

# Des plantes dans le bâtiment

Marc ALECIAN - Sophie CAPDEVIELLE - Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le  
05/03/2020

école —————  
normale —————  
supérieure —————  
paris-saclay —————

*Elève de l'ENS Paris-Saclay, Marc Alecian, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.*

Le musée du quai Branly-Jacques Chirac, les cathédrales, le Castel Béranger à Paris, la gare de Rennes, ... Tous ces édifices, qu'ils soient séparés de plusieurs siècles, contemporains ou gothiques, en acier, béton ou pierre, ont tous un point commun. En effet, dans tous ces bâtiments les plantes ont laissé leur trace via des rosaces, un mur végétalisé, un bow-window Art Nouveau ou encore des poteaux biomimétiques.

Le but de cette ressource n'est pas de dresser une liste exhaustive ou encore un catalogue des différents courants architecturaux qui ont puisé leur inspiration dans le monde végétal. Nous essayerons plutôt d'observer avec un regard critique comment sur le dernier siècle les plantes se sont littéralement, petit à petit, enracinées dans les édifices pour les marquer durablement de différentes manières. En réalité, l'usage des plantes en architectures est souvent révélateur de l'état d'esprit d'une époque. À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, lorsqu'Eugène Viollet-le-Duc étudie la manière avec laquelle les artisans gothiques s'inspiraient du monde vivant, il cherche avant tout à définir une méthode scientifique pour la rénovation des édifices semblable à l'organicisme<sup>1</sup>. Les grands architectes du courant qui s'appellera Art Nouveau<sup>2</sup> vont eux reprendre ce travail dans le but de définir une toute nouvelle esthétique de bâtiment, abondante et inégalée. Les plantes, en façades ou en intérieur, ne sont alors qu'apposées sur les bâtiments.

À la fin du XX<sup>e</sup> siècle, lorsque l'on commence à comprendre l'influence de l'activité humaine sur le dérèglement climatique et la dégradation de l'environnement, les plantes vont être employées pour tenter de diminuer cet impact. Que ce soit dans les bétons bio-sourcés ou bien sur les surfaces végétalisées, le nouveau but est de concilier plantes et optimisation énergétique. Les plantes commencent alors à vraiment prendre racine dans nos bâtiments. Aujourd'hui, le temps est à la quête du paradis urbain. Encore une fois les plantes s'imposent d'elles-mêmes comme source intarissable d'inspiration. On imagine par exemple des structures biomimétiques et lorsque certains parlent de Smart City<sup>3</sup>, d'autres préfèrent envisager une Végétal City<sup>4</sup> où les plantes deviennent alors une structure à part entière...

Cette ressource présente quelques points historiques de ce dernier siècle de l'inspiration du monde végétal dans l'ornementation architecturale, puis s'attarde sur l'influence des plantes dans un contexte de développement durable, avec un point particulier sur les toitures végétalisées. Enfin les trois niveaux du biomimétisme sont exposés.

<sup>1</sup> Orientation philosophique qui affirme que la réalité est mieux comprise comme un tout organique

<sup>2</sup> Ou Modern Style, mouvement artistique de la fin du XIX<sup>e</sup> - début du XX<sup>e</sup> (1890-1910)

<sup>3</sup> Ou ville intelligente, zone urbaine collectant des données pour gérer ressources et actifs

<sup>4</sup> Ville dont l'architecture utiliserait comme matériaux de construction toutes formes d'organismes vivants



Figure 1 : Pont racine vivant à Meghalaya, dans le East Khasi Hills (Inde), source [1]

## 1 – Plante et bâtiment

### 1.1 - Eugène Viollet-le-Duc, penser la modernité

Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (1814-1879) est un auteur prolifique, restaurateur infatigable et théoricien passionné de l'architecture. Il est souvent vu comme un des grands archéologues français de l'architecture médiévale ainsi qu'un fameux théoricien des antécédents de la modernité. Il a inspiré Guimard<sup>5</sup>, Horta<sup>6</sup>, Sullivan<sup>7</sup> ou encore Frank Lloyd Wright<sup>8</sup>. Nous nous intéresserons dans la suite au personnage de théoricien qu'il a été. Nous verrons que son travail et sa pensée ont sensiblement résumé tout un siècle et inspiré toute une génération d'architectes.

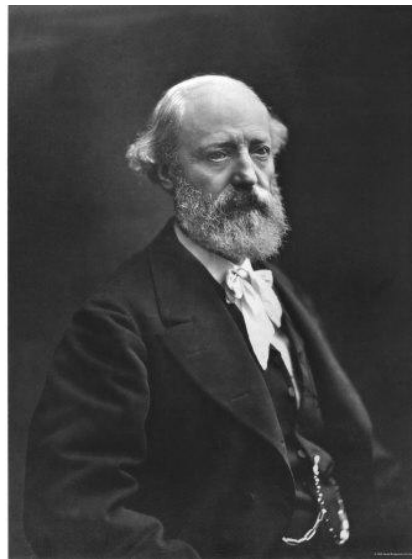


Figure 2 : Portrait d'Eugène Viollet-le-Duc par Nadar<sup>9</sup>, source [2]

En tant qu'archéologue et théoricien, la philosophie de Viollet-le-Duc est celle de l'organicisme [3]. Viollet-le-Duc s'est effectivement formé une méthodologie en archéologie en empruntant aux sciences naturelles. Ainsi il fait un parallèle entre paléontologie et archéologie. Tout comme le paléontologue reconstitue un animal préhistorique, un archéologue restaure un édifice. Avec sa

<sup>5</sup> Hector Guimard (1867-1942), architecte français, mouvement Art Nouveau

<sup>6</sup> Victor Horta (1861-1947), architecte belge, mouvement Art Nouveau

<sup>7</sup> Louis Sullivan (1856-1924), architecte américain

<sup>8</sup> Frank Lloyd Wright (1867-1959), architecte et concepteur américain

<sup>9</sup> Félix Tournachon, dit Nadar (1820-1910), photographe, écrivain et aéronaute français

méthodologie, Viollet-le-Duc se donne pour mission de redonner une cohérence historique, formelle et structurelle à un édifice. Pour cela, il faut comprendre la logique interne de l'objet.

Georges Cuvier (1763-1832), célèbre anatomiste français, suggère un principe de « corrélation d'organes » et de « subordination des caractères » au sein même de l'organisme. Viollet-le-Duc voit dans l'édifice gothique le même principe. Il y a une logique absolue, la forme de chaque élément découle de sa place dans la structure. Cette forme ne peut être autrement car elle est l'expression exacte de sa fonction. L'architecte français va alors transposer ces lois à l'architecture de son temps. Il va imaginer l'architecture comme une démonstration : la volumétrie, l'alternance des vides et des pleins, le jeu d'ombres et de lumières ... tout cela découle d'une logique constructive et l'exprime. On « lit » un bâtiment.

Pour ce qui est du décor, Viollet-le-Duc s'inspire encore une fois des artistes gothiques. Effectivement, ceux-ci s'inspirent de la flore. Ils mènent un remarquable travail d'observation à l'image des scientifiques et cherchent surtout à comprendre les principes qui régissent la vie des plantes. Les formes naturelles sont belles car elles sont logiquement déduites de leur fonction. En architecture, la forme d'une pièce est déduite de sa place dans l'édifice. Hector Guimard chez qui l'élément décoratif d'origine végétal se confond avec le structurel est tout à fait représentatif de cette influence de l'analyse de la flore sur l'architecture.

## 1.2 - Hector Guimard, réinventer la fonte

L'architecte parisien Hector Guimard est né à Lyon en 1867. Venu enfant à Paris, il suit les cours de l'École nationale des Arts Décoratifs à partir de 1882, puis ceux de l'École des Beaux-arts à partir de 1885. Guimard réalisera dès ses premières œuvres ce que Viollet-le-Duc n'a fait que penser : l'utilisation audacieuse du métal dans la construction. Cette audace peut d'ailleurs très bien s'illustrer avec l'École du Sacré-Cœur, édifié en 1895. Dans les figures 4 et 5 sont représentés un plan de façade de cette école et deux photographies représentant l'utilisation de la fonte pour les piliers en V (idée évoquée par Viollet-le-Duc). Ces piliers fonctionnent à la manière de pilotis et ont permis d'introduire un préau dans un espace restreint. On peut également remarquer qu'ils sont stylisés et annonce l'Art Nouveau à Paris. Guimard en sera l'un des premiers représentants.



Figure 3 : Portait d'Hector Guimard, source [4]

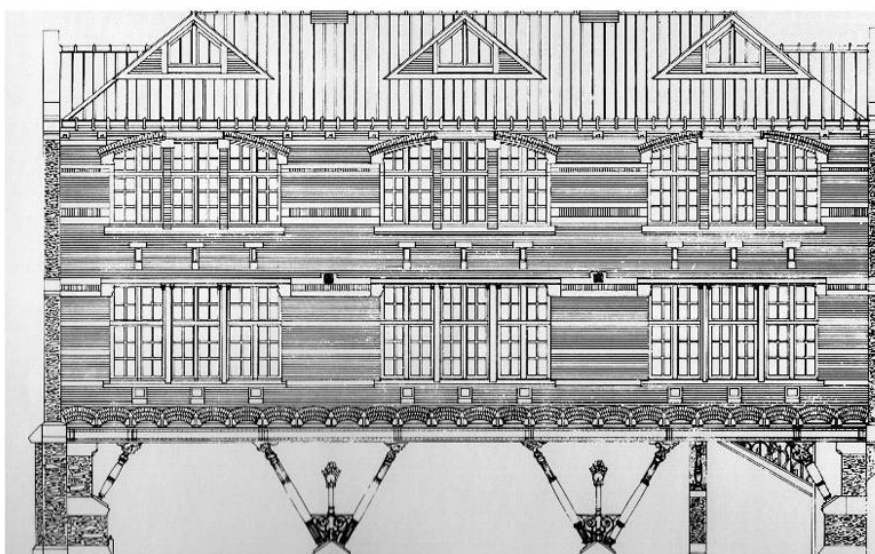
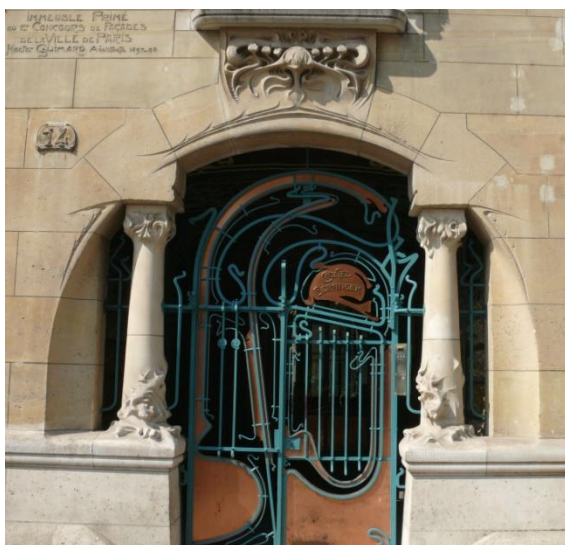


Figure 4 : Plan de la façade de l'École du Sacré-Cœur, source [5]



Figure 5 : Piliers de l'École du Sacré-Cœur, détail du style Art Nouveau et structure en V, source [5]

Par la suite, Guimard va tenter de développer sa propre architecture qui se résume dans l'idée suivante : créer un environnement domestique et urbain entièrement soumis au « style Guimard ». Le but étant, avec un décor abondant et homogène, d'immerger totalement le spectateur dans un univers architectural où tous les éléments se répondent entre eux. Les problèmes évidents soulevés par une telle entreprise sont le coût élevé, la difficulté de mise en œuvre et la longueur d'un chantier. Pour remédier à cela Guimard décide, en utilisant comme matériau principal la fonte dont le travail est à l'époque bien maîtrisé, de faire de la transformation de produits finis ou encore d'opter pour un même motif sur différents supports. Guimard, en partenariat avec la fonderie Saint-Dizier notamment, va petit à petit développer un incroyable catalogue de fontes d'ornement moulées en série. Le processus est beaucoup moins cher, il permet de s'affranchir du travail d'artisans spécialisés et il évite surtout d'altérer les dessins de Guimard. Avec un catalogue de fonte si florissant, Guimard tente notamment à ce que ces confrères architectes puissent aussi s'équiper des fontes « style Guimard » [6]. La fonte d'ornement selon Guimard va donc hausser à un niveau artistique inégalé l'équipement des bâtiments. Les figures ci-dessous présentent un corpus de fontes Guimard illustrant la diversité des mobiliers équipés.



Porte du Castel Béranget, Paris, source [7]



Planche 35 d'un catalogue de la fonderie Saint-Dizier, numéro de maisons, source [8]



Rambarde de balcon Hôtel Mezzara, Paris, source [8]



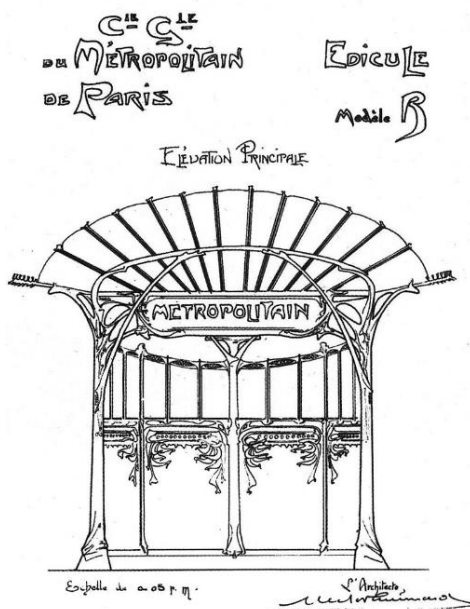
Cheminée, musée du petit palais, source [9]



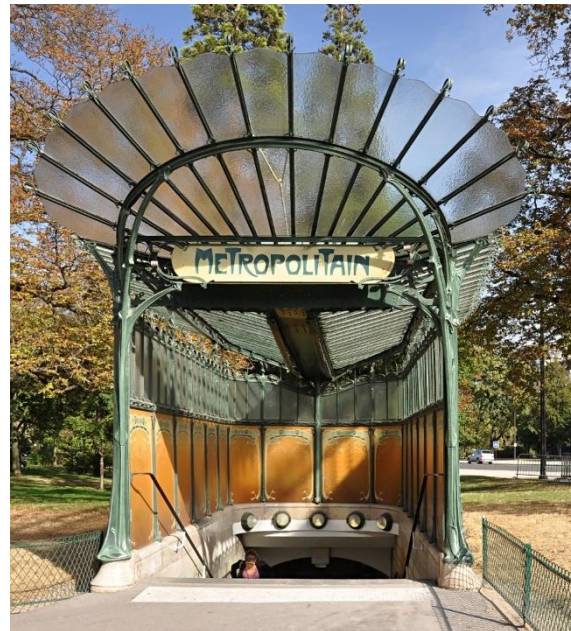
Consoles de solive et linteau, Castel Béranger, source [8]

Figure 6 : Exemples de mobiliers en fonte Guimard

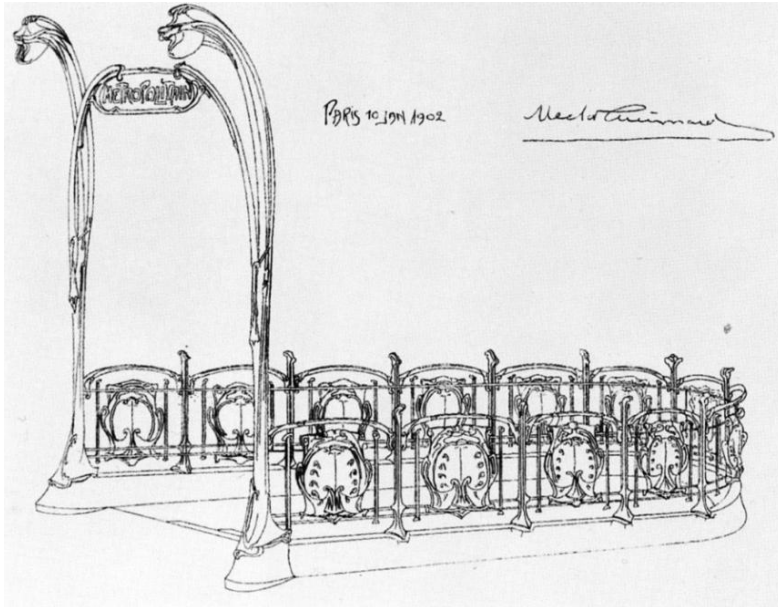
Et probablement le plus connu des mobiliers Guimard, les stations du métropolitain parisien présentées par quelques dessins et photos :



Plan d'édicule arrondi, 1900, source [10]



Édicule station Porte Dauphine, source [11]



Esquisse d'une bouche de métro, 1902, source [10]



Bouche station Anvers, source [12]

Figure 7 : Exemples du mobilier du métropolitain parisien de Guimard

## 2 – Plantes et conception : énergie

Après avoir vu l'influence des plantes et de leur structure sur la manière de penser l'architecture et sur l'architecture elle-même, et après avoir constaté leur « fixation » sur les bâtiments, nous allons maintenant voir leur « entrée » dans les matériaux de construction. Effectivement les plantes s'avèrent être un enjeu social, environnemental et économique important lorsqu'il s'agit de penser à la construction via le prisme du développement durable. La phrase suivante souligne par ailleurs l'urgence sous-jacente à l'implémentation de nouvelles techniques de construction : « *Aucun des problèmes majeurs soulevés dans « Notre futur commun » ne connaît de prévisions d'évolution favorables* ». *Notre futur commun* est le texte émis suite à la commission Brundtland de 1987<sup>10</sup>. Ce texte définit notamment la notion de développement durable.

### 2.1 - Contexte historique et économique

Le secteur du bâtiment (résidentiel et tertiaire) doit faire face à d'importants enjeux en termes de réduction des gaz à effet de serre (GES). Par exemple, le parc résidentiel et tertiaire rejette environ 22% des émissions totales des GES en France (figure 8b).

On peut noter également que ce même parc a consommé, en 2016, 47% de l'énergie finale, énergie directement utilisable (voir [14]). Cette part est en augmentation (43% en 1990) alors que l'industrie a baissé de 5% sur cette même période (figure 9) et que la consommation finale énergétique en France baisse lentement depuis 2001 [13].

Enfin il faut garder en tête que les activités liées au bâtiment constituent la plus grosse consommation de ressources naturelles et contribuent grandement à la production de déchets (343 millions de tonnes en France en 2004) [16]. En 2018, le taux global de valorisation des déchets du bâtiment varie de 48 à 64% selon les sources et selon les activités (démolitions 60 à 80%, réhabilitations 10 à 30%, constructions neuves 40 à 60%) et selon le type de déchets (inertes 60 à 70%, non inertes et non dangereux 30 à 50%) [17].

<sup>10</sup> Programme des Nations Unies pour l'environnement [PNU09]

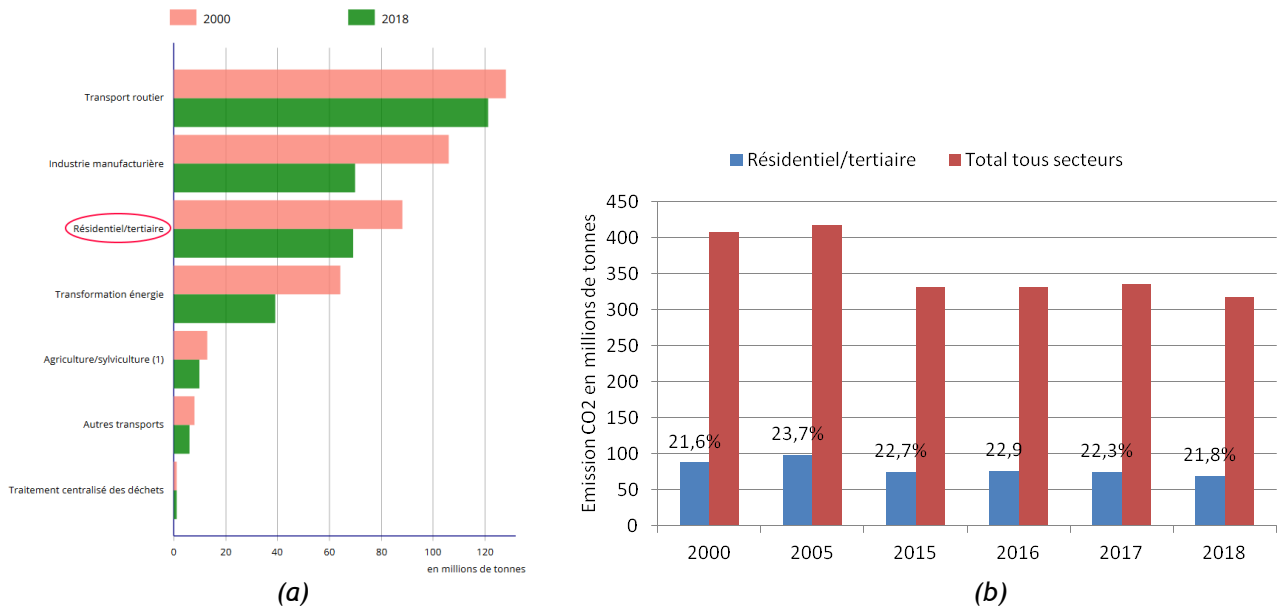


Figure 8 : (a) Émissions de CO<sub>2</sub> en France par activité en 2000 et 2018, (b) émissions de CO<sub>2</sub> du secteur résidentiel/tertiaire par rapport au total émis en France de 2000 à 2018, source [15]

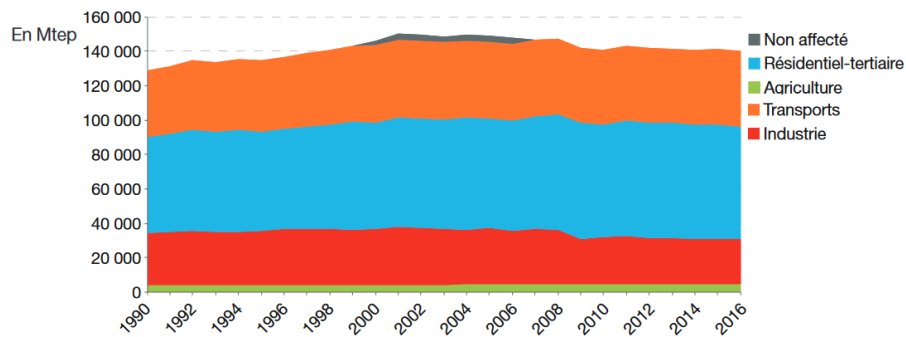


Figure 9 : Consommation finale énergétique par secteur (données corrigées des variations climatiques), (Mtep : million de tonnes équivalent pétrole), source [13]

Les objectifs du bâtiment sont multiples et peuvent résumer dans les graphes suivants :

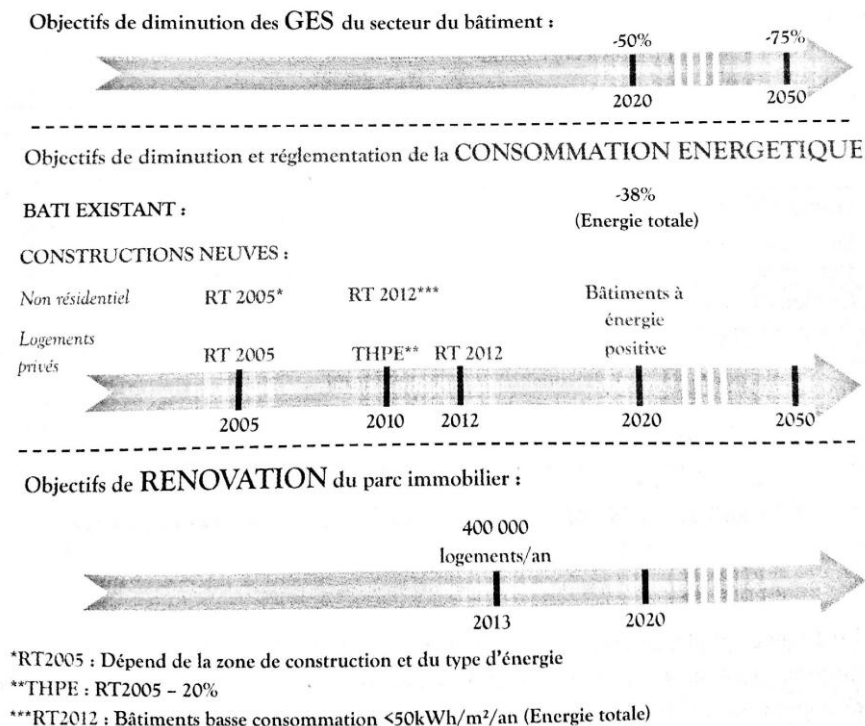


Figure 10 : Plan bâtiment Grenelle de l'environnement concernant les consommations énergétiques et les diminutions de GES du secteur bâtiment (base 1990), source [16]

Pour atteindre ces objectifs, des normes et labels ont été créés. Une des normes les plus connues est la HQE (Haute Qualité Environnementale) créée par l'association éponyme en 1996. L'association regroupe des professionnels du bâtiment, des représentants des collectivités locales, des scientifiques, des associations de préservation de l'environnement ou encore des organisations telles que l'Ademe<sup>11</sup> ou le CSTB<sup>12</sup>. La certification NF HQE est basée sur le volontariat et n'est donc pas une norme obligatoire. Elle se définit en 14 cibles (voir [18]) qui ont pour but de réduire la consommation de ressources naturelles et énergétiques en améliorant les techniques de construction.

Depuis, d'autres labels ont vu le jour comme en 2016, le label E+C- (énergie positive réduction carbone). Celui-ci vise à diminuer l'apport en énergie fossile et à augmenter l'apport en énergie renouvelable. Il concerne tous les types de bâtiment et lui non plus n'est pas obligatoire.

Certaines villes ont par ailleurs leur législation propre et décident d'introduire le coefficient de biotope. Ce coefficient désigne la part d'une parcelle aménagée ou à aménager qui sera définitivement consacrée à la nature. Cette pratique a déjà été adoptée en Europe du Nord et commence à être développée en Paris [19].

Une nouvelle fois les plantes vont influencer la conception des bâtiments, cette fois-ci pas seulement sur son esthétique mais sur ses performances énergétiques.

## 2.2 - Surfaces végétalisées

Les plantes respirent et transpirent, on le sait. Ces organismes constituent un atout majeur pour un bâtiment lorsqu'il s'agit de résistance thermique ou encore d'isolation acoustique. C'est donc naturellement qu'est venue l'idée d'en parer les bâtiments, aussi bien les murs que les toitures. Nous nous concentrerons ici sur les toitures.

### Différents types de végétalisation

On distingue trois types de végétalisation : extensive, semi-extensive, intensive. Ces catégories sont illustrées en figure 12. Une comparaison est effectuée dans le tableau suivant.

| Type de toiture       | Extensive                                      | Semi-Intensive                   | Intensive                 |
|-----------------------|--|----------------------------------|---------------------------|
| Arrosage              | Sans   | Périodique                       | Régulier                  |
| Substrat              | Léger  | Léger                            | Terre                     |
| Épaisseur du complexe | 4 à 15 cm                                      | 12 à 30 cm                       | > 30 cm                   |
| Charge totale         | 60 à 180 daN.m <sup>-2</sup>                   | 150 à 250 daN.m <sup>-2</sup>    | > 600 daN.m <sup>-2</sup> |
| Pente maximale        | 20%  | 20%                              | 20%                       |
| Document de référence | Règle professionnelle de la CSFE <sup>13</sup> | Règle professionnelle de la CSFE | DTU <sup>14</sup> 43.1    |
| Type de culture       | Végétalisation légère                          | Végétalisation légère            | Végétalisation horticole  |

Figure 11 : Comparaison des trois types de végétalisation des toitures, source [24]

<sup>11</sup> Ademe : Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie

<sup>12</sup> CSTB : Centre Scientifique et Technique du Bâtiment

<sup>13</sup> CSFE : Chambre Syndicale Française de l'Étanchéité

<sup>14</sup> DTU : Document Techniques Unifiées, DTU 43.1 : Étanchéité des toitures-terrasses et toitures inclinées avec éléments porteurs en maçonnerie en climat de plaine



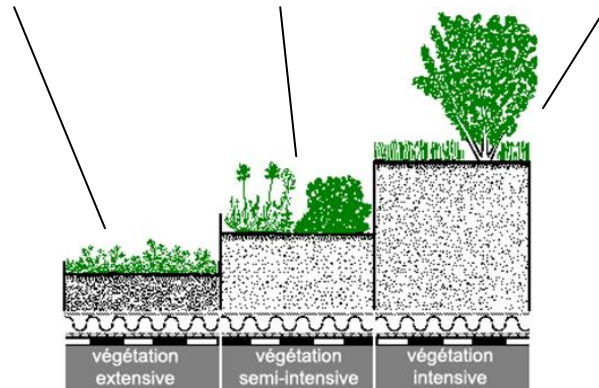


Figure 12 : Exemple de trois types de végétalisation des toitures, sources [20] [21]

Ce qui va changer d'une toiture végétalisée à l'autre sera donc essentiellement le type de plantes cultivées ainsi que le substrat qui doit s'adapter au complexe de culture. Plus on veut de grandes plantes, donc des racines plus en profondeur, plus il y a nécessité d'un substrat épais.

### Composition des toitures

Quelque soit le type de végétalisation la toiture comportera une isolation thermique (précédée éventuellement d'un pare-vapeur), une étanchéité, une couche de drainage, une couche filtrante et enfin le substrat dans lequel les plantes seront installées.

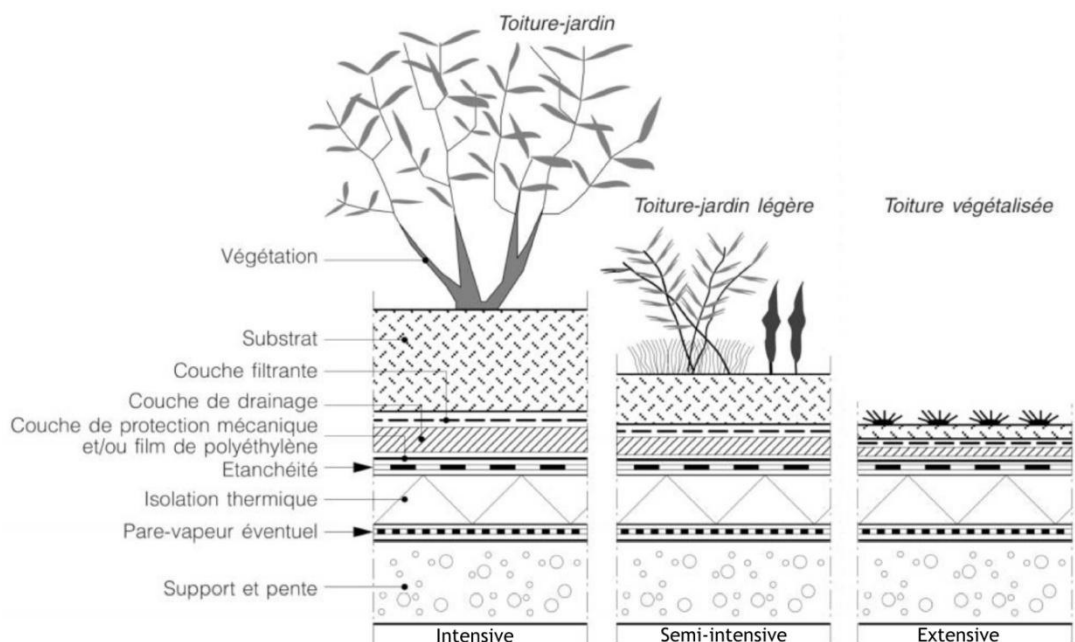


Figure 13 : Composition des toitures selon le type de végétalisation, source [22]

Il faut noter qu'un nouveau type de toiture dite « inversée » voit le jour. Dans ce type de toiture, étanchéité et isolant sont inversés. Ceci permet notamment de maintenir la couche d'étanchéité à un faible gradient de température et ainsi d'éviter la condensation au niveau de cette couche.

Le choix de l'isolant est néanmoins restreint. En effet, à ce jour les seuls bénéficiant d'un avis technique favorable sont les mousses de polystyrène extrudé [43].

### Avantage des toitures vertes

Les toitures végétalisées présentent de nombreux avantages aussi bien environnementaux qu'économiques ou socioculturels.

**Avantages environnementaux** : il s'agit sans doute des avantages les plus évidents, on peut distinguer :

- **La gestion des eaux** : la zone végétalisées agit comme un espace tampon. Une part des eaux est filtrée est absorbée par cette zone via son substrat et sa couche drainante. Les toits végétalisés permettent de réduire et différer le ruissellement vers les égouts ainsi que les risques d'inondation et d'érosion, ils permettent également de restituer une partie de l'eau dans l'atmosphère grâce à l'évapotranspiration des plantes et à l'évaporation du substrat. À titre d'exemple, la rétention des eaux de pluies est de 20% pour une habitation standard (toiture non-végétalisée), 40% pour une toiture extensive (mousse essentiellement) et 95% pour un parc ;
- **Le renforcement de la biodiversité et des habitats pour la faune** : en effet, la végétalisation constitue inévitablement des habitats pour la faune telle que les insectes, ... Cependant un réel impact des toitures sur la biodiversité est à mettre en regard de la végétalisation globale environnante, une toiture verte seule au milieu d'un îlot de maisons en plein centre-ville n'aura certainement pas le même impact que tout un quartier équipé de toitures végétalisées ;
- **L'amélioration du microclimat local** : grâce au pouvoir absorbant du substrat et du couvert végétal, les toitures vertes ne réfléchissent que très peu de rayons solaires et régulent la température de l'air ambiant. Elles contribuent ainsi à réduire l'effet d'îlot thermique (dû notamment à la radiation de la chaleur emmagasinée par les constructions) qui engendre des températures plus élevées et une hygrométrie de l'air plus faible.

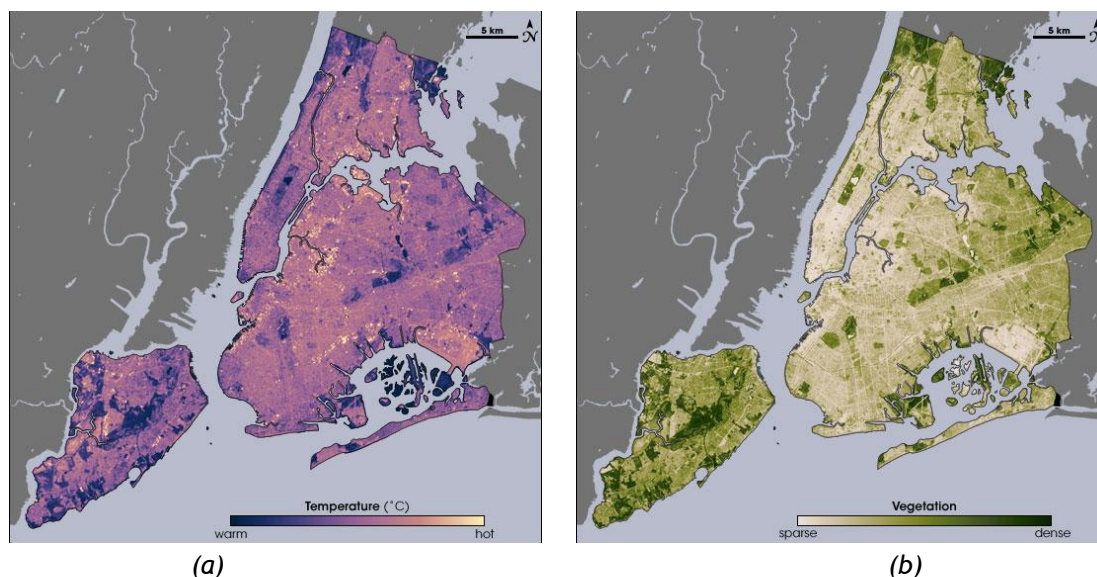


Figure 14 : Comparaison entre la température (a) et la densité de végétalisation (b) à New-York, source [23]

**Avantages économiques** : l'investissement dans une toiture verte peut être vu comme rentable, en effet :

- **L'investissement de base** dans une toiture verte est nécessairement plus élevé que pour une toiture traditionnelle et dépend de beaucoup de paramètres (accessibilité, superficie, matériaux, systèmes, épaisseur du substrat, ...). Dans tous les cas le coût augmente avec

l'épaisseur du substrat. Néanmoins cet investissement est à mettre en regard de la réduction des coûts pour la climatisation du bâtiment, la diminution des coûts d'entretien et de réparation réguliers de l'étanchéité traditionnelle, économie du gravier de lestage de la toiture plate traditionnelle ;

- **Le coût d'entretien** augmente aussi avec l'épaisseur du substrat, mais on rappelle que des économies sont faites au niveau de l'étanchéité, puisque la durée de vie de celle-ci est augmentée. Par ailleurs, il faut noter que la toiture extensive ne nécessite quasiment pas d'entretien.

**Avantages socioculturels** : on peut noter quelques impacts indirects :

- **Santé et psychosensoriel** : la création de ces espaces verts constitue un contact avec la nature, améliorant ainsi la qualité de vie et participant au sentiment de bien-être ;
- **Confort visuel** : les surfaces végétalisées contribuent réellement à l'esthétique des bâtiments et îlots en réduisant l'impact visuel de parkings ou encore grandes surfaces ;
- **Gestion collective** : la gestion d'une toiture végétalisée peut être l'occasion d'échanges notamment dans les écoles ou les logements collectifs. Cette gestion peut prendre la forme d'un projet unissant les habitants ou les usagers.

### 2.3 - Un exemple de calcul

Nous considérons dans l'exemple suivant, une toiture terrasse avec des espaces chauffés en dessous. Dans le premier cas, la toiture sera considérée non végétalisée à isolation extérieure et dans le second, nous considérerons une végétalisation extensive. Enfin, pour se rapprocher un peu plus de la réalité, nous estimerons la température de surface du parterre humide grâce à la formule dite de Rohwer. Pour tous les calculs nous considérerons la toiture représentée par la vue en coupe (plancher haut) figure 15 ; la dalle a une épaisseur  $e_d = 20$  cm.

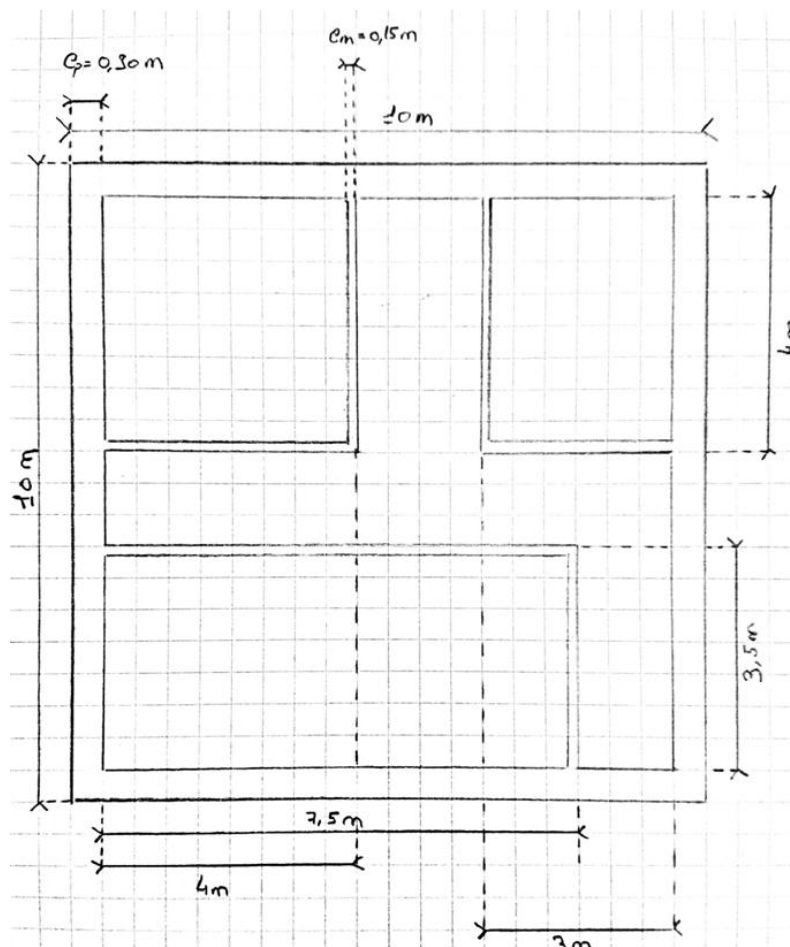
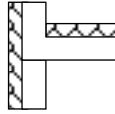


Figure 15 : Exemple de toiture, vue en coupe - plancher haut

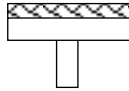
## Toiture non végétalisée

Les jonctions entre murs et plancher haut vont générer des ponts thermiques linéiques, nous allons en considérer deux sortes (tous les symboles ainsi que les gardeurs qu'ils représentent et leurs unités sont regroupés paragraphe 5 - Tables des symboles) :

- Un pont thermique linéique généré par les murs porteurs et valant  $\Psi_p = 0,93 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;



- Un pont thermique linéique généré par les cloisons et valant  $\Psi_m = 0,02 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;



On a les données suivantes :

- Dalle en béton armé :  $e_d = 20 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 2,40 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$  ;
- Laine de roche de classe RA1 :  $e_d = 12 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 0,001 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$  ;
- Mur porteur en béton armé :  $e_d = 30 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 2,40 \text{ W.m}^{-1}.\text{k}^{-1}$  ;
- Température intérieure :  $T_{\text{int}} = 20^\circ \text{C}$  ;
- Température extérieure :  $T_{\text{ext}} = 13^\circ \text{C}$  (température moyenne en France métropolitaine) ;
- Résistance superficielle de la paroi intérieure :  $R_{\text{si}} = 0,10 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$  ;
- Résistance superficielle de la paroi extérieure :  $R_{\text{se}} = 0,04 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$ .<sup>15</sup>

On rappelle quelques formules :

$$U_e = \frac{1}{R_{\text{si}} + R_{\text{se}} + \sum_i \frac{e_i}{\lambda_i}} \quad [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}] \quad (1)$$

$$H_s = \sum_j U_j \cdot A_j + \sum_k \Psi_k \cdot L_k \quad [\text{W.K}^{-1}] \quad (2)$$

$$D = H_s \Delta T \quad [\text{W}] \quad (3)$$

Les cloisons internes ont une longueur totale  $l = 26 \text{ m}$ , le périmètre vaut  $L = 40 \text{ m}$ . On a donc :

- $\sum_i \frac{e_i}{\lambda_i} = \frac{0,2}{2,4} + \frac{0,12}{0,017} = 7,14 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$  ;
- $\sum_k \Psi_k \cdot L_k = 0,02 \cdot 26 + 0,93 \cdot 40 = 37,72 \text{ W.K}^{-1}$  ;
- $U = 0,137 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .

On trouve donc une déperdition thermique valant :  $D_{\text{norm}} \cong 361 \text{ W}$

## Toiture végétalisée

Dans ce calcul, nous garderons les mêmes géométries de plancher, le même gradient de température, la même isolation. On rappelle les différentes couches composant une toiture végétalisée :

<sup>15</sup> Les résistances superficielles tiennent compte de la convection et du rayonnement [24]

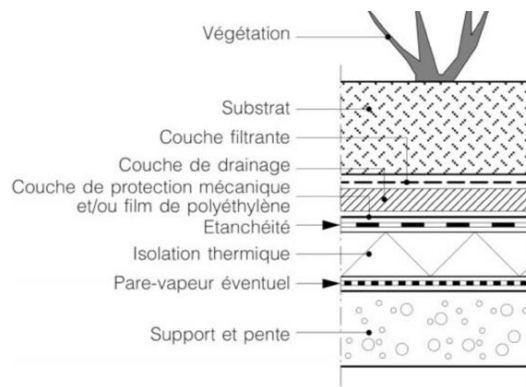


Figure 16 : Les différentes couches composant une toiture végétalisée, source [22]

On a les données suivantes [22] :

- Substrat,  $e_{\text{sub}} = 0,08 \text{ m}$ ,  $\lambda = 2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;
- Drainage,  $e_{\text{d}} = 0,02 \text{ m}$ ,  $\lambda = 2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;
- Etanchéité,  $e_{\text{e}} = 0,004 \text{ m}$ ,  $\lambda = 0,23 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;
- Laine de roche de classe RA1,  $e_{\text{iso}} = 12 \text{ cm}$ ,  $\lambda = 0,017 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;
- Pare-vapeur,  $e_{\text{p}} = 0,06 \text{ m}$ ,  $\lambda = 0,17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;
- Support en béton,  $e_{\text{sup}} = 0,15 \text{ m}$ ,  $\lambda = 1,7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

On a dans ce cas :

- $\sum_i \frac{e_i}{\lambda_i} = 7,57 \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$  ;
- $\sum_k \Psi_k \cdot L_k = 37,72 \text{ W.K}^{-1}$  [24] ;
- $U = 0,130 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ .

On trouve ici une déperdition thermique valant :  $D_{\text{vert}} \cong 356 \text{ W}$

### Prise en compte de l'évaporation de l'eau retenue

Le prise en compte de l'évaporation de l'eau retenue par les plantes semble assez importante a priori pour ne pas être négligée. Effectivement, les plantes refroidissent le climat de leur environnement proche. Sur une toiture verte, les plantes vont avoir tendance à retenir les eaux (jusqu'à 90% de rétention pour une toiture intensive). On peut donc considérer que dès lors qu'il pleut, la toiture se transforme en une grande surface (que l'on va considérer plane en première approximation) totalement imbibée d'eau. Cette eau en s'évaporant va donc naturellement refroidir le climat local, c'est le principe du refroidissement par évaporation. Donc le gradient thermique auquel est soumise la toiture va inévitablement augmenter.

On commence par faire un bilan thermique à l'interface toiture/air ambiant. On considère le flux entrant suivant :

$$\Phi_{\text{entrant}} = \frac{T - T_{\text{air}}}{R} \quad (4)$$

Avec R, la résistance thermique de l'interface.

On considère le flux sortant suivant :

$$\Phi_{\text{sortant}} = m_{\text{evap}} \cdot \Delta h_{\text{evap}} \quad (5)$$

Avec  $m_{\text{evap}}$ , la masse d'eau évaporée par seconde et  $\Delta h_{\text{evap}}$ , la chaleur latente massique de vaporisation. Maintenant un bilan thermique nous donne, en notant C la capacité calorifique :

$$CdT = (\Phi_{\text{entrant}} - \Phi_{\text{sortant}})dt \quad (6)$$

D'où l'équation différentielle :

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{RC}T = \frac{1}{RC}T_{\text{air}} - \frac{1}{C}m_{\text{evap}} \cdot \Delta h_{\text{evap}} \quad (7)$$

La résolution donne alors :

$$T(t) = T_{\text{air}} + m_{\text{evap}} \cdot \Delta h_{\text{evap}} \cdot R \left( \exp \frac{-t}{RC} - 1 \right) \quad (8)$$

On voit donc qu'en régime permanent :

$$T(\infty) = T_{\text{air}} - m_{\text{evap}} \cdot \Delta h_{\text{evap}} \cdot R \quad (9)$$

Nous allons ici nous appuyer sur la formule de Rohwer. Cette formule nous permet de remonter au taux d'évaporation (en mm/jour) d'eau d'une surface imbibée. Cette formule s'écrit :

$$E = 0,484 \times (1 + 0,6 \times u) \times (p_s - p_c) \quad (10)$$

On en déduit :

$$m_{\text{evap}} = \frac{E \times S \times \rho \times 10^{-3}}{86400} \quad (11)$$

Nous allons nous placer en régime permanent. On prend :

- $R = \frac{R_{se}}{S} = 4 \times 10^{-4} \text{ K.W}^{-1}$  ;
- $T_{\text{ext}} = 13 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- $T_{\text{int}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- $\Delta h_{\text{evap}} = 2454.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$  ;
- $p_s = 1497 \text{ Pa}$  ;
- $p_c = 600 \text{ Pa}$  ;
- $u = 5 \text{ m.s}^{-1}$ .

Avec ces données, on trouve maintenant :  $T_{\text{prox}} = 11,5$

Avec ce nouveau gradient thermique, on obtient une déperdition valant :  $D'_{\text{vert}} \cong 438 \text{ W}$

On voit donc bien qu'en prenant en compte l'abaissement de température dû à l'évaporation de l'eau du plancher végétalisé, les déperditions thermiques sont tout de suite significativement plus élevées.

Mais regardons en situation en phase estivale, on a alors :

- $T_{\text{ext}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- $T_{\text{int}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- $\Delta h_{\text{evap}} = 2257.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$  ;
- $p_s = 5622 \text{ Pa}$  ;
- $p_c = 2811 \text{ Pa}$  ;
- $u = 5 \text{ m.s}^{-1}$ .

On a dans ce cas :  $m_{\text{evap}} = 6,3 \text{ g.s}^{-1}$ ,  $T_{\text{plancher}} = 29,3 \text{ °C}$

Et il vient alors :

$$D_{\text{norm}} \cong 823 \text{ W}$$

$$D_{\text{vert}} \cong 507 \text{ W}$$

On voit donc tout l'intérêt que révèle un toit végétalisé en été. Celui-ci réduit de plus d'un tiers les déperditions thermiques ! Il faut par ailleurs noter le fait qu'en général les toitures plates en béton sont très souvent source d'une surchauffe. La différence de température imposée par une toiture standard est donc en réalité plus élevée que ( $T_{\text{ext}} - T_{\text{int}}$ ).

### 3 – Plantes et biomimétisme : structure

Nous avons donc pu voir deux différents stades de l'invasion des plantes dans le bâtiment : d'abord apposées en façades via des décors en fonte, inspirant aussi les gardes corps de balcon et les bow-windows Art Nouveau, puis s'insérant dans le bâtiment en poussant sur les façades et les toits. Les plantes peuvent également remplacer tout ou partie des granulats minéraux dans les bétons biosourcés...

Nous allons maintenant passer à l'ultime étape de cette invasion, quand le monde du vivant inspire l'architecture : le biomimétisme. Ce terme apparaît dès 1980 et est vulgarisé par la biologiste et environnementaliste Janine Benyus, l'auteure de l'ouvrage *Biomimicry : Innovation Inspired by Nature* [25].

#### 3.1 - Architecture biomimétique

L'architecture biomimétique ne doit pas être confondue avec l'architecture bionique ou encore l'architecture biomorphique. Tous ces termes peuvent être par ailleurs regroupés sous le terme de bio-inspiration.

L'architecture biomorphique est l'architecture dont les formes sont influencées par les formes organiques des végétaux, du corps humain ou des animaux. Elle inclut donc l'Art Nouveau.

L'architecture bionique, dont le but est la synthèse de la nature dans les technologies constructives modernes débouche sur de nouvelles formes efficaces au point de vue tant fonctionnelles qu'esthétiques. Cette architecture ne tient donc pas compte du développement durable.

L'architecture biomimétique tente elle, de développer des « relations de synergies entre le construit et son environnement » [25]. La notion de développement durable est donc au cœur de cette architecture. La démarche associée à cette dernière architecture est double [26] [27]. On distingue la démarche qui part du problème rencontré par l'humain et qui analyse comment la nature et les organismes résolvent ce problème, c'est la démarche orientée problème. Puis la démarche qui analyse les mécanismes mis en jeu dans la nature et qui regarde ensuite quels problèmes pourraient être résolus grâce à ces mécanismes, il s'agit de la démarche orientée solution.

#### 3.2 - les trois niveaux du biomimétisme

Il existe trois différents niveaux dans la conception architecturale biomimétique [28]:

- Le niveau organisme s'inspire d'un être et peut impliquer d'imiter une partie de l'organisme ou son tout ;
- Le niveau comportement tente de traduire le comportement de l'organisme d'un être ;

- Le niveau écosystème a pour but d'imiter tout un écosystème entier ainsi que les principes qui le rendent viable.

Enfin, dans chacun de ces niveaux existent encore cinq dimensions traduisant la démarche de réflexion : la forme, le matériau, la construction, le processus et la fonction. On comprend donc que les animaux ainsi que les plantes, en tant qu'organismes à part entière, vont être au cœur de la démarche architecturale biomimétique.

### 3.3 - Exemples de chaque niveau

**Le niveau organisme** est celui qui s'inscrit le plus naturellement dans la suite de cette ressource. Effectivement, il s'agit d'un biomimétisme de forme et de surface. L'inspiration vient directement des formes observées dans la nature. Quelle différence avec l'Art Nouveau ?

Mise à part l'inspiration il n'y a aucun rapport. En effet, il ne faut pas oublier que la démarche architecturale biomimétique tente de résoudre des problèmes de manière ingénieuse. À aucun moment l'Art Nouveau ne tente de résoudre un problème, si ce n'est esthétique. Il s'agit réellement d'un nouveau stade de l'architecture.

L'imitation de l'organisme peut se voir immédiatement dans les deux exemples qui suivent. Ils se trouvent tous deux à Singapour. Le premier est celui de l'Esplanade Theatres de DP Architects et Michael Wilford. La couverture de la structure d'inspire directement de la peau d'un fruit, le durian. Elle est composée de panneaux d'aluminium qui filtrent la lumière du soleil et changent de direction avec le soleil. Cette conception biomimétique réduit de 30% l'énergie totale consommée dans le bâtiment et de 55% l'utilisation de l'éclairage artificiel.

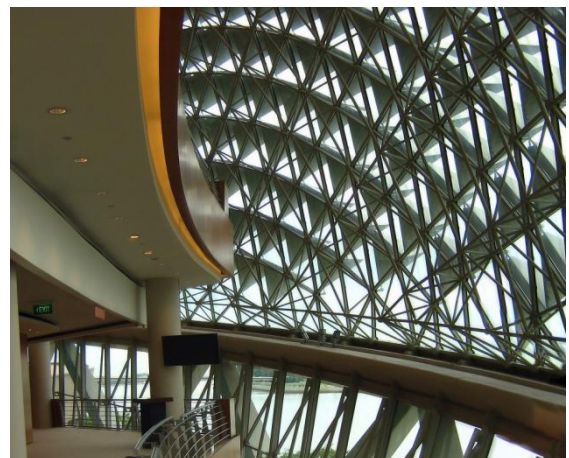


Figure 17 : Esplanade Theatres, vues extérieure et intérieure, sources [29] [30]



Figure 18 : Un durian, source [31]



Le second exemple encore très impressionnant du niveau organisme de l'architecture biomimétique est celui du ArtScience Museum. Dans ce cas, l'inspiration vient de la fleur de lotus ou nymphéas. L'arrangement particulier des pétales qui composent le bâtiment permet de récupérer l'eau de pluie afin de la recycler et laisse entrer la lumière naturelle dans plusieurs directions diminuant ainsi l'usage de l'éclairage artificiel. Au vu de la complexité de la structure métallique le BIM<sup>16</sup> a été utilisé par le bureau d'étude Yongnam basé à Singapour. Celui-ci a pu ainsi dessiner 5000 pièces d'acier ainsi que les élévations qui ont permis que les différents pétales s'ajustent parfaitement.



Figure 19 : ArtScience Museum en construction et terminé, sources [32] [33]



Figure 20 : Fleur de Nymphéas

**Le niveau comportement** est un biomimétisme de processus ou de fonction. La nature est observée et on analyse comment elle réalise une fonction pour, par la suite, l'imiter.

Un très bel exemple est celui de l'Eastgate Building à Harare au Zimbabwe, réalisé par l'architecte Mick Pearce. Pour ce bâtiment, l'architecte s'est inspirée de la thermorégulation des termitières. Ce système de ventilation passive permet de diminuer considérablement les consommations d'énergie. Une étude comparative menée avec six autres bâtiments a montré que l'Eastgate Building utilise 35% moins d'énergie qu'un bâtiment conventionnel avec air conditionné, soit une économie estimée à environ 3,5 millions de dollars sur cinq ans [34].

<sup>16</sup> Building Information Modeling

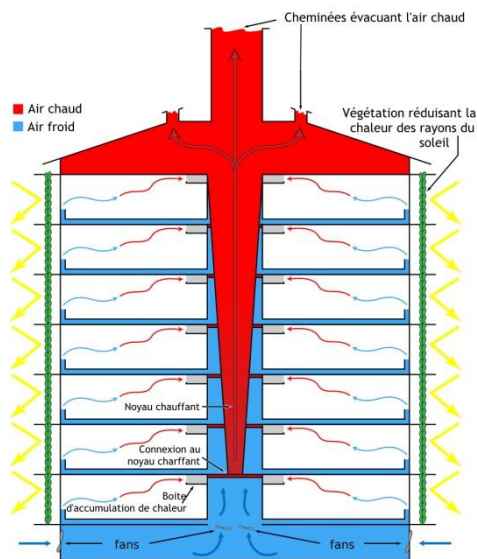


Figure 21 : Schéma de fonctionnement de la ventilation naturelle du bâtiment, l'Eastgate Building et ses cheminées, sources [35] [36]

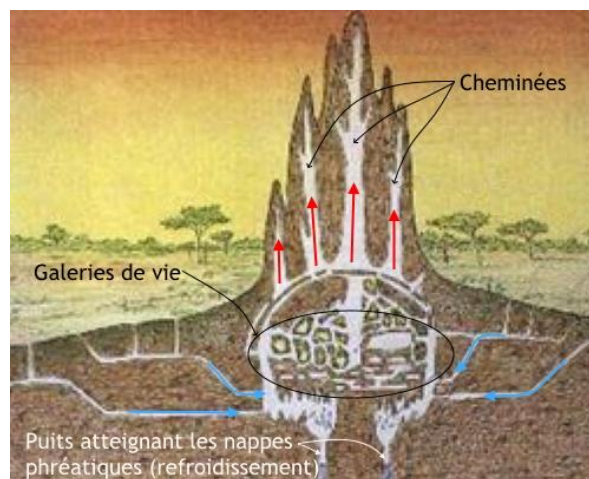


Figure 22 : Schéma de fonctionnement de la ventilation naturelle d'une termitière, source [376]

**Le niveau écosystème** correspond à une conception englobant toute une ville, tout un « écosystème » de bâtiment. Le but est de comprendre les interactions entre certaines espèces et leur environnement qui produisent un système stable et durable.

Le projet Kalundborg Symbiosis est le parfait exemple de cet ultime niveau de biomimétisme. Il s'agit d'un partenariat entre neuf entreprises publiques et privées. Elles ont développé ensemble au Danemark depuis 1972, le premier projet de symbiose industrielle et de production circulaire. Le principe est simple : les déchets d'une entreprise deviennent les ressources d'une autre. Il y a donc des avantages économiques et environnementaux évidents [38]. La figure 23 représente les différents flux d'énergie (rouge), d'eau (bleu) et de matériaux (verts) entre les entreprises.

Le biomimétisme est donc un moyen d'accroître la durabilité d'un projet et de limiter son impact sur l'environnement. Les stratégies que la nature nous offre à observer et analyser sont des stratégies qui ne peuvent être que bénéfiques à la conception architecturale.

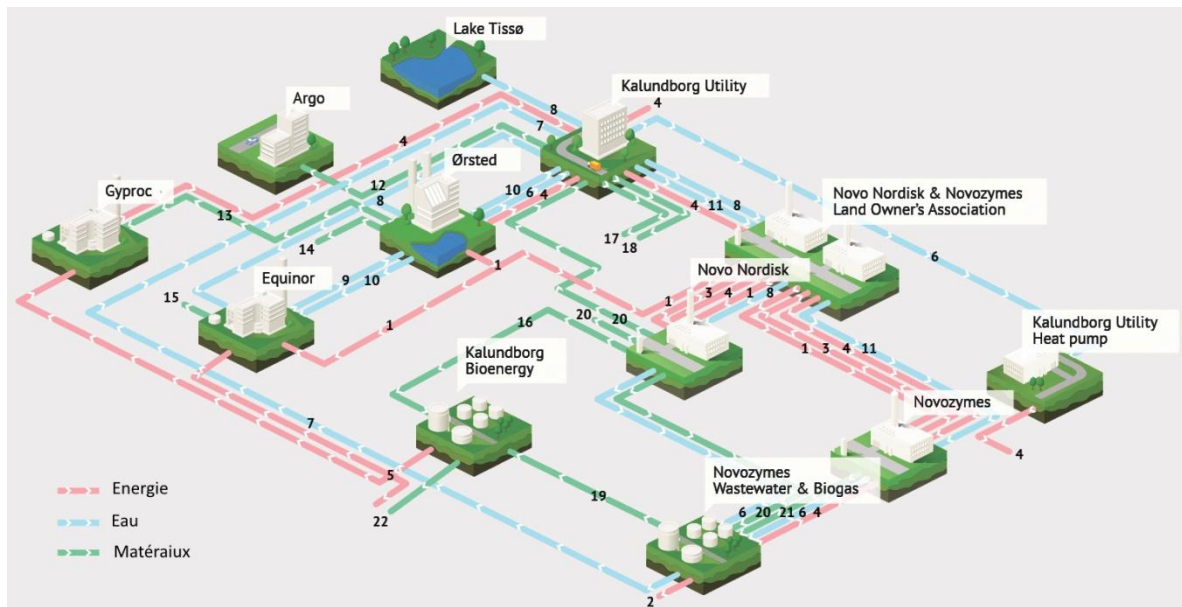


Figure 23 : Schéma des flux du projet Kalundborg Symbiosis, source [38]

### 3.4 - À l'interface entre biologie et architecture

D'après ce qui précède nous voyons apparaître un lien fort et étroit entre l'architecture et la biologie, il y a une forte interdisciplinarité mise en jeu lors de la conception de projets biomimétiques. Tout le problème de cette conception est donc de savoir comment passer d'une discipline à une autre de manière ingénieuse. Effectivement, on ne peut pas directement copier la nature. Il doit y avoir en amont de la conception tout un travail d'extraction, d'analyse et d'abstraction. C'est ce travail qui implique l'interdisciplinarité nécessaire au bon déroulement de la conception. Nachtigall<sup>17</sup> définit l'approche du biomimétisme pour l'architecture et le design comme un processus en trois étapes : recherche, abstraction, implémentation [39].

De ce processus cognitif émergent deux difficultés majeures pour l'architecte qui sont [25] :

- Que regarder dans la nature ?
- Commente interpréter les processus de la nature en tâche de conception ?

Pour répondre à ces questions il est alors possible d'adopter deux points de vue différents. Le premier est indirect, l'architecte réutilise des outils et travaux biomimétiques souvent issus de l'informatique. Le parfait exemple est celui du Physarum Solver. Ce solveur a été implémenté en observant une moisissure capable de trouver les plus courts chemins jusqu'à sa nourriture, le Physarum Polycephal. L'algorithme permet de créer maintenant des réseaux de transports et de distributions optimisés.

Le deuxième point de vue, direct, fait appel à une collaboration entre architecte et biologiste. Le but ici est de transposer des formes et procédés techniques naturels à des formes et procédés techniques architecturaux lors de la conception. Par exemple, l'architecte Lidia Badarnah collabore avec des biologistes et biophysiciens pour élaborer une méthodologie et des outils biomimétiques en vue de concevoir des enveloppes bio-inspirées pour l'architecture. Les travaux montrent que cette étroite collaboration a permis d'identifier des convergences fonctionnelles pour différents défis environnementaux dans le bâtiment et dans la nature. On comprend que ce

<sup>17</sup> Werner Nachtigall, biologiste co-inventeur en 2003 avec Göran Pohl architecte, du « Bau-Bionik » ou interdisciplinarité associant biologie et architecture

processus peut être fructifiant mais son inconvénient majeur est de nécessiter une longue maturation, du fait même de la collaboration impliquée.

À bien des égards l'architecture biomimétique semble offrir de nombreux avantages et des solutions face aux problèmes environnementaux actuels. Néanmoins les étapes de recherche et d'abstraction, ainsi que la collaboration nécessaire à la conception biomimétique en font un processus lent. Ceci est d'autant plus crucial à une époque où l'on ne laisse que peu de temps aux projets urbains de se faire.

#### 4 – Conclusion - ouverture

Nous avons décidé de parler d'« invasion » mais arrivé à la fin de cette ressource, il paraît évident que c'est bien l'être humain qui est allé chercher les plantes et autres organismes pour répondre à ses besoins en matière de conception architecturale. En d'autres termes, il ne s'agit pas vraiment d'invasion de plantes mais plutôt de l'appropriation des mécanismes de la nature, de ses organismes et de ses écosystèmes, par l'humanité. À tous les stades de l'histoire présentés ici, on retrouve une collaboration directe ou indirecte, mais bien étroite, entre architecture et biologie. Le but est toujours le même : mettre la nature au cœur des réflexions de l'Humain sur son environnement urbain.

Il est important de remarquer que la chronologie qui a été proposée dans cette ressource peut totalement être remise en cause. Effectivement, nous avons regardé l'exemple de l'Art Nouveau pour les décorations florales de façades mais nous aurions très bien pu appréhender les sculptures romanes ou gothiques des églises du Moyen-âge (figure 24). Pour ce qui est des surfaces végétalisées, nous aurions tout à fait pu aborder le cas des maisons scandinaves remontant à l'époque Viking (figure 25). Enfin, pour les structures biomimétiques, nous aurions aussi pu dissenter sur les ponts vivants du Meghalaya (figure 1) nous ramenant 500 ans en arrière ! Une telle chronologie a été choisie car elle permet de comprendre aisément les ponts franchis par l'architecture sur un laps de temps que l'on peut se représenter. Elle permet de plus de souligner la continuité de l'invasion des plantes en urbanisme lors du dernier siècle et met surtout en avant la renaissance et incessante volonté que nous avons de vivre plus proches de la nature.



(a) (b)  
Figure 24 : Détails ornementations (a) église Sainte-Marie de Quintanilla de Las viñas fin VII<sup>e</sup>-début VIII<sup>e</sup> (Espagne), (b) culot église Saint-Jean-au-Marché de Troyes XIII<sup>e</sup>, sources [39] [41]



Figure 25 : Reconstruction de la maison viking d'Erik le Rouge (X<sup>e</sup> siècle) près de Narsaq au Groenland, source [42]

Au vu du contexte écologique actuel, et après avoir assisté à une bétonisation excessive de notre environnement, cela ne peut a priori qu'être rassurant. Masi il faut également remarquer que l'idée n'est pas neuve. Friedensreich Hundertwasser<sup>18</sup> dans *Reboisement de la ville*, en 1971, abordait déjà le sujet d'une architecture écologique. Aujourd'hui, il est intéressant de comprendre et d'analyser ce qui nous retient de sauter dans le monde de la « Végétal City ». La course aux nouvelles technologies est inéluctable, souvent pour le mieux, mais doit-elle nécessairement nous mener aux Smart Cities ? Se rapprocher de la nature dans l'architecture n'est pas synonyme de retour en arrière, de préhistoire ou d'inconfort !

## 5 – Table des symboles

| Symbole           | Grandeur  | Unités                             |
|-------------------|---|------------------------------------|
| $E$               | Taux d'évaporation                              | mm.jour <sup>-1</sup>              |
| $C$               | Capacité calorifique                            | J.K <sup>-1</sup>                  |
| $S$               | Surface du plancher                             | M <sup>2</sup>                     |
| $p_s$             | Pression de vapeur saturante                    | Pa                                 |
| $P_e$             | Pression de vapeur partielle                    | Pa                                 |
| $\Phi_{entrant}$  | Flux de chaleur entrant                         | W                                  |
| $\Phi_{sortant}$  | Flux de chaleur sortant                         | W                                  |
| $m_{evap}$        | Masse d'eau évaporée par seconde                | Kg.s <sup>-1</sup>                 |
| $T_{air}$         | Température de l'air                            | °C                                 |
| $\Delta h_{evap}$ | Chaleur latente de vaporisation de l'eau        | J.kg <sup>-1</sup>                 |
| $\rho$            | Masse volumique de l'eau                        | Kg.m <sup>-3</sup>                 |
| $R$               | Résistance thermique du plancher végétalisé     | K.W <sup>-1</sup>                  |
| $R_{se}$          | Résistance superficielle de la paroi extérieure | K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup>  |
| $R_{si}$          | Résistance superficielle de la paroi intérieure | K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup>  |
| $u$               | Vitesse du vent                                 | m.s <sup>-1</sup>                  |
| $U_e$             | Coefficient de transmission surfacique          | W.m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> |
| $H_s$             | Coefficient de déperdition par transmission     | W.K <sup>-1</sup>                  |
| $\lambda$         | Conductivité thermique                          | W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |
| $\Psi$            | Coefficient de déperdition linéique             | W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> |

<sup>18</sup> Friedrich Stowassern dit Friedensrieich Hundertwasser Regentag Dunkelbunt (1928-2000), architecte autrichien

## Références :

- [1]: National Geographic, photographie de Giulio Di Sturco, <https://www.nationalgeographic.fr/voyage/les-ponts-vivants-du-meghalaya-voyage-entre-eau-et-brume>
- [2]: Nadar — <http://perso.wanadoo.fr/patrimoineindustriel/Petit%20Fagnieres/tour.htm>, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=855235>
- [3]: L'imaginaire scientifique de Viollet-le-Duc, L. Bauridon, l'Harmattan
- [4]: <http://www.lecercleguimard.fr/fr/les-portraits-du-cooper-hewitt/>
- [5]: <http://www.parijs1900.nl/lecole-du-sacre-coeur/>
- [6]: Les fontes d'ornement d'Hector Guimard : tentative de démocratisation par l'industrialisation d'une esthétique personnelle, F. Descouturelle
- [7]: Original téléversé par MOSSOT sur Wikipédia français. — Own (MOSSOT), CC BY 1.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23961918>
- [8]: <http://www.lecercleguimard.fr/fr/tag/fontes-fr/>
- [9]: Jean-Pierre Dalbéra from Paris, France — Cheminée d'Hector Guimard (Musée du Petit Palais), CC BY 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24669800>
- [10]: <https://paricultures.com/japonisme-guimard-art-nouveau/>
- [11]: Moonik — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23505635>
- [12]: MrsEllacott — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=35181941>
- [13]: Commissariat général au développement durable, les chiffres clés de l'énergie, édition 2018, <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/datalab-43-chiffres-cles-de-l-energie-edition-2018-septembre2018.pdf>
- [14]: Conversion d'énergie et efficacité énergétique, B. Multon, H. Horsin Molinaro, 2018, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/conversion-denergie-et-efficacite-energetique](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/conversion-denergie-et-efficacite-energetique)
- [15]: Insee, Rapport Secten mai 2019, <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2015759>
- [16]: Les bétons de Granulats d'origine végétale, S. Amziane, L. Arnaud, Hermès Science
- [17]: Ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales, <https://www.cohesion-territoires.gouv.fr/dechets-du-batiment>
- [18]: Les 14 cibles de la démarche HQE, L'architecture écologique, Dominique Gauzin-Müller, Le Moniteur 2001, <https://www4.ac-nancy-metz.fr/pasi/IMG/57HayangeLGrandsBois2006ann15.pdf>
- [19]: Développer le végétal à Paris, Les nouvelles règles du Plan Local d'Urbanisme de Paris, apur (atelier parisien d'urbanisme), octobre 2004, <https://www.apur.org/fr/nos-travaux/developper-vegetal-paris-nouvelles-regles-plan-local-urbanisme-paris>
- [20]: <https://toiture.bilp.fr/toiture-terrasse-12/partie-2-les-differents-types-de-vegetalisation>
- [21]: <http://agamede.free.fr/techniqueb2.php>
- [22]: les toitures vertes, Note d'information technique 229, CSTC, <https://www.cstc.be/>
- [23]: NASA, Domaine public, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6025873>

- [24]: Règles Th-bat - Ponts thermiques 2017, [https://www.rt-batiment.fr/documents/rt2012/thbat/1-Fascicule\\_generalites.pdf](https://www.rt-batiment.fr/documents/rt2012/thbat/1-Fascicule_generalites.pdf)
- [25]: Les cahiers de la recherche architecturale urbaine et paysagère 1, 2018
- [26]: T. Speck & O. Speck (2008), Process sequences in biomimetic research. In WIT Transactions on Ecology and the Environment: Vol. 114. Design and Nature IV (Brebba, C.A., Ed.), pp. 3-11. Southampton: WIT Press
- [27]: M. Helms, S.S.Vattam, & A.K. Goel (2009), Biologically inspired design : process and products. Design Studies 30(5), 606-622
- [28]: An ecosystem based biomimetic theory for a regenerative built environment, M.P. Zari 2007
- [29]: Basile Morin - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=71047823>
- [30]: No machine-readable author provided. Calvin Teo assumed (based on copyright claims). - No machine-readable source provided. Own work assumed (based on copyright claims), CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=830686>
- [31]: <https://www.alimentarium.org/fr/savoir/durian>
- [32]: <https://www.tekla.com/references/artscience-museum-0>
- [33]: <https://www.area-arch.it/en/artscience-museum/>
- [34]: <http://biomimetisme.eklablog.com/ventiler-et-isoler-grace-a-la-nature-c17270649>
- [35]: Natural\_ventilation\_high-rise\_buildings.JPG: KVDPVector version: Fred the Oyster, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9951067>
- [36]: <https://biomimetisme.wordpress.com/le-biomimetisme-dans-lhabitat/>
- [37]: <https://biomimetis.me/2014/02/clim-et-termites/>
- [38]: <http://www.symbiosis.dk/en/>
- [39]: Biomimétisme en architecture. État, méthodes et outils, N. Chayaamor-Heil, F. Guéna, N. Hannachi-Belkadi
- [40]: AnTeMi – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=138030>
- [41]: <https://www.patrimoine-histoire.fr/Patrimoine/Troyes/Troyes-Saint-Jean-au-Marche.htm>
- [42]: <https://maison-monde.com/maisons-viking/>
- [43]: Recommandations professionnelles de la CSFE, pour la conception de l'isolation thermique des toitures-terrasses et toitures inclinées avec étanchéité, mai 2012