

AGNÈS GUILLOT et
JEAN-ARCADY MEYER

L'or vert

Quand les plantes
inspirent l'innovation



CNRS EDITIONS

Présentation de l'éditeur



Notre regard sur les plantes a bien changé depuis que l'on a démontré qu'elles étaient sensibles, capables de mémorisation, de connaissance aiguë de leur environnement et de reconnaissance de leur parentèle. Car si les plantes n'ont ni cerveau, ni muscles, si elles sont incapables de se déplacer, elles survivent pourtant depuis plus d'un milliard d'années grâce à de nombreuses propriétés leur conférant des capacités adaptatives remarquables.

Ces créatures ont contribué à des progrès scientifiques dans des domaines aussi divers que l'industrie, la médecine, l'architecture, le design, l'informatique et la robotique. Car en s'inspirant des plantes, on peut inventer des adhésifs extraordinairement performants ; lutter contre certains nuisibles comme les punaises de lit ; se protéger de l'eau... ou la stocker ; capter efficacement l'énergie solaire ou éolienne ; recycler le CO₂ ; lutter contre les bactéries sans antibiotiques ; fabriquer des implants chirurgicaux botaniques...

D'une plume vive et alerte, les auteurs nous emmènent à la découverte des secrets de l'or vert, et des dernières innovations.

Agnès Guillot est docteur en psychophysiologie et en biomathématiques.

Jean-Arcady Meyer est ingénieur et docteur ès sciences naturelles.

Ils ont fait carrière en robotique bio-inspirée, respectivement à l'université Paris-Ouest et au CNRS, poursuivant leurs recherches à l'Institut des Systèmes intelligents et de Robotique de l'université Pierre et Marie Curie (ISIR). Leur plus récent ouvrage est Poulpe Fiction. Quand l'animal inspire l'innovation (2014).

Couverture :
© Westend61/Anna Huber/Getty Images.

Maquette : © SYLVAIN COLLET

CNRS Éditions, Paris, 2020

ISBN : 978-2-271-13161-4

Agnès Guillot & Jean-Arcady Meyer

L'or vert

Quand les plantes inspirent l'innovation

CNRS ÉDITIONS

15, rue Malebranche – 75005 Paris

9 GÉNÉRIQUE

13 PREMIER CHAPITRE À LA POURSUITE DU DIAMANT VERT

- 14—1 Une cellule
- 16—2 Un champignon
- 17—3 Une fleur
- 20—4 Un fruit
- 21—5 Un tronc
- 22—6 Une racine

25 DEUXIÈME CHAPITRE ATTACHE-MOI !

- 26—1 Accrocher, pour le pire...
- 28—2 ... et le meilleur
- 30—3 Vrilles perverses
- 31—4 Pieux contre punaises de lit

35 TROISIÈME CHAPITRE LE GRAND BLEU

- 36—1 Se protéger de l'eau... un peu
- 39—2 Se protéger de l'eau... beaucoup
- 45—3 Se protéger de l'eau... pas du tout
- 51—4 Sous les palétuviers
- 55—5 Vessie de sirène

59 QUATRIÈME CHAPITRE SOLEIL VERT

- 61—1 Des feuilles à la pelle
- 63—2 Photovoltaïque

73 CINQUIÈME CHAPITRE AUTANT EN EMPORTE LE VENT

- 74—1 Des feuilles en essaim
- 76—2 #BalanceLesGraines
- 82—3 Pliages solaires
- 88—4 De l'air !

93 | SIXIÈME CHAPITRE HIPPOCRATE

94 — 1 Protection rapprochée

100 — 2 Aux petits soins

111 | SEPTIÈME CHAPITRE LES LUMIERES DE LA VILLE

113 — 1 Les « biomorphiques »

119 — 2 Les « bioniques »

142 — 3 Les « botaniques »

151 | HUITIÈME CHAPITRE FASHION VICTIME

152 — 1 Dressing végétal

154 — 2 Bio-Design

163 | NEUVIÈME CHAPITRE RETOUR VERS LE FUTUR

165 — 1 Super-héros

169 — 2 Robotanique

185 — 3 Cognition sans neurones

197 | BOUQUET FINAL

198 — 1 Une démarche complémentaire...

198 — 2 ... mais dérangeante ?

200 — 3 Une démarche vraiment bio-inspirée ?

202 — 4 Le Label Cradle to Cradle (C2C)

202 — 5 « TIN », un nouveau label vertueux ?

203 — 6 Déclarations des Droits des Plantes

205 | RÉFÉRENCES

221 | LÉGENDES ET CRÉDITS DES PAGES D'OUVERTURE DE CHAPITRE

À Raoul Heinrich Francé (1874-1943),
précurseur de l'écologie moderne
et inventeur de la bioinspiration végétale [77]



« Trois conditions sont nécessaires à l'inspiration :

*“Un œil qui sache voir la nature,
Un cœur qui sache sentir la nature,
Une volonté qui ose suivre la nature”* »

Iolo Morganwg

Cyfrinach Beirdd Ynys Prydain (1829)

(Le mystère des bardes de l'île de Bretagne)

*D*e son fauteuil-mycelium, Gaïa alluma la lampe-cresson et but le fond de son verre cacté. Elle voulait terminer la lecture de son roman sur l'écran-fleur-squelette de son ordi-laitue. L'air était frais et pur, dans son immeuble bioalgué aux stores oiseau-de-paradis. Dehors, des robots-dionée piégeaient des insectes et des drones-samares tournoyaient dans l'atmosphère, veillant à protéger les arbres naturels contre les dangers du climat.

Un utopique futur végétal, le quotidien de Gaïa ? Tous les éléments de cette tranche de vie existent pourtant depuis plusieurs années, sous forme de projets, de prototypes ou de produits déjà commercialisés.

Les plantes n'ont ni cerveau, ni muscles et sont incapables de se déplacer. Toutefois elles survivent sur Terre depuis plus d'un milliard d'années grâce à de nombreuses propriétés leur conférant des capacités adaptatives remarquables. Notre regard sur elles a bien changé depuis que des chercheurs ont démontré qu'elles étaient sensibles, capables de mémorisation, de connaissance aigüe de leur environnement et de reconnaissance de leur parentèle [40, 60, 141, 142]. En Suisse, à l'unanimité, les membres de la Commission fédérale d'Éthique pour la biotechnologie dans le domaine non humain (CENH) ont même conféré «une dignité» à «la créature dans le règne végétal», dénonçant notamment «tout acte de nuisance arbitraire envers les plantes comme moralement répréhensible» [243].

Dès lors, faut-il ou non instaurer une véritable charte des Droits des Plantes, compte tenu des arguments précédents ? En marge de ce futur dilemme, cet ouvrage vise plutôt à révéler les nombreuses contributions de ces créatures à des progrès dans des domaines divers tels que l'industrie, la médecine, l'architecture, le design, la robotique et l'informatique. S'inspirer des plantes, c'est reconnaître la singularité de ces systèmes vivants qui ont trouvé des solutions originales pour survivre, alors qu'ils sont cloués à vie dans un endroit pas toujours favorable.

Nous évoquerons des réalisations inspirées du monde classique des végétaux mais aussi de celui d'« intrus » particuliers, ni purement végétaux, ni purement animaux – amibes, moisissures, levures ou champignons. Comme les végétaux, ils sont sédentaires et capables de reproduction non sexuée, mais ne peuvent se servir directement de l'énergie solaire pour élaborer les substances organiques nécessaires à leur énergie. Comme les animaux, ils doivent trouver ces substances chez d'autres êtres vivants, mais les absorbent d'une manière totalement différente.

Le premier chapitre expose quelques procédés bio-inspirés en allant à la poursuite de chaque *Diamant Vert* rencontré dans cet ouvrage – cellule, champignon, fleur, fruit, tronc et racine, avant que ne soient développées les parties suivantes, plus thématiques.

Dans le suivant, *Attache-moi!*, des plantes en effet très attachantes fournissent quelques solutions ingénieuses à cette injonction péremptoire.

Le Grand Bleu expose des applications inspirées des relations, attractives ou répulsives, que les plantes entretiennent avec l'eau, douce ou salée.

Source d'énergie universelle, le *Soleil (vert)* a rendez-vous avec les végétaux pour nous aider à négliger les énergies fossiles.

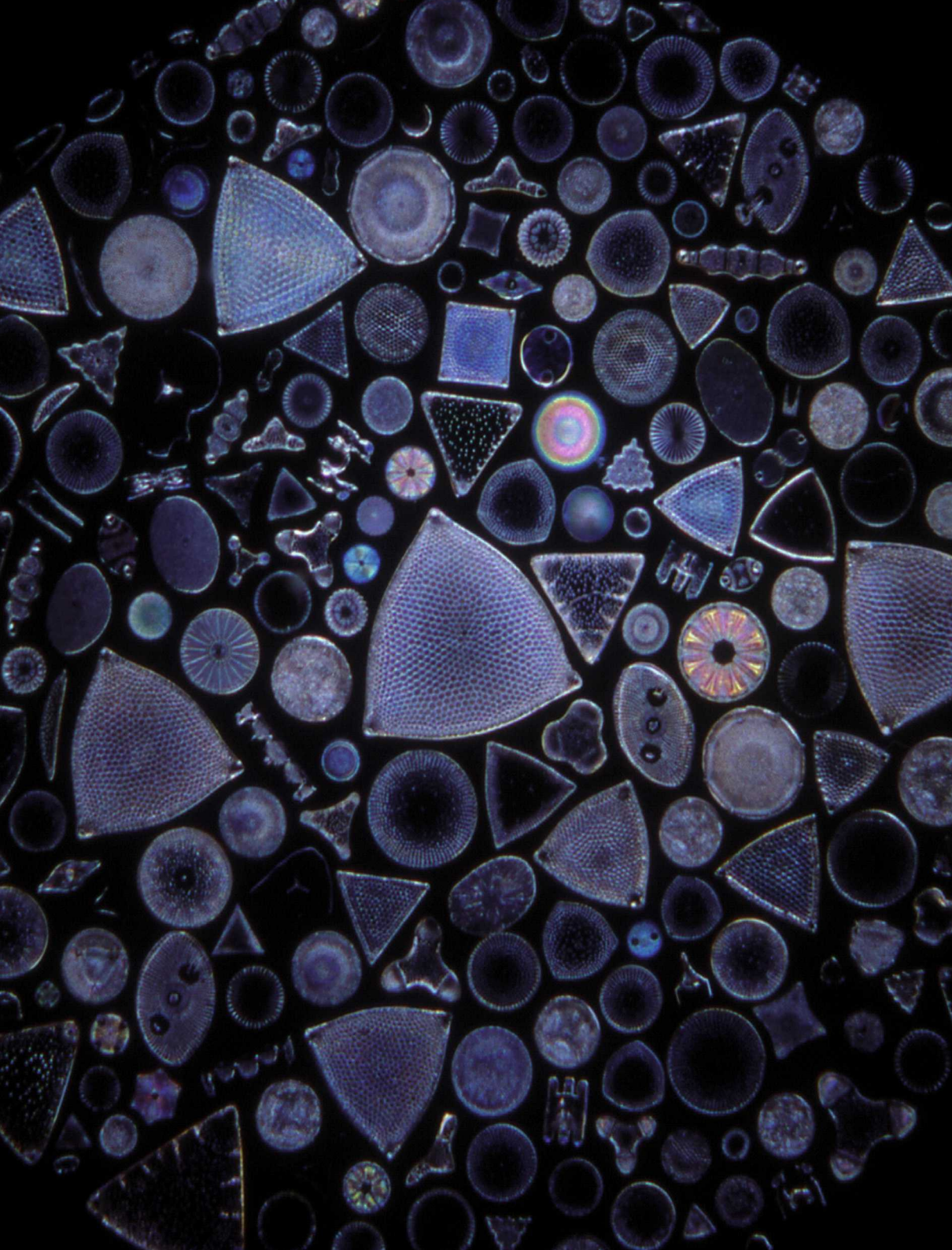
Autant en emporte le vent rassemble les innovations végétales dédiées aux objets volants identifiés et aux purificateurs d'air.

Consacré à *Hippocrate*, père fondateur, ce chapitre expose les procédés verts émergeant au domaine de la médecine.

Les Lumières de la Ville braque un projecteur sur les architectures, anciennes ou contemporaines, dont les formes, les structures ou les procédés empruntent à certaines plantes.

Au chevet d'une nouvelle *Fashion Victime* végétale, nous examinerons son dressing et ses objets design.

Enfin, les récents développements de technologies novatrices, inspirés par des organismes évoluant depuis des millions d'années, augurent bien d'un *Retour vers le Futur!*



1

À la poursuite
du diamant vert

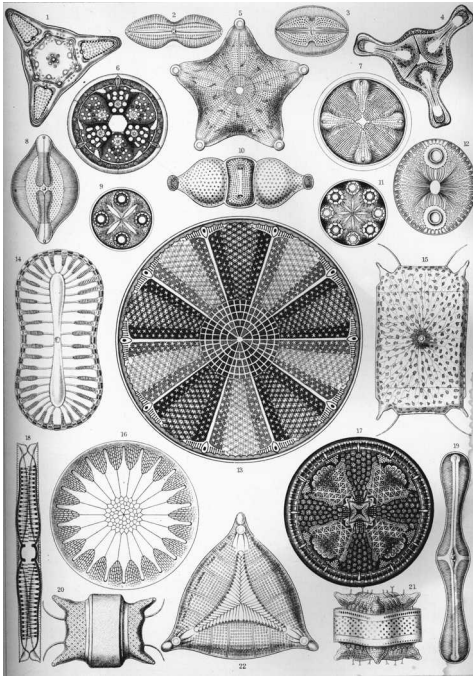
Des histoires singulières, des procédés intrigants ou des besoins stratégiques seront associés, tout au long de cet ouvrage, aux innovations réalisées par des ingénieurs, chercheurs, architectes et designers. Le survol suivant est un aperçu de ce que ces scientifiques ou artistes ont puisé dans tous les composants du règne végétal ou fongique.

1 Une cellule

Elles ont dû être animales avant d'être végétales, vivent dans l'eau salée ou l'eau douce, fixent un quart du dioxyde de carbone et génèrent un cinquième de l'oxygène de notre atmosphère. Ce sont les diatomées, micro-algues brunes unicellulaires de 1 à 500 microns découvertes en 1702 par le naturaliste hollandais Antony

van Leeuwenhoek grâce à l'un des innombrables microscopes de son invention. Confondues avec des cristaux, elles ne furent formellement identifiées que 80 ans plus tard.

Pour se défendre de leurs prédateurs, petits coquillages, crustacés et poissons végétariens, les diatomées se sont munies de moyens de défense perfectionnés, qu'ils soient chimiques – des composés plus ou moins toxiques – ou mécaniques – leurs remarquables enveloppes en verre. Ce sont ces carapaces, nommées *frustules*, si superbement illustrées en 1904 par Ernst Haeckel dans son ouvrage *Formes artistiques de*



1.1 L'extraordinaire variété des diatomées.
Illustration d'Ernst Haeckel en 1904.



1.2 Le toit auto-nettoyant du Grand Théâtre national de Pékin a été traité par le procédé « sol-gel » de la chimie douce, inspirée par les diatomées. © Creative Commons Attribution 3.0.

la Nature, qui ont attiré l'attention des scientifiques depuis leur découverte (Figure 1.1) [94].

Les diatomées *centriques*, disques ou tubes, ont une symétrie radiale. Les *pennées*, plus ou moins allongées, ont une symétrie bilatérale. De nombreuses fioritures peuvent orner ces formes de base. Leur étymologie grecque *diatomos* (coupé en deux) fait référence à leur aptitude à se diviser pour donner deux frustules semblables.

Lorsque les cellules meurent, leurs carapaces s'accumulent parfois dans de larges gisements de roches et forment la *diatomite*. Ce minéral léger servit à bâtir, en 535, le dôme de trente mètres de diamètre de la cathédrale Sainte-Sophie à Constantinople. Plus prosaïquement, il est utilisé de nos jours pour stabiliser des explosifs, filtrer le vin, rendre le dentifrice abrasif ou filtrer l'humidité de la litière du chat.

C'est en utilisant quelques milligrammes par litre de silice pure dissoute dans l'eau que les diatomées fabriquent leurs coques de verre. Et cela, à température ambiante, alors que les humains ne savent produire ce verre qu'à plus de 1 500 °C!

Un brevet industriel datant de 1939 – mais totalement ignoré pendant quelques décennies – exploitait déjà le secret de ce qui allait devenir, dans les

années 1970, la « chimie douce ». Ce terme a été proposé par Jacques Livage, du Collège de France, un pionnier du développement des procédés dits « sol-gel » (solution-gélification) [120, 131]. Ceux-ci sont largement inspirés de l'algue unicellulaire. Ils reposent sur la dissolution de silice et d'autres composés dans l'eau (*sol*), puis leur transformation en réseaux plus importants en présence d'enzymes contenues dans la matière vivante (*gel*) et ce, à basse température (de 20 °C à 200 °C) et à coût très réduit. Après séchage, le produit de cette opération ne donne pas un verre massif, mais une poudre qui convient parfaitement au dépôt de couches minces. C'est en outre une considérable économie d'énergie réalisée dans la fabrication de ce produit !

Les applications de ces procédés sont très variées et concernent notamment des revêtements antireflets et anti-rayures (vitres, rétroviseurs, pare-brise, lunettes), des films autonettoyants (sur le toit du Grand Théâtre national de Pékin, voir Figure 1.2, ou sur la semelle d'un fer à repasser), mais aussi le stockage d'énergie par les cellules photovoltaïques, les batteries photo-rechargeables ou l'encapsulation de bactéries et de virus pour un usage médical.

2 Un champignon

Le champignon mэрule *Serpula lacrymans* aurait pu faire de la bataille de Trafalgar une victoire franco-espagnole ! En effet, quelques années plus tard, *Victory*, le navire de l'amiral Nelson, tout comme le *Formidable* et le reste de sa flotte, ont été réduits en poussière, rongés par ce champignon bien plus efficacement que par une armée de termites.

Souvent considérés comme parasites – parfois donc à juste titre – les champignons jouent pourtant un rôle essentiel dans les écosystèmes. Ils y pratiquent plusieurs métiers : éboueurs, car ils décomposent et recyclent les déchets de la faune et de la flore ; dépollueurs, car ils absorbent des produits nocifs ; négociants, car ils échangent avec les végétaux de l'eau, du phosphore et des sels minéraux contre des sucres qu'ils sont incapables de produire [196].

L'entreprise new-yorkaise Ecovative LLC a eu pour objectif de trouver des substituts au plastique, cet épouvantable parasite planétaire, qui ne peut être dégradé en moins de 400 ans [65]. Les ingénieurs ont élaboré un nouveau matériau entièrement biodégradable en observant la façon dont certains champignons, poussant sur des copeaux de bois, parviennent à les faire adhérer fortement entre eux (Figure 1.3). Ils puisent leur matériau de

base dans les divers déchets végétaux issus de l'agriculture locale, auxquels ils ajoutent quelques brins de champignon polypore. Ce mélange est mis en chambre obscure dans des moules adéquats pendant une petite semaine, afin que le polypore étende ses filaments et enserre les déchets. Un passage au chaud met fin à sa croissance. L'élaboration du produit, nommé Myco Foam, est alors terminée.



1.3 Des champignons, associés à des déchets végétaux, élaborent le produit Myco Foam, qui se transforme en compost une fois utilisé.
© ecovativdesign.com/.

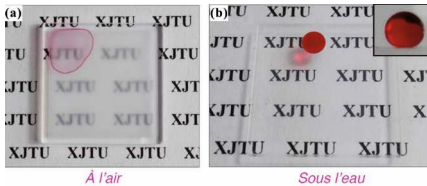
Ce procédé présente de nombreux avantages. Les déchets agricoles, comme des enveloppes de coton, de maïs ou de riz, peuvent être récoltés au plus près du lieu de fabrication, dans tous les pays du monde. Le produit fini, qui imite exactement les propriétés de composés plastiques, ne nécessite que très peu d'énergie pour se constituer. De plus, cerise sur le gâteau, il se transforme en compost en fin de vie.

De nombreuses applications ont déjà vu le jour : conditionnements pour appareils fragiles, renforts protégeant les pilotes dans leurs voitures de course, planches de surf ou même bouées anti-tsunamis, car Myco Foam ne pollue pas les océans.

Avec la même recette, à base de pleurotes cette fois, l'entreprise a aussi inventé Greensulate, un isolant thermique qui concurrence les fibres de verre à la nocivité avérée. Elle pourrait même se lancer dans la fabrication de murs d'habitation. Depuis sa création, elle a ouvert de nouvelles unités aux États-Unis et en Europe.

3 Une fleur

Poussant sur les flancs froids des montagnes de la Chine et du Japon, *Diphyllia grayi* expose ses pétales d'un blanc laiteux. Mais lorsque des gouttes de pluie l'atteignent, ils deviennent totalement



1.4 Haut : Les fleurs de *Diphylleia* sont blanches par temps sec (gauche) mais transparentes par temps humide (droite), quand l'eau chasse l'air dans leurs cellules. Bas : Inspiré de la fleur, un verre bombardé au laser devient opaque à l'air (a) mais transparent sous l'eau (b). © Clearance Center.

transparents et ne révèlent que leurs frêles nervures, comme les rayons X révèlent les os d'une main. C'est pourquoi *Diphylleia* est aussi nommée la « fleur squelette » (Figure 1.4 haut).

Le secret de cette métamorphose se niche dans les espaces existants entre les cellules constituant les pétales, remplis d'un liquide nutritif. Lorsque le temps est sec, de l'air y pénètre et recouvre ce liquide. À travers cette couche air/liquide, la lumière réfléchit la blancheur des pétales. Lorsque le temps est humide, les gouttes d'eau chassent cet air. À travers la couche eau/liquide, l'indice de réfraction de la lumière se modifie et rend les pétales transparents.

Une équipe de l'université Xi'an Jiaotong en Chine ambitionne de reproduire cette curieuse propriété, notamment pour rendre des lunettes de plongée totalement transparentes et propres sous l'eau [249].

Retrouvez tous les ouvrages de CNRS Éditions
sur notre site www.cnrseditions.fr