prise isolément.

Cet ouvrage décrit l'étendue des solutions disponibles issues du biomimétisme, la façon dont les architectes les mettent actuellement en œuvre et à quelle échelle elles pourraient être appliquées. En vue de l'édification des bâtiments et des villes du nouvel âge de l'écologie, un résumé méthodologique pour appliquer efficacement le biomimétisme est proposé en fin de parcours.

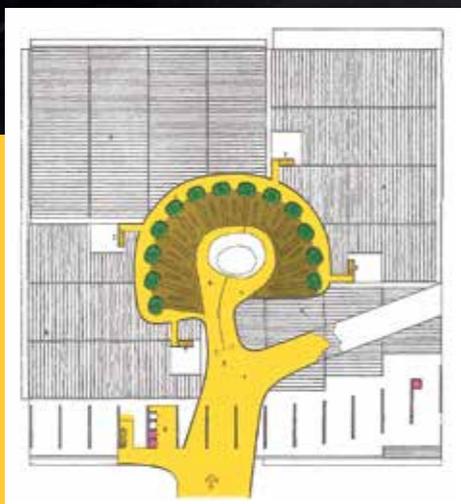
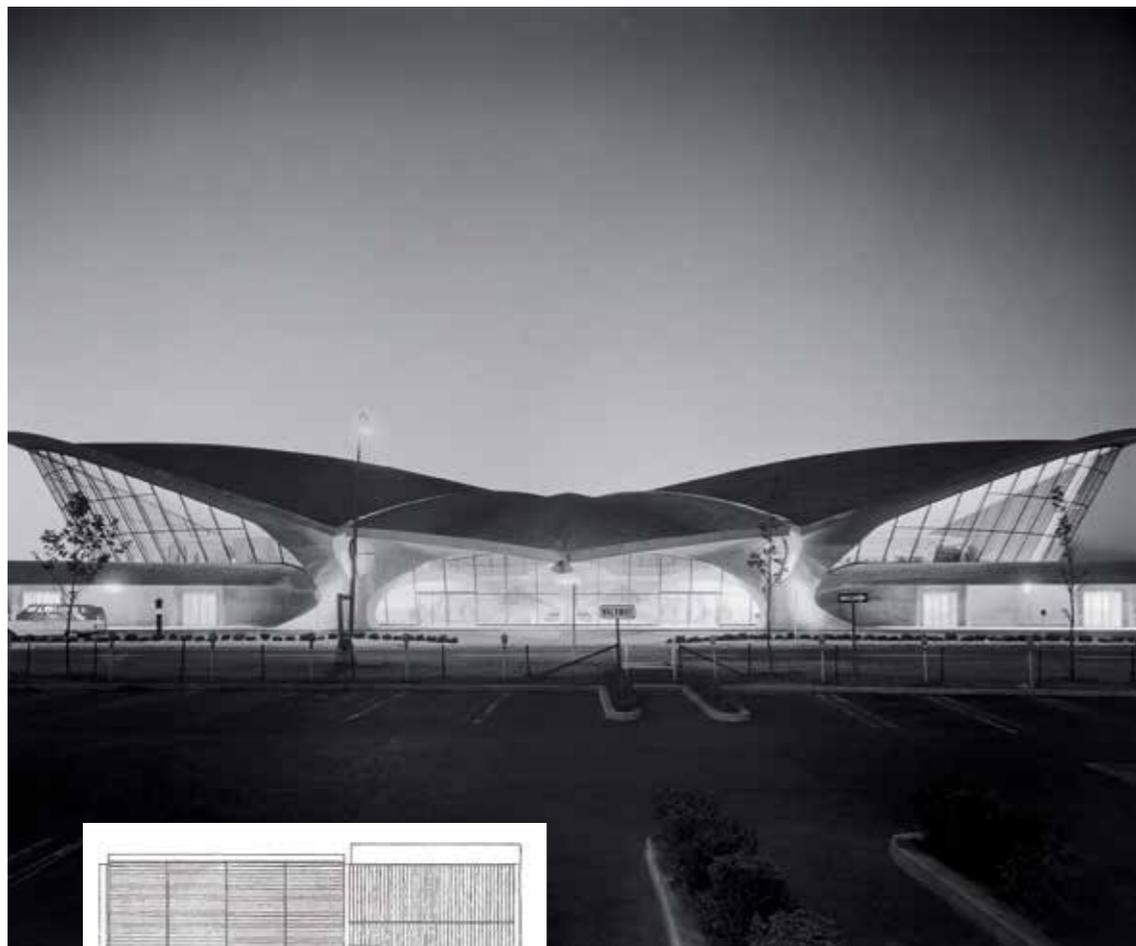
QU'EST-CE QUE LE BIOMIMÉTISME ?

Au cours de l'histoire, les architectes ont observé la nature et s'en sont inspirés pour définir la forme de leurs constructions ainsi que leurs aspects décoratifs. La nature constituait alors un réservoir d'idées avant tout esthétiques. Le biomimétisme traite plutôt de solutions fonctionnelles que de style. L'objectif de cet ouvrage est d'étudier la traduction d'adaptations biologiques en solutions pour l'architecture.

Le terme « biomimétisme » (*biomimicry*) est apparu pour la première fois dans la littérature scientifique en 1962⁷. Son usage s'est ensuite répandu, en particulier durant les années 1980 dans le secteur des sciences des matériaux. Avant « biomimétisme » avaient cours les vocables de « biomimétique » (*biomimetics*), employé d'abord par Otto Schmitt dans les années 1950, et de « bionique » (*bionics*), inventé par Jack Steele en 1960⁸. Depuis la fin des années 1990, l'intérêt pour ces approches s'est considérablement accru, grâce à des personnalités influentes dont les écrits ont été largement diffusés, comme l'écrivaine en sciences naturelles Janine Benyus, le professeur de biologie Steven Vogel et le professeur de biomimétique Julian Vincent. Julian Vincent définit sa discipline comme « la mise en œuvre d'une conception de qualité fondée sur la nature⁹ », tandis que Janine Benyus définit la sienne comme « l'imitation consciente du génie de la nature¹⁰ ». L'unique différence importante entre « la biomimétique » et « le biomimétisme »

réside dans le fait que la première s'applique indifféremment à tous les secteurs, comme celui de la technologie militaire, tandis que le second, pour beaucoup de ses praticiens, doit se limiter au développement de solutions durables. Nous emploierons ces deux termes indifféremment, les considérant comme essentiellement synonymes.

Depuis la première édition de ce livre, en 2011, la terminologie s'est beaucoup modifiée. Elle privilégie aujourd'hui des expressions comme « conception bio-inspirée » (*bio-inspired design*) ou « biodesign » (*biodesign*). Le mot « biodesign » est apparu dans différents secteurs, comme le médical – pour nommer l'invention et la mise en œuvre de nouvelles techniques biomédicales – ou la robotique. Il désigne également divers champs de la conception se fondant sur la biologie. Le terme est aussi le titre d'un livre et d'une exposition de William Myers¹¹. Ce nouveau vocabulaire s'explique par le fait que « le biomimétisme » ou « la biomimétique » impliquent l'imitation, tandis que « la bio-inspiration » a un sens plus large. Elle induit des développements potentiels au-delà de ce qui est observé dans la nature. J'ai choisi le terme « biomimétisme », car l'expression « architecture bio-inspirée » fait référence à une définition très large, depuis l'imitation superficielle



2. Le terminal de la TWA à l'aéroport John F. Kennedy, à New York. Eero Saarinen s'est servi de formes biomorphiques pour exprimer la poésie du vol aérien.

Image © Ezra Stoller/Esto

3. Le Corbusier, probablement le plus grand architecte symboliste de tous les temps, semble faire délibérément référence aux reins et à leur fonction d'élimination dans cette étude pour les toilettes du siège social d'Olivetti (non construit).

d'une forme naturelle jusqu'à la compréhension scientifique d'une fonction menant à une innovation. L'expression « construction bio-inspirée » fait moins problème, car le mot « construction » en lui-même suppose la rigueur sur le plan fonctionnel. Aucun terme ne pourra décrire parfaitement ce que nous faisons et comme dans toute négociation, il importe de s'accorder sur un socle commun pour unifier les disciplines plutôt que de batailler pour des différences subtiles qui les divisent : ces approches sont transdisciplinaires, basées sur des preuves, axées sur la fonction et porteuses de changement radical¹². Le biomimétisme et la biomimétiologie sont aujourd'hui entendus comme des approches avant tout fonctionnelles. Aucun acteur du secteur ne se limitant aux seules solutions observées dans la nature, nous ne craignons pas les réductions liées au suffixe « mimétisme¹³ ». Avec le temps, nous verrons lequel de ces termes s'imposera en architecture.

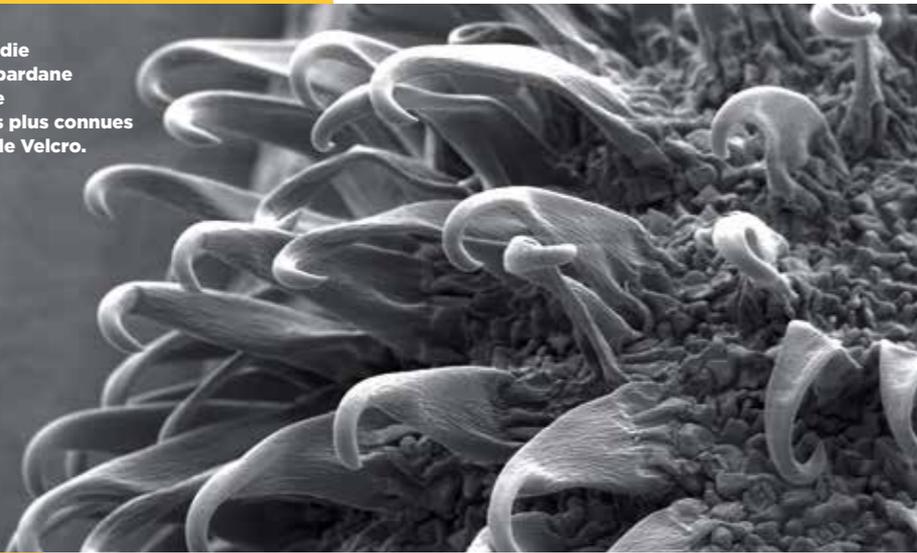
D'autres expressions méritent néanmoins d'être précisées : « biophilie », « biomorphisme », « bio-assistance » et « biologie de synthèse ». La « biophilie », terme popularisé par le biologiste E. O. Wilson¹⁴, renvoie à l'hypothèse selon laquelle les êtres humains et les autres organismes vivants seraient reliés instinctivement. Le « biomorphisme » désigne généralement la reproduction de formes naturelles dans le style architectural. La « bio-assistance » consiste à tirer directement parti de la nature et de ses propriétés, comme planter des végétaux autour et à l'intérieur des bâtiments pour générer un refroidissement par évaporation. Au chapitre 3, nous verrons le rôle majeur que cette approche est appelée à jouer dans la réflexion sur les systèmes biomimétiques. La « biologie de synthèse » consiste, d'une part, en la conception et en la production d'éléments ou de systèmes vivants n'existant pas en tant que tels dans la nature ; d'autre part, en la reconception et en la production d'organismes vivants existants. Le biomimétisme se distingue de la biologie de synthèse dans la mesure où il n'a pas pour objectif de créer des composants vivants.

D'un point de vue architectural, il importe de bien comprendre la différence entre biomimétisme et biomorphisme. Au cours du ^{xx} siècle, les architectes ont souvent puisé dans la nature pour dessiner des formes originales ou donner un sens symbolique à leurs projets. Le biomorphisme a donné lieu à des réalisations spectaculaires, telles que le terminal de la TWA à l'aéroport JFK conçu par Eero Saarinen (fig. 2). Le Corbusier s'en est également servi pour produire une architecture hautement symbolique (fig. 3). À l'opposé, le biomimétisme s'attache surtout aux aspects fonctionnels des organismes biologiques. Il faut souligner cette différence importante, car ce dont nous avons besoin a trait à la fonctionnalité et c'est bien le biomimétisme plutôt que le biomorphisme qui sera en mesure d'entraîner les mutations mentionnées plus haut.

L'architecture biomorphique a cependant encore un rôle à jouer. La reproduction de formes naturelles ainsi que le symbolisme de celles-ci provoquent d'intenses émotions. Les deux approches peuvent coexister dans un même bâtiment, le biomorphisme y apportant plus de sens que si le biomimétisme seul avait été appliqué dans un but purement technique. Le premier relève de l'expression esthétique et formelle, le second de la fonctionnalité. Le biomimétisme comporte aussi des limites et il convient de les souligner. Une méthode de conception ne produit pas automatiquement de l'architecture, et nous ne pouvons pas nous baser uniquement sur des méthodes purement scientifiques. L'architecture implique une dimension humaine, elle s'adresse aussi à l'esprit et devrait nous élever, en plus d'exprimer quelque chose de son époque.

Le mot « naturel » est employé dans de multiples contextes pour évoquer le « bon ». Il serait facile de se méprendre sur le biomimétisme en en faisant un pourvoyeur de solutions « plus naturelles ». Tel n'est pas son objectif. Il est hors de question de copier certains aspects de la nature, comme le parasitisme destructeur. Idéaliser la nature n'est pas sans risque. Mais elle

5. Image très agrandie des crochets de la bardane qui ont inspiré l'une des applications les plus connues du biomimétisme : le Velcro.

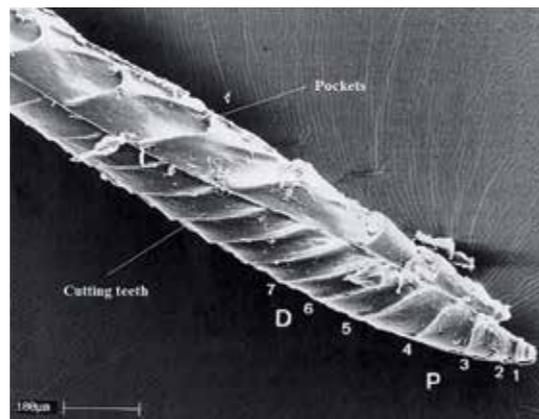


● ● Une méthode de conception ne produit pas automatiquement de l'architecture

offre ceci d'inestimable : les nombreux « produits » issus d'un long et impitoyable processus d'amélioration. En résumé, l'évolution est un processus fondé sur la variabilité génétique au cours duquel les spécimens les plus adaptés ont été sélectionnés. La nécessité de survivre a obligé les organismes à habiter des niches écologiques hyperspécifiques, ainsi qu'à s'adapter à des milieux aux ressources limitées. Compte tenu des contraintes que l'humanité aura à affronter dans les décennies à venir, il est pertinent de s'en inspirer.

Que répondre aux sceptiques pour qui les réalisations humaines dépassent celles de la nature ? Il n'existe pas de moteurs à combustion en biologie et pas plus d'axes rotatifs à grande vitesse. Et les végétaux convertissent l'énergie solaire moins efficacement que les panneaux photovoltaïques les plus récents. Cela étant, personne ne prétend que le champ des recherches techniques doit se limiter à ce qui

existe dans la nature. Très souvent, avec moins de moyens, les organismes biologiques ont résolu des problématiques analogues à celles que nous rencontrons. En guise d'exemple : sans axe rotatif, comment forer une pièce en bois ? La mouche à scie (symphyte) répond ainsi : elle est dotée d'une tarière composée de deux tiges semi-circulaires, chacune se terminant en pointe à son extrémité inférieure (fig. 4). Chaque tige glisse en avant et en arrière par rapport à l'autre de sorte que lorsqu'une des deux pointes s'ancre dans la rainure peu profonde d'un arbre, l'insecte peut s'appuyer sur



4. La mouche à scie incarne la solution qu'a trouvée la biologie pour percer du bois sans axe tournant.

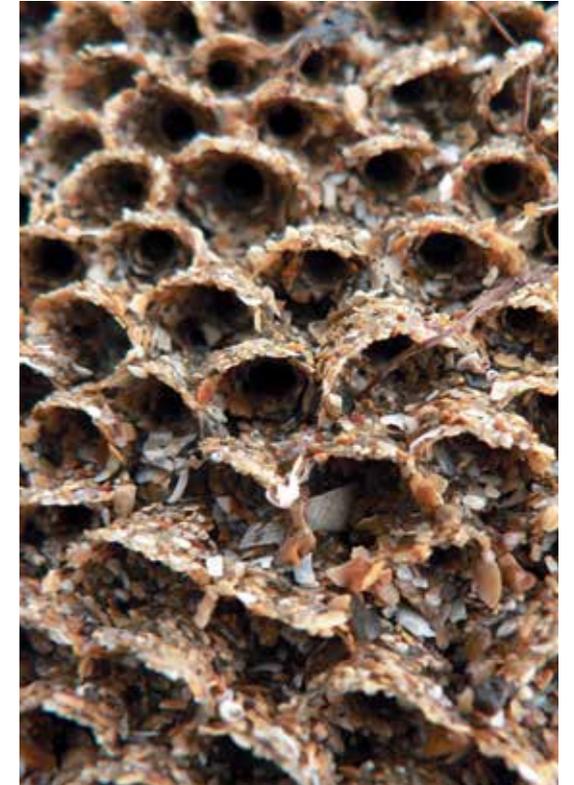
ce côté-là et enfoncer l'autre moitié de sa tarière plus profondément dans le bois. Il en résulte une tarière dont la force nette est nulle, ce qui empêche sa rupture ou sa déformation. Cette solution s'applique parfaitement à différents domaines, notamment à celui de la microchirurgie neurologique. Une sonde neurochirurgicale a été développée selon les principes de l'ovipositeur de la mouche à scie, offrant des avantages que les axes rotatifs ne peuvent concurrencer : la sonde peut percer le long des courbes¹⁵.

En résumé, le biomimétisme représente un puissant outil d'innovation permettant aux architectes de faire mieux qu'avec les approches conventionnelles et de proposer une architecture durable ainsi que les solutions porteuses de changement dont nous avons besoin.

ORIGINES

Ses carnets de croquis l'attestent : Léonard de Vinci a étudié de près les oiseaux, en particulier la forme de leurs crânes et de leurs ailes. De même, Filippo Brunelleschi a pris pour modèle la forme de la coquille de l'œuf lorsqu'il a réalisé le dôme de Florence. Mais la conception de projets architecturaux s'inspirant de la nature remonte probablement à plus loin encore.

Plus récemment, des inventions bien documentées ont été développées, comme celle du Velcro (fig. 5) vers 1948. Depuis le début des années 2000, face à une demande plus forte pour des produits durables, les applications du biomimétisme se sont énormément étendues. Quelques exemples : un concept-car biomimétique de Daimler Chrysler, inspiré de l'ample poisson-coffre aux surprenantes propriétés aérodynamiques ; une colle chirurgicale élaborée à partir de l'observation de certains vers, les *Phragmatopoma californica*¹⁶ (fig. 6) ; et même une crème glacée reprenant certains principes des poissons arctiques¹⁷. Tous ces produits ont démontré leur supériorité et intègrent des données issues de l'étude d'organismes naturels et de leurs adaptations.



6. Une colonie de *Phragmatopoma californica*. Les tubes de sable sont assemblés au moyen de l'équivalent biologique d'une colle époxy bicomposant.