

Mémoire de fin d'études : "Les forêts verticales sont-elles capables d'apporter une réponse aux problèmes en milieu urbain ?"

Auteur : Hissette, Louis

Promoteur(s) : Henz, Olivier

Faculté : Faculté d'Architecture

Diplôme : Master en architecture, à finalité spécialisée en art de bâtir et urbanisme

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/9830>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



UNIVERSITÉ DE LIÈGE – FACULTÉ D'ARCHITECTURE

LES FORÊTS VERTICALES SONT-ELLES CAPABLES D'APPORTER UNE RÉPONSE AUX PROBLÈMES EN MILIEU URBAIN ?

Travail de fin d'études présenté par Louis Hissette en vue de l'obtention du grade de
Master en Architecture

Sous la direction de : Olivier Henz

Année académique 2019-2020

Haute qualité construit

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de fin d'étude.

Tout d'abord, je tiens spécialement à remercier mon promoteur Olivier Henz pour son investissement dans ce travail ainsi que ses précieux conseils.

Ensuite, Jean-Philippe Possoz ainsi que Sébastien Ochej qui ont acceptés d'être les lecteurs de ce mémoire.

Je remercie également Johanne Hardy, Marie-José Balaise, Michaël Hissette ainsi que Simon Hissette pour leurs relectures ainsi que leurs remarques constructives fournies tout au long de la rédaction.

Enfin, j'aimerais également remercier mon entourage pour son soutien tout au long de mes recherches.

PRÉAMBULE

Lorsque je me suis lancé dans les études d'architecture, je n'étais pas conscient de l'impact que l'architecte pouvait avoir sur la société. C'est seulement lors de ces trois dernières années d'apprentissage que j'ai eu l'occasion de découvrir, d'apprendre et de développer un intérêt de plus en plus grand pour l'écologie.

Conscientisé sur les enjeux environnementaux et sociétaux actuels, je continue à m'informer sur l'architecture de demain. En effet, de nombreux architectes ont pour but d'imaginer à quoi va ressembler notre habitat dans les années à venir. J'ai analysé des projets architecturaux de maisons, de tours d'habitations et même de gares. J'ai remarqué un élément commun : il y avait toujours une présence végétale dans les images projetées. Ce vert, qui symbolise la végétation, est devenu de nos jours un élément incontournable dans la conception de projets.

En tant que jeune étudiant peu expérimenté et naïf, cette omniprésence de végétation sur tous les projets me donnait une sorte de satisfaction personnelle qui me permettait d'entretenir un espoir quant à la conscientisation des enjeux écologiques.

Intrigué par cette nouvelle « mode », et suite à la lecture du livre intitulé « Paris 2050 » écrit par Vincent Callebaut (2015), j'ai décidé d'orienter mon choix de travail de fin d'études vers la végétalisation des tours en milieu urbain, et plus précisément sur la première forêt verticale. L'alliance des problèmes environnementaux liés aux problèmes en milieu urbain me paraît être un enjeu crucial pour l'avenir de l'architecture.

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	3
1 Table des illustrations.....	9
Introduction.....	11
2 Méthodologie.....	13
Partie 1 : Découverte.....	15
3 Première approche.....	16
4 Historique	17
4.1 Façade végétale, une longue histoire.....	17
5 Présentation du Bosco Verticale	20
6 Avantages des murs végétaux.....	22
7 Contextualisation des problèmes	24
7.1 Démographie.....	24
7.2 En ville	26
7.2.1 Ilot de chaleur urbain	27
7.2.2 Pollution dans l'air	29
7.2.3 Capacité biologique	31
7.3 Conclusion.....	32
8 Avantages de la végétation.....	33
8.1 Avantages environnementaux.....	33
8.1.1 Réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain.....	33
8.1.2 Amélioration de la qualité de l'air.....	35
8.1.3 Absorption du dioxyde de carbone	36
8.1.4 Forêt verticale.....	37
8.1.5 Biodiversité.....	38
8.2 Avantages architecturaux	39
8.2.1 Isolation acoustique	39
8.2.2 Isolation thermique	39

8.2.3	Effet paravent	40
8.2.4	Rétention d'eau	40
8.2.5	Humidité	41
8.3	Avantages sociaux	41
8.3.1	Bien-être	41
8.4	Conclusion	42
Partie 2 : Approfondissement.....		43
9	Seconde approche.....	44
10	Remise en question	45
10.1	Coûts	45
10.2	Nouvelle mode	47
10.2.1	Centre de réhabilitation, Stefano Boeri	48
10.2.2	Peruri 88, MVRDV	50
10.2.3	Le cinq, Neutelings Riedijk Architects	51
10.2.4	Mise en commun.....	52
10.3	La place de l'arbre	54
10.3.1	Sa vie en altitude.....	54
10.3.2	Murs végétaux	55
10.4	Privatisation de la végétation	58
10.5	Rôle de la nature en ville	59
10.5.1	Isola Pepe Verde	59
10.5.2	Contrôle de la nature	61
10.6	Arbre béton.....	63
10.6.1	Réalisation d'un balcon type	65
10.6.1.1	Végétation par balcon	66
10.6.1.2	Emission de CO ₂ pour la construction des balcons	67
10.6.1.3	200 tours du monde	68
10.6.1.4	Analyse du résultat	69
10.7	Paradigme des voitures.....	71
10.8	Conclusion	73

Partie 3: Cas d'étude.....	74
11 Le pavillon des Pays-Bas à l'exposition universelle en 2000 par MVRDV	75
11.1 « Homme, Nature et Technologie ».....	76
11.1.1 « La Hollande crée l'espace »	76
11.1.2 « Les Pays-Bas empilent les paysages ».....	77
11.2 Vision écologique.....	79
11.2.1 Après l'exposition.....	79
11.2.2 Pavillon Suisse.....	81
11.3 Conclusion.....	83
12 Désillusion.....	84
13 Bibliographie.....	87
14 Annexes.....	93

1 TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Photographie du Bosco Verticale.....	20
Figure 2: Plan d'un étage type du Bosco verticale.....	21
Figure 3: Prédiction de l'évolution de la population mondiale en 2100.....	25
Figure 4: Illustration du profil thermique d'un îlot de chaleur en milieu urbain.....	27
Figure 5: Cartes des températures de la ville de Milan et Madrid en juin 2019.	28
Figure 6: Inventaire des polluants atmosphériques.....	30
Figure 7: La capacité biologique mondiale.....	31
Figure 8: La capacité biologique de l'Italie.	32
Figure 9: La capacité biologique du Brésil.....	32
Figure 10: Effet d'îlot de chaleur urbain.....	33
Figure 11: Stations météorologiques proches du Bosco verticale.	34
Figure 12: Mesure des températures à différentes stations météorologiques le 10 août 2018.....	34
Figure 13: Amélioration de la qualité de l'air.....	35
Figure 14: Absorption du dioxyde de carbone.....	36
Figure 15: Comparaison des surfaces au sol dédiées aux espaces verts entre le Bosco Verticale et une forêt traditionnelle.....	37
Figure 16: Biodiversité.....	38
Figure 17: Isolant acoustique.	39
Figure 18: Isolant thermique.	39
Figure 19: S'abriter du vent.....	40
Figure 20: Rétention d'eau.....	40
Figure 21: Humidité.....	41
Figure 22: Bien-être.....	41
Figure 23: Illustration comparative entre la surface de végétation présente entre le Bosco Verticale et une forêt en Europe pour le même budget.	46
Figure 24: Centre de réhabilitation conçu par Stefano Boeri.....	48
Figure 25: Centre de réhabilitation conçu par Stefano Boeri.....	49
Figure 26: Projet imaginé par MVRDV.	50
Figure 27: Projet imaginé par Neutelings Riedijk Architects.....	51

Figure 28: Mur végétal réalisé par Patrick Blanc en Malaisie.....	56
Figure 29: Illustration du principe de la privatisation verticale de la végétation.....	58
Figure 30: Photographie du collectif citoyen Isola Pepe Verde à Milan.....	60
Figure 31 : Photographie du Bosco Verticale lors de la mise en place des arbres sur les balcons.....	63
Figure 32: Illustration des dimensions d'un balcon type du Bosco Verticale.....	65
Figure 33: Nombre de végétaux présents par balcon.	66
Figure 34: Illustration d'un balcon type du Bosco Verticale.....	66
Figure 35: Illustration de l'équivalence du nombre de tours du monde en terme d'émission de CO ₂ pour la mise en œuvre des balcons.	68
Figure 36: Illustration comparative de la surface de végétation présente entre le Bosco Verticale et les places de parking au bord des routes à Milan.	72
Figure 37: Photographie du pavillon d'Hanovre à l'exposition universelle en 2000, conçu par MVRDV.....	75
Figure 38: Axonométrie du pavillon d'Hanovre.	78
Figure 39: Photographie du pavillon d'Hanovre à l'abandon.	80
Figure 40: Photographie du pavillon Suisse, conçu par Peter Zumthor.....	81

INTRODUCTION

Nous vivons dans une nouvelle époque où l'activité humaine est devenue prédominante sur le système terrestre. Alors qu'il est prouvé scientifiquement que l'homme impacte considérablement la nature, nous ne sommes toujours pas en mesure d'y remédier. En effet, nous sommes actuellement dans une période de remise en question de l'ensemble de notre modèle sociétal. Pas un seul jour ne passe sans que notre manière de consommer ne soit dénoncée. Notre génération n'a jamais été confrontée à tant de problématiques ; pollution, réchauffement climatique, déforestation, ... Un récent rapport réalisé par le GIEC (2018) nous informe que « pour limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C, il faudrait modifier rapidement, radicalement et de manière inédite tous les aspects de la société »¹. Sachant que l'architecture reflète la société, elle n'échappe pas à la règle et fait donc partie intégrante de la remise en question sur la façon de vivre de l'être humain.

L'architecture pourrait-elle faire face à toutes ces problématiques actuelles présentes dans les villes? Comment l'architecte peut-il contribuer à un modèle de vie plus raisonné ? Quelles en seraient les solutions ? Etc.

Ces quelques questions interpellent les spécialistes d'horizons différents. Ils consacrent leurs recherches à ces questionnements afin de proposer des réponses et donc des propositions de modèles de villes idéales. Je suis évidemment très motivé par ces études car elles permettent de s'imaginer, d'esquisser la ville de demain.

¹ GIEC. (2018, octobre 8). *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C* [Communiqué de presse]. Consulté à l'adresse https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_fr.pdf

2 MÉTHODOLOGIE

Cette recherche m'a permis de retranscrire de manière évolutive ma façon de penser au sujet des forêts verticales en milieu urbain. Il est probable que de nombreuses personnes, moi le premier, se contentent de lire des articles de presse afin de se faire une opinion sur un sujet bien précis. Cependant, des recherches poussées permettraient de faire évoluer le mécanisme de penser et de voir tous les aspects qui gravitent autour d'un sujet. L'objectif même de cet écrit est donc de mettre en avant cette pensée, de premier abord naïve, qui va évoluer au long de cette recherche pour aboutir à une opinion finale personnelle.

La première partie de mon travail sera consacrée à l'analyse d'une proposition architecturale réalisée par Stefano Boeri il y a quelques années : le Bosco Verticale. L'objectif est d'analyser ce bâtiment et de le confronter aux enjeux actuels afin de percevoir quelle réponse il peut offrir face aux différents enjeux actuels en milieu urbain. Ensuite, un relevé de l'ensemble des effets positifs provoqués par la végétation présente dans le bâtiment sera énuméré.

La seconde partie du travail, en continuité avec la première partie, sera de mettre en lumière certaines conséquences directes ou indirectes que provoque la mise en place de ce nouveau prototype architectural. Le but est de remettre en question la place de la végétation sur cette tour et d'en questionner le bon sens d'un point de vue de l'arbre, de la société et de l'écologie. L'objectif final est de mettre en évidence une réponse plus avancée sur l'utilité des forêts verticales en écho aux problèmes auxquels nous faisons face en milieu urbain.

La dernière partie de mon travail sera consacrée à une mise en parallèle avec un bâtiment qui peut être désigné comme un des nombreux prédécesseurs des forêts verticales : le pavillon d'Hanovre, conçu par le cabinet d'architecture MVRDV. Cette analyse en parallélisme avec le Bosco Verticale permettra de comprendre de quelle manière le pavillon propose des réponses aux problèmes auxquels les Pays-Bas font face.

PARTIE 1 : DÉCOUVERTE

3 PREMIÈRE APPROCHE

Lors de mes premières recherches sur le Bosco Verticale à Milan, j'ai pu lire de nombreux articles à travers la presse mondiale, tous très élogieux à son sujet. Leurs discours étaient unanimes, « Le bâtiment le plus intelligent du monde »², « plus bel immeuble du monde »³, « une forêt verticale pour réintroduire la nature en ville »⁴, « filtre naturel [...] de dioxyde de carbone (CO₂) et des particules présentes dans l'atmosphère »⁵... Il a même été certifié « Gold LEED » par le Leadership in Energy and Environmental Design (LEED). « Les projets qui visent la certification LEED obtiennent des points pour diverses stratégies de constructions écologiques dans plusieurs catégories. En fonction du nombre de points obtenus, un projet obtient l'un des quatre niveaux d'évaluation LEED : certifié, argent, or ou platine. »⁶. Le Bosco Verticale a reçu le second meilleur prix en matière écologique.

Après la lecture de différents articles de presse concernant le bâtiment, je pense qu'on pourrait le qualifier comme la première forêt verticale citadine qui dépollue et purifie l'air et qui réintroduit la nature au contact de l'habitant. Milan possède donc son propre poumon vert intra-muros via la création de logements. C'est dans ce cadre que je vais débiter la présentation et l'analyse des bienfaits et des possibles réponses que ce bâtiment offre face aux enjeux grandissants dans toutes les villes du monde d'un point de vue sociétal, architectural et environnemental. Ces enjeux vont directement découler des problèmes présentés par la suite auxquels nous devons actuellement faire face.

² Cruickshank, A. (2018, octobre 4). PlaceTech | Les bâtiments les plus intelligents au monde: Bosco Verticale. Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse <https://placetech.net/fr/analysis/worlds-smartest-buildings-bosco-verticale/>

³ L. (2017, octobre 23). Les «forêts verticales» de Milan : un énorme succès international. Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse https://immobilier.lefigaro.fr/article/les-forets-verticales-de-milan-un-enorme-succes-international_504e0b6a-b27d-11e7-9cde-2ebd52d813ae/

⁴ Gathon, M. (2014, octobre 23). Milan : une forêt verticale pour réintroduire la nature en ville. Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse https://www.levif.be/actualite/environnement/milan-une-foret-verticale-pour-reintroduire-la-nature-en-ville/article-normal-322081.html?cookie_check=1587113053

⁵ Bosco Verticale : une forêt verticale à Milan. (s. d.). Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse <https://www.gralon.net/articles/commerce-et-societe/industrie/article-bosco-verticale---une-foret-verticale-a-milan-7540.htm>

⁶ LEED. (s. d.). LEED rating system | U.S. Green Building Council. Consulté le 18 avril 2020, à l'adresse <https://www.usgbc.org/leed>

4 HISTORIQUE

Avant de se consacrer à la présentation du bâtiment, ses caractéristiques et ses bienfaits sur l'environnement et la qualité de vie, il me semble opportun de retracer l'histoire de la place de la végétation au sein de l'habitat de l'homme. Ce point va relater plus précisément l'histoire des façades végétales. Nous allons voir que la végétalisation de notre habitat n'est pas née d'hier. Elle est apparue il y a plusieurs milliers d'années et n'a cessé d'évoluer jusqu'à aujourd'hui.

4.1 Façade végétale, une longue histoire

C'est au nord de l'Ecosse sur le site archéologique de Skara Brae sur les îles des Orcades datant du 20^{ème} siècle avant J.-C, que l'on peut découvrir les premières traces d'architectures végétalisées. Une épaisse couche de terre enherbée permettait la réalisation de façades et de toitures vertes étanches à l'air, à l'eau, ainsi que résistante au feu. Sa charpente était constituée de bois ayant un faible indice de détérioration dans le temps, telles des écorces de bois de bouleaux.

Ensuite, en 500 avant J.-C apparaît pour la première fois la notion de jardin suspendu avec les jardins les plus célèbres de l'antiquité, les jardins de Babylone aménagés par Nabuchodonosor. Ces jardins, irrigués par l'eau acheminée des montagnes, étaient constitués de plantes non indigènes suspendues telles que des vignes, des fruitiers (poiriers, pommiers, amandiers,...) ainsi que des fleurs et des arbustes. L'objectif était purement esthétique afin de recréer le paradis d'enfance de l'épouse de Nabuchodonosor II qui regrettait la verdure de son pays natal. L'objectif était donc de recréer des jardins en dehors de la terre. La végétation du sol naturel se retrouvait sur des terrasses portées par d'énormes voûtes.

Une culture botanique et esthétique s'est imposée peu à peu. La végétation reste présente au fil des époques mais de manières différentes. Les murs inclinés du Ziggurat de Nanna étaient recouverts entièrement de buissons et d'arbustes formant un grand ensemble unique de végétation (22^{ème} siècle avant J.-C). Les marchands de Pompéi faisaient pousser des vignes sur leurs balcons. Les Vikings recouvraient les toits et les murs d'une tourbe⁷ alors que des jardins verticaux étaient réalisés dans le Mexique précolombien, en Russie et en France dans le milieu du deuxième millénaire.

C'est à Vienne que la philosophie de la végétalisation du bâtiment va s'affirmer grâce au manifeste écrit par Hundertwasser en 1972 ; intitulé « Ton droit de fenêtre – Ton devoir d'arbre ». Il part du principe que « l'horizontale appartient à la nature (devoir de l'arbre), la verticale appartient à l'homme (droit de fenêtre) » (Restany, 1978, p. 22). Le droit de fenêtre est la liberté entière de l'homme d'aménager son environnement vertical en harmonie avec le devoir d'arbre qui consiste à respecter l'environnement horizontal. D'après cet artiste, l'homme possède trois enveloppes : l'épiderme, les vêtements et sa maison. Il est donc dans son devoir d'aménager la façade de sa maison de la même manière qu'il choisit ses vêtements. Hundertwasser préconise l'hygiène et la santé par la contribution de l'habitant dans le processus d'intégration de la nature. « En réintégrant l'homme dans le cycle naturel, on changera la vie sur Terre ; le paradis est à portée de main [...] » (Restany, 1978, p.5)

Alors que les façades ont pour but principal l'ornementation, un nouveau mouvement d'écologie urbaine va apparaître à Berlin dans les années 1980. En effet, entre 1983 et 1997, Berlin va instaurer des mesures favorisant la végétalisation des façades. Ce programme, nécessitant l'engagement de tous les échelons du gouvernement, a généré en 2008 plus de 245 584 m² de façades vertes. La prise de conscience de l'intérêt du végétal au sein de notre habitat se fait de plus en plus ressentir.

⁷ Tourbe : « Accumulation de matière organique incomplètement décomposée, provenant de débris végétaux et racines des plantes hygrophiles. » (Le dictionnaire Larousse en ligne 2020. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/tourbe/78677>, consulté le 18 avril 2020.)

Les façades végétales, jusqu'ici encore peu développées et fort hétérogènes, vont prendre une nouvelle dimension à la suite de l'intervention du biologiste et botaniste français Patrick Blanc. Il développe une nouvelle technique permettant aux végétaux de survivre dans un milieu non tropical en créant des murs vivants. Cet inventeur des murs végétaux permet une combinaison entre l'art et l'architecture. Il répond au manque de surfaces au sol dans la ville par des plantations verticales de végétaux. Patrick Blanc arrive à transformer des façades insignifiantes en des murs qui attirent l'attention par leurs variations de couleurs et leur densité de plantes.

Toujours sous l'impulsion de cette nouvelle ère d'écologie urbaine, de nombreux architectes vont suivre ce nouveau mouvement de mode et réaliser de nombreux projets en intégrant la végétation jusqu'à en faire un élément fondateur.

C'est le cas de l'architecte Stefano Boeri qui va proposer un nouveau type de végétalisation du bâtiment en y intégrant des arbres, sur toute sa hauteur, à accès direct aux habitants de l'immeuble. Appelé « forêt verticale », le Bosco Verticale est le premier bâtiment de cette nouvelle génération souvent décrit comme exemple d'écodesign urbain.

5 PRÉSENTATION DU BOSCO VERTICALE

Le Bosco Verticale arbore l'une des façades les plus végétalisées jamais réalisée auparavant (figure 1). Sa combinaison de plantes soigneusement sélectionnées permet la création d'un ensemble unique où les tonalités de verdure varient en fonction de la saison. Le projet a été inauguré en octobre 2014 à Milan dans la zone de Porta Nuova Isola. Cette réalisation de l'architecte Stefano Boeri est présentée comme la première forêt verticale du monde ayant pour objectif de proposer un nouveau format de biodiversité architecturale. Composée de deux tours de logements de 78 et 111,15 mètres de haut respectivement, elle abrite l'équivalent de 711 arbres, 5000 arbustes et 20 000 plantes qui correspondent approximativement à 20 000 mètres carrés de bois et de sous-bois.



Figure 1: Photographie du Bosco Verticale.

Source : (<https://www.archdaily.com/photographer/laura-cionci>)

Les deux tours sont de hauteurs différentes mais possèdent la même caractéristique qui est un apport de végétation sur l'ensemble des étages. La tour E, de 111,15 mètres de haut est composée de 26 étages tandis que la tour D, de 78 mètres de haut est composée de 18 étages. La position des bâtiments est telle que les façades sont positionnées aux quatre points cardinaux (figure 2). La surface moyenne d'un étage de la tour D est de 500 mètres carrés contre 660 mètres carrés pour la tour E. La dimension des appartements varie entre les étages mais on retrouve principalement des logements de deux à quatre personnes.



Figure 2: Plan d'un étage type du Bosco verticale.

Source : (<https://www.stefano boeri architetti.net/en/project/vertical-forest/>)

Toute la végétation prend racine dans de grands pots situés à l'extérieur des terrasses qui sont elles-mêmes en porte à faux et accessibles depuis les appartements. Agissant sur l'ensemble du périmètre en relation avec les appartements, les plantes font l'effet d'un filtre entre l'environnement urbain extérieur et l'intérieur des tours. Cette enveloppe si particulière du projet vient de la création de son surnom de forêt verticale. Son dynamisme végétal est issu d'une combinaison de formes et de couleurs rigoureusement sélectionnées et réparties qui changent au fil des saisons de l'année. La couleur grisée du bâtiment permet une mise en valeur de ce filtre végétal qui assume plusieurs rôles au niveau architectural, sociétal et environnemental.

6 AVANTAGES DES MURS VÉGÉTAUX

Concevoir des projets architecturaux avec des apports de végétaux intégrés aux façades offre une multitude de bénéfices à de nombreux niveaux. Ces avantages, bien qu'ils restent assez semblables, varient en fonction de nombreux facteurs tels que la géométrie du bâtiment, les espèces végétales, la situation géographique,...

Certains immeubles ont même dépassé la notion de bienfait à l'échelle du bâtiment en ayant des effets positifs à l'échelle urbaine. Le mur végétal peut donc être bénéfique pour les occupants du bâtiment ainsi que les habitants à proximité. C'est en tout cas ce que préconise le guide technique du Council on Tall Buildings and Urban habitat (CTBUH). Il définit ces avantages en deux classes distinctes : « l'échelle urbaine » et « l'échelle du bâtiment ».

Avantages à l'échelle urbaine :

- Réduction de l'effet d'îlot de chaleur urbain / atténuation de la température de l'air ;
- Amélioration de la qualité de l'air ;
- Séquestration du carbone ;
- Côté esthétique ;
- Assurer la biodiversité et créer des habitats naturels pour les animaux.

Avantages à l'échelle du bâtiment :

- Bénéfique pour la santé ;
- Améliore l'énergie thermique du bâtiment ;
- Qualité de l'air intérieur, filtration et oxygénation de l'air ;
- Protection des enveloppes ;
- Réduction des enveloppes ;
- Réduction du bruit ;
- Bénéfices liés à l'agriculture ;
- BVOC (Composé organique volatile) ;
- Augmenter la valeur des biens ;
- Crédit de système de notation de la durabilité :
 - Développement durable du site ;
 - Efficacité de l'eau ;
 - Energie et atmosphère ;
 - Matériaux et ressources ;
 - Amélioration de la qualité de l'environnement et de la conception ;
 - Innovation dans le fonctionnement »⁸.

Cette distinction entre les deux échelles permet une différenciation claire entre les effets liés au bâtiment et ceux situés dans ses alentours. Tous ces critères ne vont pas être analysés. Seuls les sujets qui sont liés aux réponses des enjeux sociétaux, architecturaux et environnementaux que le Bosco Verticale défend vont être décortiqués et analysés.

⁸ Giacomello, E., Valagussa, M., & Council on Tall Buildings and Urban Habitat. (2015b). *Vertical Greenery*. Consulté à l'adresse https://store.ctbuh.org/index.php?controller=attachment&id_attachment=32

7 CONTEXTUALISATION DES PROBLÈMES

Ce chapitre définit le contexte problématique menant à la création de la première forêt verticale. Il se concentre sur les soucis majeurs présents actuellement dans les villes : la démographie, la pollution et la végétalisation. De ces principaux problèmes vont découler les avantages que le Bosco Verticale offre aux habitants et à ses alentours.

7.1 Démographie

Nous n'avons jamais été aussi nombreux sur Terre qu'aujourd'hui. Selon l'Unicef, il y a en moyenne 4,3 naissances toutes les secondes. L'explosion démographique que nous vivons actuellement se concentre principalement dans les pays du tiers monde où les moyens de contraception sont rares. Cela complique la lutte contre la pauvreté dans ces pays en voie de développement. Cette évolution démographique renforce les mouvements d'émigration vers les pays les plus riches alors que l'Europe, qui est en voie de vieillissement, commence à fermer ses frontières.

Ce graphique (figure 3) montre qu'en 1950, la population mondiale était de moins de trois milliards d'habitants et qu'aujourd'hui elle atteint presque huit milliards d'habitants. En 70 ans, la population a plus que doublé et va continuer à croître dans les prochaines années. Une prévision, toujours réalisée par les Nations Unies (figure 3), montre deux variantes pour la fin de notre siècle. Elles sont décrites comme le clignotant de l'an 2050.

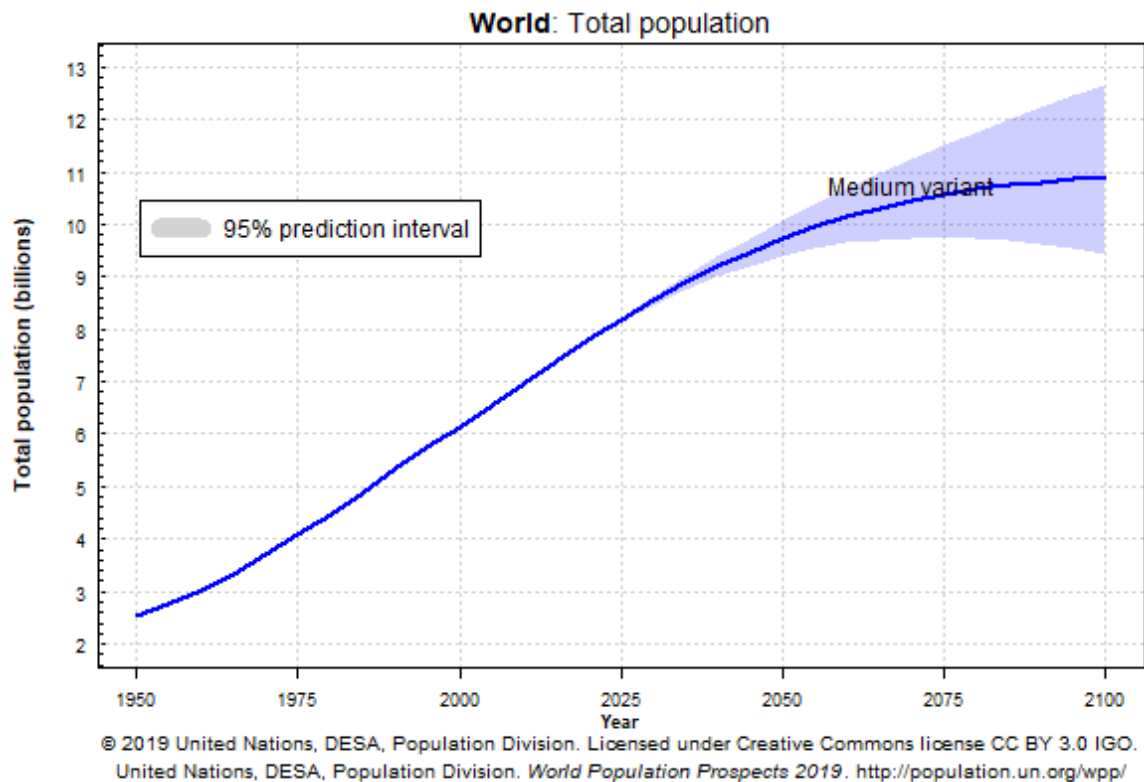


Figure 3: Prédiction de l'évolution de la population mondiale en 2100.

Source : (<https://population.un.org/wpp/Graphs/DemographicProfiles/Line/900>)

La première variante montre une continuité de l'évolution de la courbe fondée sur celle d'aujourd'hui. La population va continuer à croître jusqu'à atteindre les 12 milliards d'habitants sur Terre d'ici 2100. Cela signifie donc que les problèmes de surpopulation que nous subissons maintenant sont minimes par rapport à ceux à venir. La seconde variante est un décroissement de la population grâce à la diminution du taux de naissance par femme. Bien que nous ne pourrions éviter un pic d'habitants frôlant les dix milliards d'habitants, il faut espérer que sur une vision à très long terme, celle-ci va décroître afin d'essayer un jour de résoudre les problèmes démographiques que nous subissons et continuerons à subir.

7.2 En ville

Depuis quelques années, les villes n'ont jamais été aussi vastes et importantes. « Accueillant 33% de la population mondiale en 1950, elles en accueillent aujourd'hui 55%. Et selon les prévisions de l'Organisation des Nations Unies (ONU), 68% de la population vivront en ville d'ici 2050 »⁹. Il faut savoir qu'au XIX^{ème} siècle, on ne comptait que deux mégapoles¹⁰ de plus de 10 millions d'habitants. Il y en a aujourd'hui une vingtaine.

Toutes ces villes sont synonymes d'internationalisation. En tant que plateformes économiques, elles constituent des foyers privilégiés pour la mobilité, l'échange, les rencontres, la culture, etc. Cependant elles se retrouvent au premier plan en matière d'impact écologique.

⁹ ONU. (2018, mai 18). 2,5 milliards de personnes de plus habiteront dans les villes d'ici 2050. Consulté le 9 avril 2020, à l'adresse <https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>

¹⁰ Mégapole : « Agglomération urbaine généralement peuplée de plus de 10 millions d'habitants. » (Le dictionnaire Larousse en ligne 2020. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/m%C3%A9gapole/50220?q=m%C3%A9gapole#50115>, consulté le 18 avril 2020.)

7.2.1 Ilot de chaleur urbain

Le terme d'îlot de chaleur urbain (ICU) a fait son apparition au courant du XX^{ème} siècle. Celui-ci est utilisé pour décrire des phénomènes d'élévation de la température urbaine. Les villes vont créer un microclimat spécifique en leur centre. Deux facteurs vont être principalement à l'origine du mécanisme :

- « Le remplacement des zones végétalisées, et donc d'espaces perméables, par des bâtiments avec un revêtement imperméable (brique, pierre, béton,..) »¹¹. Ainsi, la minéralité de ces matériaux permet une absorption et un stockage en grande quantité ;
- L'activité humaine y est plus concentrée (transport, climatisation ou chauffage des bâtiments, utilisation des machines électriques, égouts,..).

La température de l'air sera donc plus élevée dans les villes que dans leurs zones rurales voisines comme vous pourrez le constater à la lecture du schéma ci-dessous (figure 4).

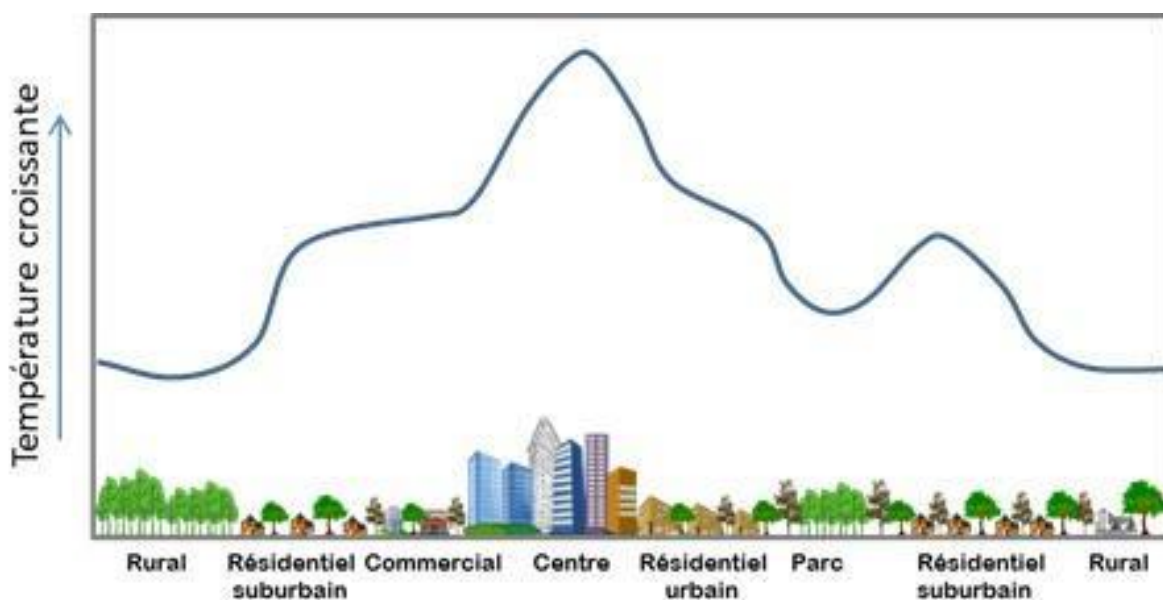


Figure 4: Illustration du profil thermique d'un îlot de chaleur en milieu urbain.

Source : (<https://environnement.brussels/etat-de-lenvironnement/rapport-2011-2014/climat/focus-ilots-de-chaleur>)

¹¹ Focus: Îlots de chaleur. (s. d.). Consulté le 9 avril 2020, à l'adresse <https://environnement.brussels/etat-de-lenvironnement/rapport-2011-2014/climat/focus-ilots-de-chaleur>

Des photos capturées par la NASA à l'aide de capteurs thermiques démontrent davantage ce mécanisme d'ICU. On peut apercevoir une corrélation entre ces deux villes. Les températures sont en hausse dans les lieux d'activités humaines intenses en ville et dans les aéroports en sa périphérie. Des variations de plusieurs degrés sur des courtes distances sont perceptibles. Le manque de réaction des villes vient renforcer ce problème d'ICU. Très peu d'efforts qui sont mis en place et donc aucune amélioration visible.

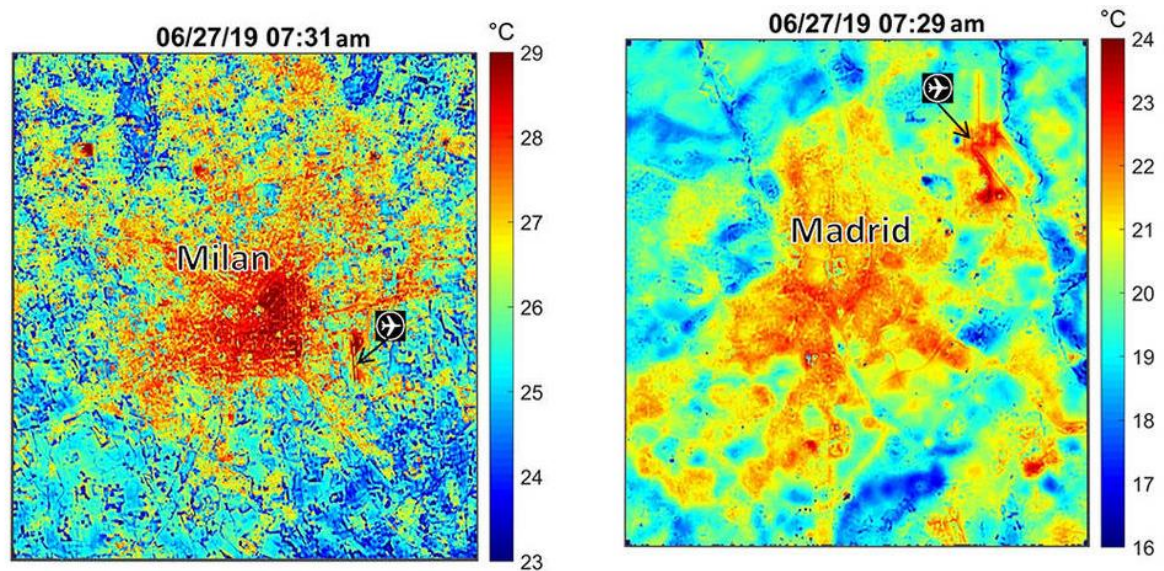


Figure 5: Cartes des températures de la ville de Milan et Madrid en juin 2019.

Source : (<https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasas-ecostress-maps-european-heat-wave-from-space>)

7.2.2 Pollution dans l'air

La pollution atmosphérique urbaine est étroitement liée à l'effet d'ICU car les deux mécanismes interagissent ensemble et s'amplifient mutuellement. Les conséquences de cette contamination atmosphérique sont connues et se sont déjà manifestées. C'était le cas en 1952 lorsque de nombreux décès ont suivi un épais brouillard qui recouvrait Londres. Par la suite, de nombreuses législations ont été élaborées afin de lutter contre ce fléau qui reste toujours menaçant.

Dans un document réalisé par l'Agence Wallonne de l'Air et du Climat (AWAC) un inventaire des principaux polluants relatifs à la qualité de l'air a été réalisé. On y retrouve de nombreux composants nocifs :

- « Effet de serre :

CO₂, CH₄, N₂O, HFC, PFC, NF₃, SF₆

- Précurseurs d'ozone troposphérique :

NO_x, COVNM

- Polluants acidifiants :

SO₂, NO_x, et NH₃

- Métaux lourds :

Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Cuivre (Cu), Mercure (Hg), Nickel (Ni), Plomb (Pb), Sélénium (Se), Zinc (Zn)

- Produits Organiques Persistants (POP) :

Dioxines et furanes (Diox), Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB) et Hexachlorobenzène (HCB)

- Poussières :

Particules en suspension (TSP), particules fines (PM₁₀ et PM_{2.5}) et Black carbone (BC). »¹²

¹² Agence Wallonne de l'Air et du Climat. (s. d.). inventaires d'émissions. Consulté le 9 avril 2020, à l'adresse <http://www.awac.be/index.php/inventaires-d-emissions>

Le schéma ci-dessous (figure 6) donne une vision simplifiée de la situation. On peut y voir les éléments impactés par tous ces polluants, à savoir l'homme et la Terre.

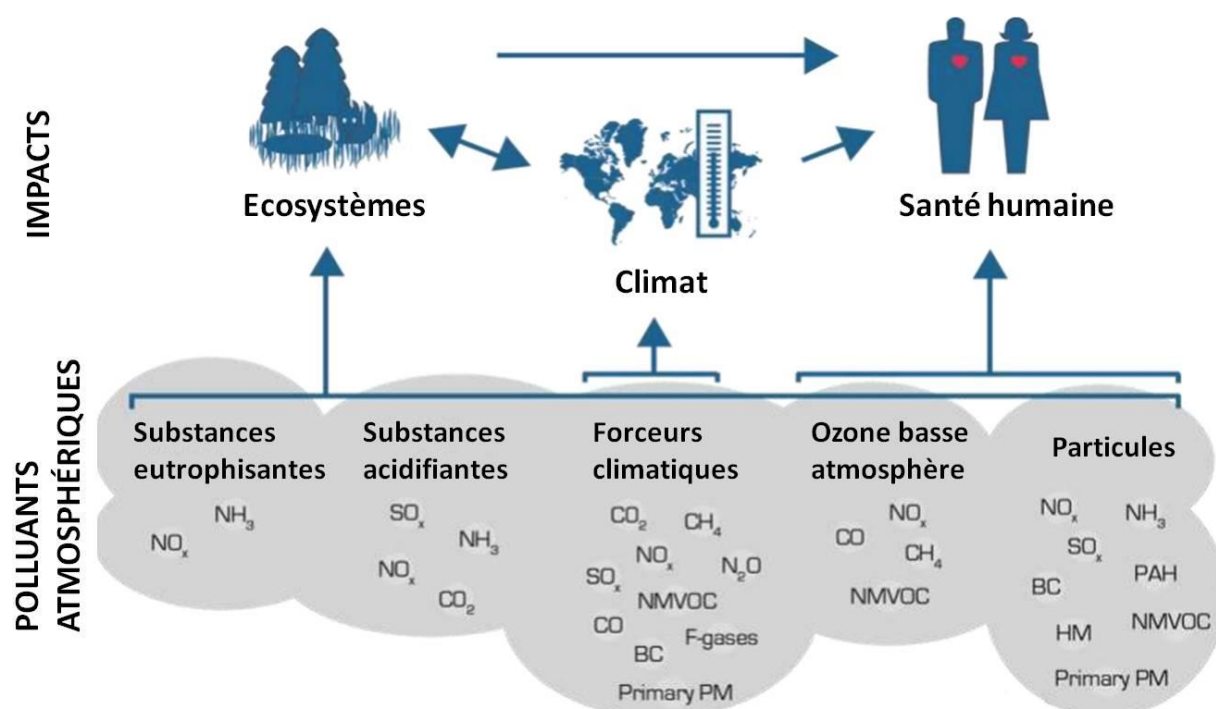


Figure 6: Inventaire des polluants atmosphériques.

Source : (<http://www.awac.be/index.php/inventaires-d-emissions>)

L'urbanisation intensive a causé une augmentation des émissions de la pollution dans l'atmosphère à cause de nombreux facteurs tels que la production d'énergie, le transport, l'activité industrielle,... Tous ces polluants ont des effets néfastes pour l'environnement mais également pour l'homme. D'après l'Organisation Mondiale de la Santé, « plus de sept millions de décès par an sont liés à l'exposition à la pollution extérieure »¹³. Les maladies qui en découlent sont nombreuses : cancers du poumon, maladies cardiorespiratoires, infections respiratoires, etc.

¹³ World Health Organization: WHO. (2018, mai 2). Neuf personnes sur 10 respirent un air pollué dans le monde.
Consulté le 9 avril 2020, à l'adresse <https://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

7.2.3 Capacité biologique

La capacité biologique (CB) est définie par le Global Footprint Network (GFN) comme : « La capacité des écosystèmes de produire des matières biologiques utiles et d'absorber les déchets générés par les hommes en utilisant les modes de gestion et les technologies d'extraction existantes »¹⁴.

L'empreinte écologique est calculée en considérant l'ensemble des déchets consommés et des matériaux biologiques générés par une personne au cours d'une année. Ces matériaux et déchets demandent des espaces écologiquement productifs (une terre cultivée pour la culture de pommes de terre, des forêts pour la séquestration du CO₂) pour leur conversion. Cet espace écologique nécessaire à cette conversion sera quantifié en hectares.

GFN propose une carte à vision planétaire. On peut y observer l'ensemble des CB de chaque pays. On s'aperçoit rapidement que les pays situés entre le tropique du cancer et le cercle polaire arctique sont majoritairement en déficit. Ces pays plus riches et développés n'ont pas assez de réserves végétales pour compenser leurs émissions de CO₂. Contrairement à eux, les pays en voie de développement possèdent généralement un CB positif. Ces pays bénéficient d'énormément de ressources végétales bien qu'elles fassent le fruit de déforestations majeures.

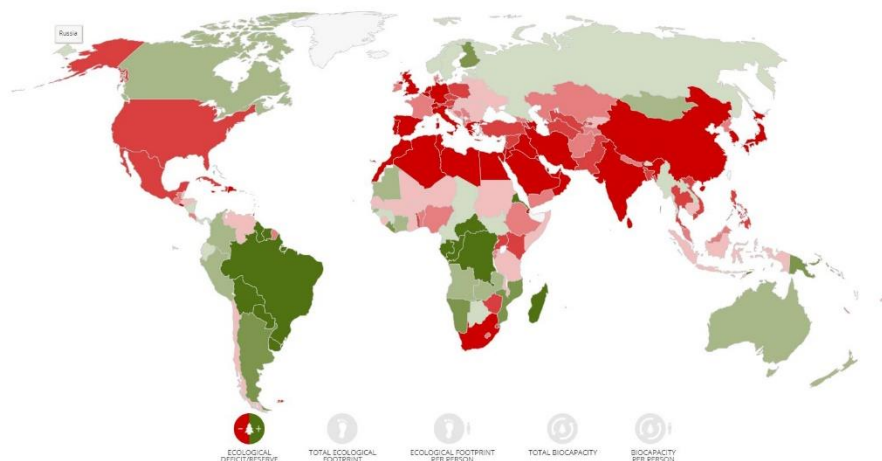


Figure 7: La capacité biologique mondiale.

Source : (<http://data.footprintnetwork.org/#/>)

¹⁴ Global Footprint Network. (s. d.). Ecological Footprint Accounting and Methodology. Consulté le 10 avril 2020, à l'adresse https://www.footprintnetwork.org/content/images/uploads/Part_III_Technical_Document.pdf

Prenons le cas de deux exemples concrets ci-dessous (figure 8 et 9). Le Brésil possède suffisamment d'espaces verts pour compenser son empreinte écologique. Cependant, sa CB est décroissante car elle fait l'effet de grandes campagnes de déforestation (figure 8). Quant à l'Italie, elle ne possède pas assez d'espaces verts pour compenser son empreinte écologique. Bien que ses espaces verts restent assez stables, son émission de CO₂ a considérablement augmenté jusqu'en 2005 où apparaît une faible diminution (figure 9).



Figure 9: La capacité biologique du Brésil.

Source : (<http://data.footprintnetwork.org/#/>)

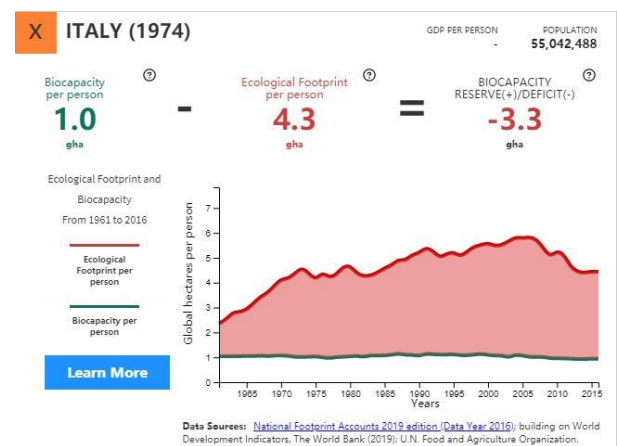


Figure 8: La capacité biologique de l'Italie.

Source : (<http://data.footprintnetwork.org/#/>)

7.3 Conclusion

En conclusion, il y a un énorme défi à relever pour obtenir un environnement sain et durable dans les villes. Les zones urbaines sont les premières touchées par ces changements climatiques. Au regard des problèmes thermiques, de la pollution de l'air et du manque de végétation, la ville se doit d'agir intelligemment afin de résoudre ces soucis qui ne vont qu'empirer dans le futur.

8 AVANTAGES DE LA VÉGÉTATION

Suite à l'énonciation des problèmes majeurs où les enjeux se font principalement dans les villes, voici les avantages que le Bosco Verticale offre aux habitants et ses alentours au niveau environnemental, architectural et sociétal.

8.1 Avantages environnementaux

8.1.1 Réduction du phénomène d'îlot de chaleur urbain

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) peut être atténué en introduisant de la végétation au cœur des villes. Les parcs urbains, les toits verts et les façades vertes contribuent tous à la diminution de l'ICU. La végétation permet de créer un climat plus doux grâce à l'ombrage et à l'évapotranspiration. Ceux-ci augmentent l'humidité et protègent également les bâtiments du soleil et du vent.

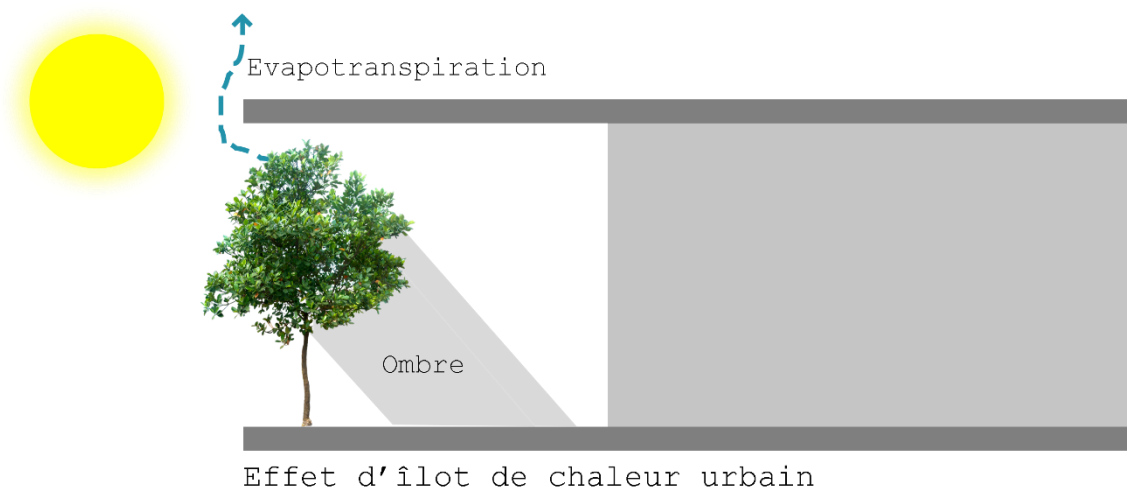


Figure 10: Effet d'îlot de chaleur urbain.

Illustration personnelle.

Une étude réalisée par Caithlin Ann Marugg en 2018 (figure 11 et 12) a démontré les effets positifs d'ICU qu'a le Bosco Verticale. Un relevé des températures a été pris sur trois sites différents à des moments précis de la journée. La station météorologique de Via Marche se trouve au nord du Bosco Verticale et la station météorologique Via Brera au sud.

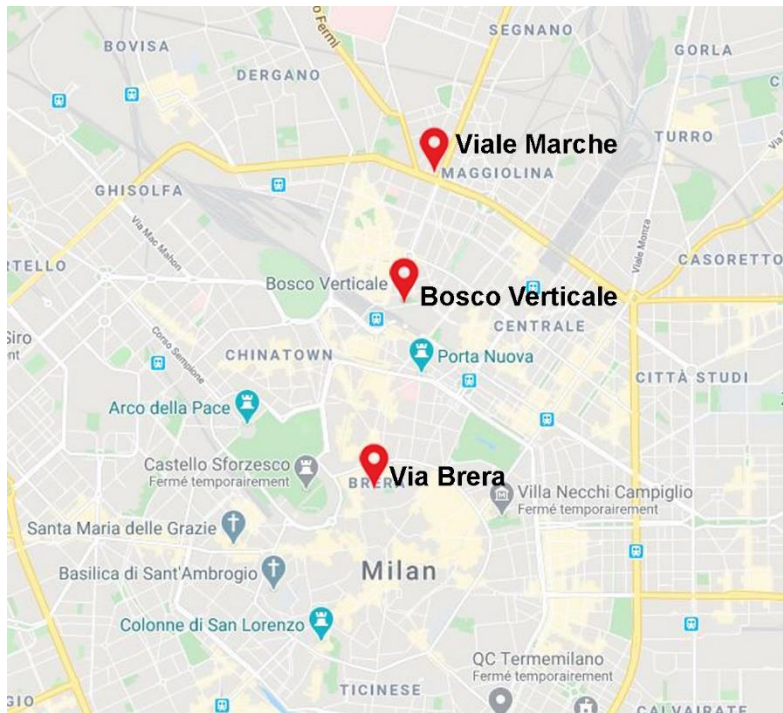


Figure 11: Stations météorologiques proches du Bosco verticale.

Source : (Google map)

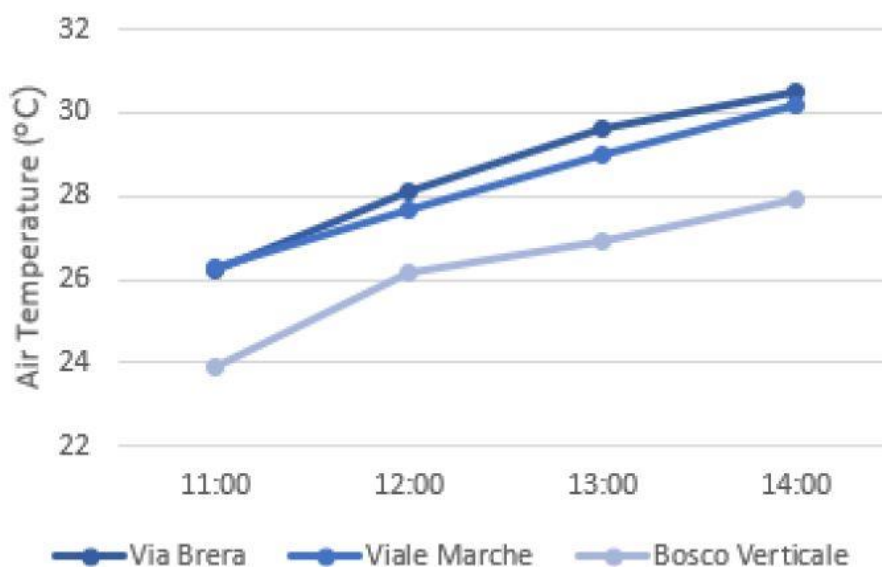


Figure 12: Mesure des températures à différentes stations météorologiques le 10 août 2018.

Source : ([file:///C:/Users/louis/Downloads/Vertical Forests%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/louis/Downloads/Vertical%20Forests%20(1).pdf))

On peut apercevoir dans le graphique précédent (figure 12) une différence très visible entre le Bosco Verticale et les deux autres stations. Via Brera et Viale Marche possèdent des températures assez similaires tandis que le Bosco Verticale possède une moyenne inférieure de deux degrés. Cela permet de confirmer son effet positif au phénomène d'ICU dans les villes, même s'il ne se concentre que sur un petit périmètre.

8.1.2 Amélioration de la qualité de l'air

La pollution est l'une des plus grandes causes de mortalité dans le monde et fait donc effet d'ennemi numéro un. L'un des meilleurs moyens de lutter contre ce fléau est l'apport de végétation. Durant leur croissance, les plantes vont produire de l'oxygène par le biais de la photosynthèse et capter du CO₂ ainsi qu'un grand nombre de particules polluantes présentes dans l'atmosphère. De nombreuses études prouvent que les plantes sont capables d'absorber près de la moitié des particules, les plus nocives pour nos poumons, qui sont présentes en ville.

Une autre étude a mis en évidence que les arbres sont plus efficaces que les toits et les murs végétalisés en matière d'absorption de polluants atmosphériques. Dans le cas du Bosco Verticale, qui se compose de plus de 700 arbres, cela accentue la qualité de l'air aux environs du bâtiment mais surtout pour ses habitants.



Figure 13: Amélioration de la qualité de l'air.

Illustration personnelle.

8.1.3 Absorption du dioxyde de carbone

En plus d'avoir des capacités bénéfiques pour capter des particules fines dans l'atmosphère, le mécanisme de photosynthèse des plantes leur permet de produire de l'oxygène. En effet, lors de la photosynthèse, les feuilles vertes vont capturer le dioxyde de carbone (CO_2) présent dans l'atmosphère et relâcher en contrepartie du dioxygène (O_2). L'air à proximité des arbres est donc plus pur.

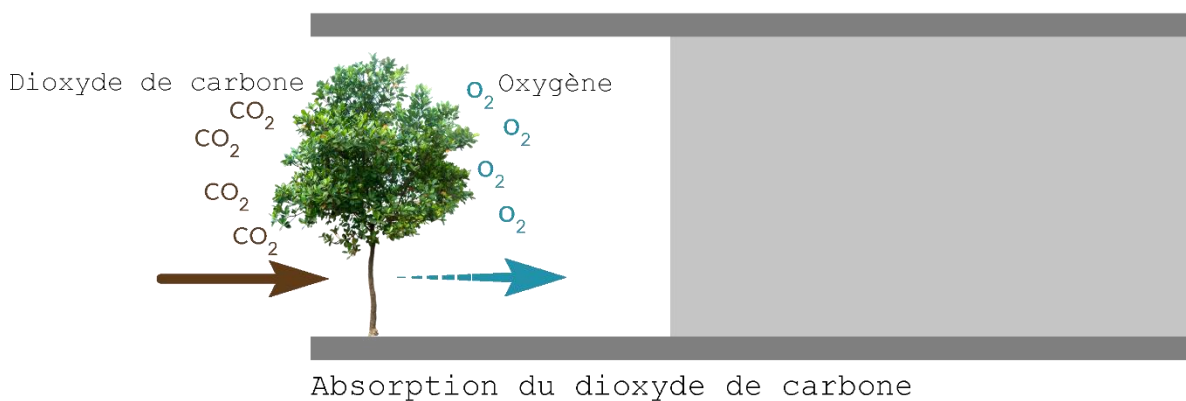


Figure 14: Absorption du dioxyde de carbone.

Illustration personnelle.

Les deux immeubles de respectivement 80 et 112 mètres, accueillent environ 20 000 arbres, arbustes et plantes. Comme il est dit dans l'annexe 1, ils peuvent à eux deux absorber l'équivalent de 19 tonnes de CO_2 par an (Boeri, 2015). Au-delà de l'aspect esthétique recherché du bâtiment, l'autre priorité est son aspect écologique avec l'objectif d'absorber un maximum de CO_2 .

8.1.4 Forêt verticale

La création d'une forêt verticale est également une manière idéale pour faire face au manque de place en ville. Les surfaces dédiées aux espaces verts se faisant de plus en plus rares. L'intégration d'une forêt verticale permet le retour de grandes surfaces vertes sur un espace réduit. En terme de comparaison, la surface de végétation présente sur le Bosco Verticale est équivalente à deux hectares de forêts. Cependant, ceux-ci sont ici répartis sur une surface au sol de 1 500 m², c'est-à-dire 0,15 hectare. Le gain de place non négligeable permet de rentabiliser la surface construite à plus de 1300% par rapport à un espace vert traditionnel.



Figure 15: Comparaison des surfaces au sol dédiées aux espaces verts entre le Bosco Verticale et une forêt traditionnelle.

Source : (Boeri, 2015)

8.1.5 Biodiversité

Le terme forêt verticale a pris tout son sens lorsque, quelques temps après la construction, les arbres ont commencé à être habités par des oiseaux et des insectes. Les différentes essences végétales ont créé des habitats bien spécifiques favorisant leur colonisation. Ce retour spontané de la vie animale en milieu urbain démontre la possibilité de la cohabitation des espèces animales et de l'homme. De plus, la biodiversité de cette surface verticale offre des conditions favorables à certaines plantes telles que des algues et des lichens¹⁵ qui viennent se développer dans les arbres. Tout un écosystème se met en place autour des activités humaines.



Figure 16: Biodiversité.

Illustration personnelle.

¹⁵ Lichen : « Végétal symbiotique formé par l'association d'une algue microscopique et d'un champignon filamenteux. » (Le dictionnaire Larousse en ligne 2020.
<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/lichen/47040>, consulté le 23 avril 2020.)

8.2 Avantages architecturaux

8.2.1 Isolation acoustique

Les plantes possèdent des qualités d'atténuation sonore qui sont utilisées ici pour faire office de barrière entre la vie urbaine et l'intérieur du bâtiment. La présence en masse de végétation permet une diminution de la perception du bruit venant de l'extérieur. Elle recrée des espaces relaxants et isolés en plein centre-ville.



Figure 17: Isolant acoustique.

Illustration personnelle.

8.2.2 Isolation thermique

Par l'ombrage que crée l'ensemble de la végétation, les plantes jouent un rôle important en terme d'isolation thermique. Elles permettent d'obtenir des températures plus basses que la température extérieure dans les logements.

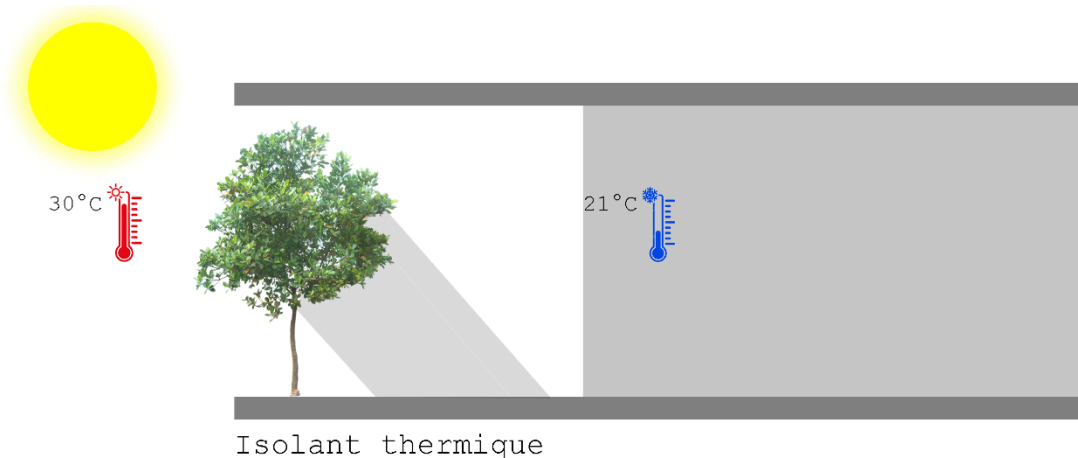


Figure 18: Isolant thermique.

Illustration personnelle.

8.2.3 Effet paravent

Par leur caractéristique de résistance élevée au vent, les arbres permettent de protéger les balcons des rafales de vent. Ces balcons, situés en hauteur, en subissent régulièrement les bourrasques.

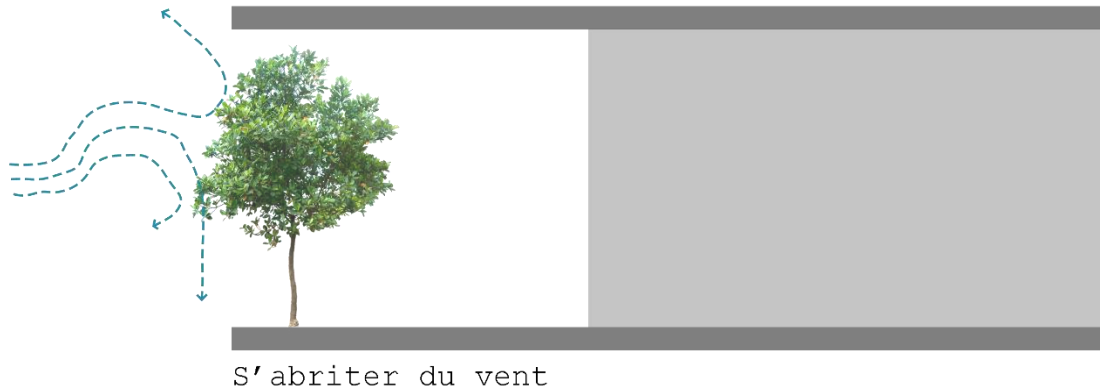


Figure 19: S'abriter du vent.

Illustration personnelle.

8.2.4 Rétention d'eau

La présence abondante de végétation permet d'absorber de grandes quantités d'eau lors de pluies abondantes. À l'heure où les villes sont de plus en plus cimentées avec des gratte-ciel, les forêts verticales atténuent les problèmes d'inondation dans les centres-villes par une régulation des débits d'eau.

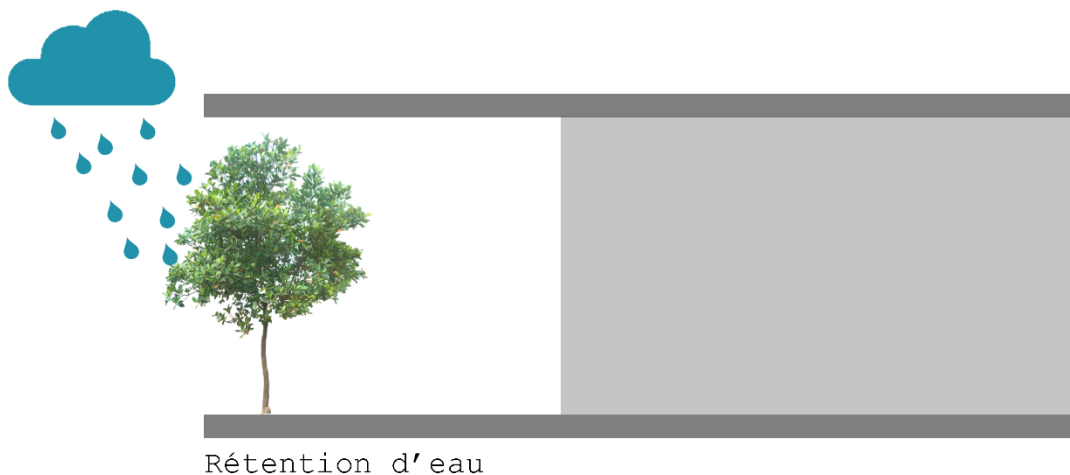


Figure 20: Rétention d'eau.

Illustration personnelle.

8.2.5 Humidité

Par le phénomène d'évapotranspiration, les arbres amènent de l'humidité dans l'air à proximité des balcons. De ce fait, l'air est moins sec et plus respirable pour l'ensemble des habitants.



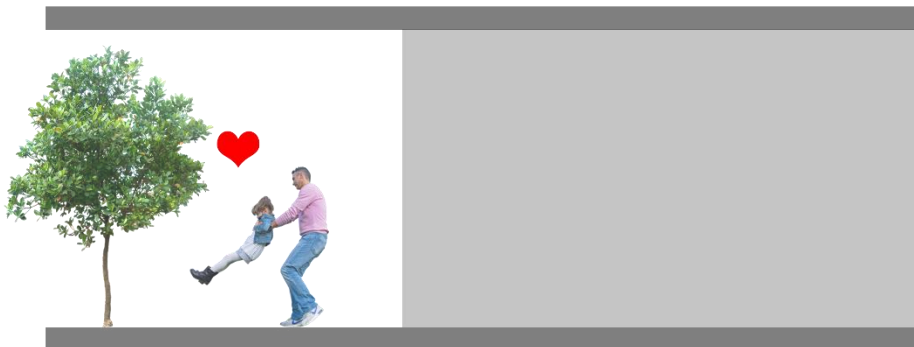
Humidité
Figure 21: Humidité.

Illustration personnelle.

8.3 Avantages sociaux

8.3.1 Bien-être

Les plantes sont connues pour avoir des effets positifs sur la santé physiologique et psychologique de l'homme. De nombreuses études sont unanimes à ce sujet. Un contact visuel permanent avec de la végétation dans le bâtiment aurait des influences positives sur les émotions et diminuerait le stress.



Bien-être
Figure 22: Bien-être.

Illustration personnelle.

8.4 Conclusion

Après avoir énoncé brièvement les effets positifs que le Bosco Verticale offre, je peux dorénavant réaliser un premier constat. La végétation, fruit de la terre qui existe depuis des millénaires, offre une multitude d'avantages qui ont servi depuis toujours à pérenniser la vie sur Terre. En plus d'apporter de nombreux bienfaits en terme de qualité de vie, les plantes peuvent avoir un rôle à jouer face aux urgences climatiques. Positionnées sur des tours, elles absorbent le CO₂, purifient l'air et rafraichissent la ville tout en prenant moins de surface qu'un parc ou une forêt. Faisant face au problème d'étalement urbain, cette alternative de verticalité permet de concilier habitat et espace vert.

PARTIE 2 : APPROFONDISSEMENT

9 SECONDE APPROCHE

La seconde partie de mon travail va apporter un tout autre regard sur le Bosco Verticale. Elle propose une réflexion beaucoup plus approfondie et réfléchie de ce nouveau mécanisme de forêt verticale. En fait, peu d'architectes ont analysé si hybrider un bâtiment avec de la verdure est une chose sensée d'un point de vue architectural et écologique. L'objectif de cette recherche est donc de savoir si ce mariage peut contribuer à la problématique actuelle.

Lors de recherches plus approfondies, j'ai découvert quelques articles décrivant et remettant ce principe de forêt verticale en question : « Disneyland pour faire rêver les gens »¹⁶, « Les arbres sont nés de la terre et ils y sont bien »¹⁷, « Peut-être n'aurions-nous pas besoin de penser aux forêts et aux fermes verticales si nous utilisions correctement l'espace horizontal sur les toits et dans la rue »¹⁸.

Ces articles m'ont permis de soutenir ma démarche visant à pousser la remise en question de ce nouveau phénomène architectural. L'objectif est d'une part de remettre en question certains discours défendus par l'architecte Stefano Boeri et d'autre part, de réfléchir sur la pertinence de la végétation sur un bâtiment. Surfant sur la vague écologique, il suffit aujourd'hui de mettre des arbres sur un bâtiment pour le rendre tendance et durable. Tout le monde dessine des arbres, mais est-ce une bonne idée ? Pourquoi ce nouveau phénomène n'arrive-t-il qu'aujourd'hui alors que les arbres existent depuis des siècles ? Est-ce du greenwashing¹⁹ ?

¹⁶ Cipriani, A. (2014, février 24). *Politica, media, città: vivere in un format*. Consulté le 24 avril 2020, à l'adresse <https://www.globalist.it/culture/2016/05/08/politica-media-citta-vivere-in-un-format-55144.html>

¹⁷ Botta: « Viva la città moderna ma Milano non è Abu Dhabi » | Milano la Repubblica.it. (2007, novembre 23). *La repubblica*. Consulté à l'adresse <https://milano.repubblica.it>

¹⁸ Alter, L. (2013, 25 juin). *Putting trees on skyscrapers : An interview with Lloyd Alter*. Archdaily. Consulté sur <https://www.archdaily.com/393347/putting-trees-on-skyscrapers-an-interview-with-lloyd-alter>

¹⁹ Greenwashing : Le terme Greenwashing est un terme anglophone qui peut être traduit par verdissement d'image. Le terme Greenwashing est utilisé par les groupes de pression environnementaux pour désigner les efforts de communication des entreprises sur leurs avancées en termes de développement durable, avancées qui ne s'accompagnent pas de véritables actions pour l'environnement. » (Le dictionnaire Environnement en ligne. https://www.dictionnaire-environnement.com/greenwashing_ID2629.html, consulté le 08 août 2020.)

Ces nombreuses questions vont m'amener au développement de cette deuxième partie dont l'objectif est de savoir si les forêts verticales répondent vraiment aux problèmes auxquels nous faisons face.

10 REMISE EN QUESTION

10.1 Coûts

Le coût de construction globale du Bosco Verticale s'élève approximativement à 65 millions d'euros. Il faut savoir que dans ces 65 millions d'euros, environ 5% du budget a été consacré aux arbres et aux plantes. Ce qui signifie que 3,25 millions d'euros ont été dépensés pour mettre deux hectares de forêts sur les façades du bâtiment. La question est de savoir s'il est judicieux d'investir tant d'argent pour surélever des arbres ? Les bienfaits que la végétation apporte à l'habitant sont-ils suffisants pour justifier un tel investissement ?

Supposons que ces 5% du budget soient consacrés à la reforestation... D'après des recherches (Weber, 2000, p. 36), le coût moyen du reboisement en Europe est de 1554 euros par hectare (annexe 2). Cela signifie qu'avec les 3,25 millions d'euros, nous pourrions reboiser 2987 terrains de foot (2 094 hectares). Alors que le Bosco Verticale a végétalisé moins de 3 terrains de foot, cela correspond à 1045,68 fois plus de forêts que celles présentes sur le Bosco Verticale (figure 23).

Bosco Verticale:

Forêt:

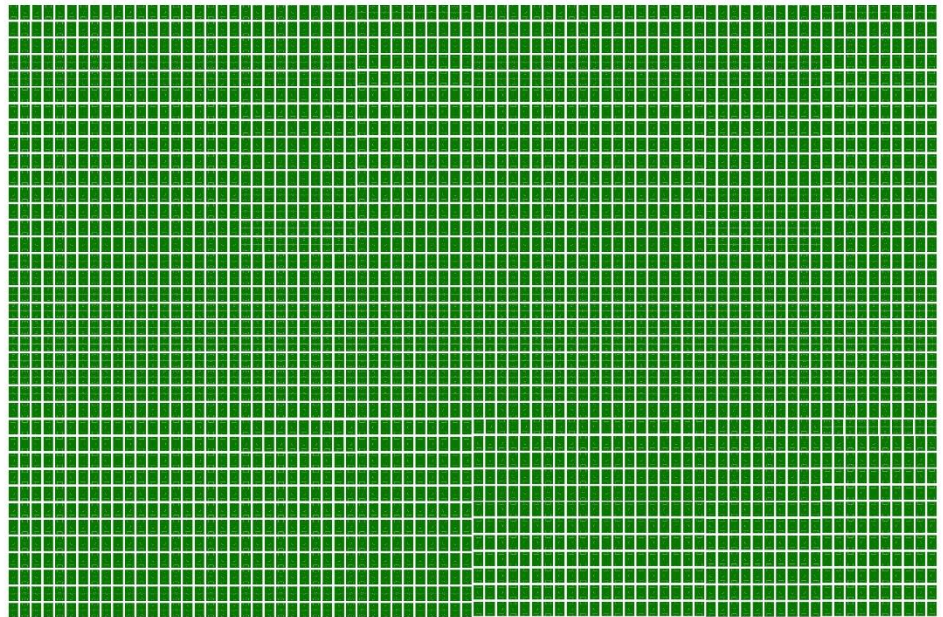


Figure 23: Illustration comparative entre la surface de végétation présente entre le Bosco Verticale et une forêt en Europe pour le même budget.

Illustration personnelle.

De surcroît, ce genre de bâtiment génère des frais de maintenance assez élevés par ses accès complexes à la végétation. Les coûts de maintenance du Bosco Verticale s'élèvent à 63 euros par mètre carré et par an. Ils englobent l'entretien de la végétation, des conduits d'irrigation d'eau, des chauffages, de l'air conditionné, de la réception et du nettoyage. Avec une surface de 40 000 mètres carrés, cela représente 2,5 millions d'euros de dépenses par an. Ce bâtiment, très coûteux en terme d'entretien, a besoin d'être constamment sous contrôle afin d'éviter toute dégradation et « verdurisation » du bâtiment. Sachant qu'il est déjà compliqué de cultiver sur un toit, il faut imaginer toute l'attention dont ont besoin ces plantes qui doivent être « stressées ».

10.2 Nouvelle mode

Mise à part la question budgétaire dont on ne peut contrôler les dépenses d'autrui, il me semble judicieux d'aborder la recherche perpétuelle de mise en valeur des arbres sur les bâtiments.

Depuis quelques années, les questions relatives à l'écologie et l'environnement sont devenues de plus en plus récurrentes. Les tendances ont changé et sont de plus en plus tournées vers l'écologie urbaine. La majorité des projets d'aujourd'hui sont dessinés dans un contexte de végétation. Jusqu'à en devenir un argument majeur de communication. C'est en tout cas ce que dénonce Tim De Chant, rédacteur numérique de NOVA Next (annexe 5). Dans un article publié sur Per Square Mile (De Chant, 2013), il dénonce cette nouvelle tendance de mettre des arbres partout. Alors qu'il y a quelques années, la mode était aux oiseaux, aujourd'hui elle est aux arbres.

« Vous voulez donner à un gratte-ciel un aspect tendance et durable ? Mettez un arbre dessus. Ou mieux encore, des dizaines. De nombreuses propositions de gratte-ciel de grande envergure sont envahies d'arbres. Sur les toits, sur les terrasses, dans les recoins, sur des balcons absurde-ment grands. En gros, n'importe où, à l'horizontale et en hauteur.»²⁰

Tim De Chant résume parfaitement la nouvelle tendance verte où les architectes tentent de convaincre par des designs à l'air futuriste et écologique. L'image renvoyée par le projet devient plus importante que le projet lui-même. Une série d'exemples va permettre de mettre en avant cette nouvelle pratique. D'une part avec de nouveaux projets conçus par l'architecte Stefano Boeri et d'autre part avec d'autres cabinets d'architecture qui adoptent cette même stratégie de poser des arbres partout lors de concours publics.

²⁰ Annexe 5, Tim De Chant. "Can We Please Stop Drawing Trees on Top of Skyscrapers?" 21 Mar 2013. ArchDaily. Accessed 4 May 2020. <https://www.archdaily.com/346374/can-we-please-stop-drawing-trees-on-top-of-skyscrapers>

10.2.1 Centre de réhabilitation, Stefano Boeri



Figure 24: Centre de réhabilitation conçu par Stefano Boeri.

Source : (<https://www.archdaily.com/942690/stefano-boeri-wins-international-competition-to-design-largest-rehabilitation-center-in-shenzhen-china>)

Très récemment, Stefano Boeri a remporté un concours international pour la construction d'un centre de réhabilitation à Shenzhen, en Chine. Construit dans les prochaines années, ce bâtiment sera composé d'un ensemble de terrasses vertes et d'espaces superposés dans un système durable mêlant nature, architecture et biodiversité et comprenant des jardins intérieurs dédiés à la réhabilitation. Alors que le projet combine de nombreuses fonctions comme un centre sportif, un musée ou un espace de travail, toutes tournent autour d'un élément clef : la végétation sur les terrasses. L'idée d'amener des espaces verts sur l'ensemble des toitures du bâtiment reste semblable au Bosco Verticale.



Figure 25: Centre de réhabilitation conçu par Stefano Boeri.

Source : (<https://www.archdaily.com/942690/stefano-boeri-wins-international-competition-to-design-largest-rehabilitation-center-in-shenzhen-china>)

Sur les images de synthèse, on peut apercevoir rapidement que ce sont les arbres qui donnent vie au bâtiment. Ayant l'impression d'être tous posés un à un de manière aléatoire sur l'ensemble des toitures, les propos de Tim De Chant prennent tout leur sens. L'objectif n'est plus de montrer le bâtiment dans son contexte mais ce qui se trouve dessus. En outre, lors de la lecture d'un article consacré au projet (Harrouk, 2020), j'ai pu lire certains commentaires d'internautes. L'un d'entre eux a réussi à résumer de manière humoristique un dialogue entre l'architecte Stefano Boeri et un employé. Ce commentaire est en concordance avec l'effet de mode de placer des arbres partout sur le bâtiment :

« Employé : Mr Boeri, Quel est l'esprit du projet ? La relation avec son contexte ? L'échelle humaine ? La poésie de la structure ? Quelle histoire se cache derrière la façade ?

Mr Boeri : Quoi ? Place simplement des arbres partout » ²¹

²¹ Nguyen, Q. (2020b, juillet 7). Employee : M. Boeri, boss, what is the spirit of the project ? The relation to the context ? The human scale ? The [Commentaire sur l'article "Stefano Boeri Wins International Competition to Design Largest Rehabilitation Center in Shenzhen, China"]. *Facebook*.
<https://www.archdaily.com/942690/stefano-boeri-wins-international-competition-to-design-largest-rehabilitation-center-in-shenzhen-china>

10.2.2 Peruri 88, MVRDV



Figure 26: Projet imaginé par MVRDV.

Source : (<https://www.archdaily.com/295962/mvrdv-proposes-400-meter-tall-vertical-city-in-jakarta>)

Cette proposition de projet appelé Peruri 88 par le groupe MVRDV est un autre exemple de cette mode. Une série d'arbres ont été déposés sur l'ensemble des toitures pour donner un aspect plus esthétique au projet. Alors qu'il apparaît à première vue comme un bâtiment en symbiose avec la nature où la végétation grimpe naturellement sur les toits, en réalité il n'en est rien. Lorsqu'on y réfléchit de manière raisonnée, ce gratte-ciel n'est rien d'autre qu'un amas de béton avec des arbres qui ont été déposés dans tous les endroits possibles. Le terme « copier / coller » prend tout son sens en voyant ce genre d'image.

10.2.3 Le cinq, Neutelings Riedijk Architects

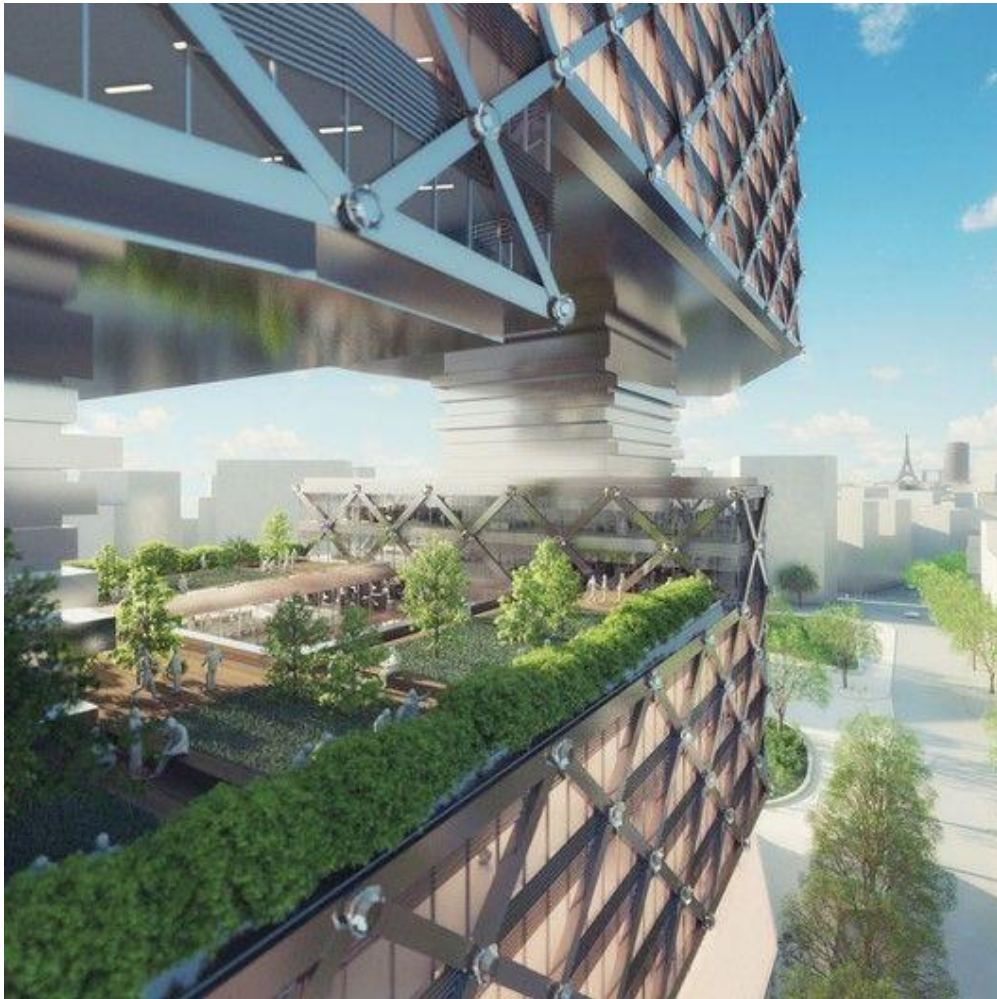


Figure 27: Projet imaginé par Neutelings Riedijk Architects.

Source : (<https://www.archdaily.com/254888/le-cinq-office-tower-neutelings-riedijk-architects>)

Le cinq, projet réalisé par le cabinet d'architecture Neutelings Riedijk Architects en est un autre exemple. Conçu à Paris, ville qui peine à végétaliser son centre-ville, c'est l'endroit idéal pour réaliser des projets avec des arbres. Il est composé de cinq blocs, chacun possède un jardin qui est décrit comme « ayant des espaces propices à la vie ». Le principe de ce bâtiment est basé uniquement sur la végétation qui est déposée sur chaque terrasse. Le simple fait de venir poser ces arbres devient la pièce maîtresse du projet avec des vues à l'air futuriste où la végétation du sol est mise en relation avec celle sur des terrasses. Malheureusement, très peu de personnes y auront probablement accès et toute cette végétation sera privatisée, etc.

Ces exemples de propositions jonchées de végétation sont très beaux en image avec des rendus proches de la réalité. Tous travaillent avec des arbres sur l'ensemble des toitures des projets sans nécessairement se demander si c'est réalisable et dans la positive, à quel coût pour l'arbre et la nature ? Alors qu'on serait presque tenté de voir ces bâtiments être construits dans nos villes, combien d'entre eux sont réellement écologiques et en symbiose avec la nature ? Le nombre de bâtiments similaires existants aujourd'hui étant assez faible : ces projets sont-ils réellement réalisables ?

Une autre question se pose également à propos de cet effet de mode et cette obsession pour les architectes. Alors qu'elle a varié suivant les époques, vers quoi la mode s'orientera-t-elle dans les prochaines années ? La végétation va-t-elle devenir une norme dans les projets futurs au vu des enjeux climatiques actuels ? Le vert va-t-il envahir nos villes demain ou va-t-on changer d'effet de mode pour se tourner vers une autre préoccupation ? Seul l'avenir nous le dira...

"Les arbres sont nés de la terre et ils y sont beaux. Je ne fais pas d'autres commentaires".²²

²² Botto,M. (2007, 23 novembre). Vive la ville moderne mais Milan n'est pas Abu Dhabi. Milano – la Repubblica. <https://milano.repubblica.it/dettaglio/botta:-viva-la-citta-moderna-ma-milano-non-e-abu-dhabi/1392947>

10.3 La place de l'arbre

10.3.1 Sa vie en altitude

Les gratte-ciels et les responsabilités environnementales n'ont jamais été fort compatibles. Leur réalisation nécessite un apport extraordinaire d'énergie primaire et de matières premières. Bien que de nombreuses améliorations soient apparues en matière d'énergie, ce type de bâtiment reste toujours très gourmand lors de la construction. L'idée d'y intégrer des arbres pour les rendre plus écologique reste irrationnel. En effet, comme le déclare Tim De Chant dans un article publié sur Per Square, « Ce n'est tout simplement pas réaliste. Je comprends pourquoi les architectes les dessinent sur leurs bâtiments. Vraiment, je comprends. Mais pouvons-nous arrêter ? »²³

Dans son article, Tim De Chant énumère quelques raisons scientifiques qui prouvent que ce n'est pas une bonne idée. Il dit que s'il n'y a jamais eu d'arbres sur les gratte-ciel, c'est que la vie est nulle là-haut. Autant pour les humains que pour les arbres. « Il fait chaud, froid, le vent, la pluie vous fouette, la neige et la grêle vous écorchent à grande vitesse. Pour les arbres de la ville, la vie est déjà assez dure sur le terrain. Je ne peux pas imaginer ce que c'est à 500 pieds d'altitude, où presque toutes les variables climatiques sont plus extrêmes qu'au niveau de la rue. »²⁴

Les arbres ont en effet déjà assez de difficultés à se développer sur le sol de la ville mais en hauteur cela est pire. Ils doivent affronter les changements météorologiques à plus grande échelle. L'un des éléments le plus contraignant est le vent. Nous pouvons prendre en comparaison les arbres au-dessus des montagnes dont les troncs sont inclinés par la force du vent.

Le vent interrompt également la couche limite²⁵ présente entre les feuilles et l'atmosphère. Elle permet de contrôler l'évapotranspiration (la perte de l'eau et du gaz

²³ Tim De Chant. "Can We Please Stop Drawing Trees on Top of Skyscrapers?" 21 Mar 2013. ArchDaily. Accessed 4 May 2020. <https://www.archdaily.com/346374/can-we-please-stop-drawing-trees-on-top-of-skyscrapers>

²⁴ Ibid

²⁵ La couche limite est une sorte d'enveloppe pelliculaire due aux frottements engendrés par la viscosité du fluide. La vitesse relative du fluide y varie très rapidement d'une valeur nulle à la surface du corps jusqu'à une valeur finie, qui est celle du fluide libre. (Le dictionnaire Larousse en ligne 2020. https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/couche_limite/37718, consulté le 01 mai 2020.)

par les pores de la face inférieure d'une feuille). Cette couche existe sur les plantes dans des conditions calmes où le vent n'est pas extrême et favorise son développement. Dans le cas contraire, les arbres auront plus de mal à se développer et grandir. L'image des grands arbres majestueux et gracieux sur les images des projets n'est donc tout simplement pas possible. L'arbre va tenter de survivre en hauteur et ne se développera jamais comme il le ferait au sol, ajouter à cela un mélange de froid et de chaleur extrême....

Il est déjà connu que le froid peut tuer des plantes en transformant l'eau à l'intérieur en cristallins. À l'inverse, la chaleur impose de nouveaux types de défis tels que l'accès à l'eau ou le système d'évapotranspiration qui peut être mis à rude épreuve. Constamment sous les rayons du soleil, le mécanisme de photosynthèse peut se décomposer suite à l'extrême chaleur sur les feuilles de l'arbre.

10.3.2 Murs végétaux

Alors que les arbres sont conditionnés à pousser à même le sol, ce n'est pas le cas de tous les végétaux. C'est ce que nous prouve Patrick Blanc, botaniste français, qui est reconnu comme l'inventeur des murs végétaux. Il apporte sous une nouvelle forme la végétation au sein de la ville. L'une de ses particularités est qu'il arrive à transformer un mur aveugle et sans vie en façade végétale remplie de vie. Sa manière de composer ses projets est intéressante par le fait qu'il a une connaissance approfondie du végétal. Chaque projet, par ses caractéristiques de localisation dans le monde, va être élaboré avec des plantes qui s'acclimateront parfaitement à son nouveau milieu.

C'est son principe même du choix des plantes qui fait sens, il ne compose qu'avec des plantes qui poussent en milieu incliné ou vertical. Elles viennent donc majoritairement de milieux proches de falaises. Lui-même l'affirme dans un article (Chahi, 2009) : « Je n'introduis jamais une plante sur un mur avant de m'assurer qu'elle pousse en milieu rocheux. »²⁶

²⁶ Chahi, C. (2009, 27 janvier). *Patrick blanc, l'artiste du mur végétal*. Batiactu. <https://www.batiactu.com/edito/patrick-blanc-artiste-mur-vegetal-22185.php>



Figure 28: Mur végétal réalisé par Patrick Blanc en Malaisie.

Source : (<https://www.murvegetalpatrickblanc.com/realisations/kuala-lumpur/le-nouvel-kuala-lumpur>)

Le projet ci-dessus, nommé Le Nouvel KLCC construit en 2016, est une collaboration entre l'architecte Jean Nouvel et le botaniste Patrick Blanc. Il démontre qu'il est possible d'habiller deux tours de 200 mètres de haut avec des plantes grimpantes et qui sont, contrairement aux arbres, adaptées à ce genre de climat et d'altitude. La structure pour accueillir ces plantes est bien moins complexe que pour le Bosco Verticale. C'est à l'aide d'une grille de câbles en acier inoxydable que les plantes grimpantes ou descendantes vont s'accrocher et se développer au fil du temps pour recouvrir la façade du bâtiment. Sans savoir si ce type de bâtiment est l'exemple idéal, si l'idée de verduriser la ville est l'objectif recherché par l'architecte, ce type de projet est ici bien plus simple à réaliser que de couler des tonnes de bétons pour accueillir des arbres qui ne profiteraient qu'aux habitants de l'immeuble.

« La verticalisation des villes révèle de nouvelles formes de privatisation de l'espace public, non plus seulement au sol mais en hauteur. »²⁷

²⁷ Botta, M. (2007, 23 novembre). Vive la ville moderne mais Milan n'est pas Abu Dhabi. Milano – la Repubblica. <https://milano.repubblica.it/dettaglio/botta:-viva-la-citta-moderna-ma-milano-non-e-abu-dhabi/1392947>

10.4 Privatisation de la végétation

Alors que la ville de Milan n'est recouverte que de 4% d'espaces verts (Arte, 2015, 0:0:46), le Bosco Verticale se vante de proposer une nouvelle forme de retour de la végétation en ville. Cette nouvelle méthode d'intégration de végétation reste très critiquable. Alors qu'il est perçu majoritairement comme une véritable forêt, les habitants des quartiers voisins perçoivent quant à eux ces deux tours comme une privatisation de la nature réservée à de riches propriétaires. Situé dans une ancienne zone industrielle, l'édifice scinde les quartiers en deux mondes totalement différents. L'un est le nouveau quartier du Porta Nuova avec comme emblème le Bosco Verticale, aux terrasses individuelles verdoyantes pour les plus fortunés. Le second est le quartier multi sociétal d'Isola, composé d'ouvriers et d'artisans. Une tension entre ces deux mondes est soulignée par l'inaccessibilité à cette végétation qui n'appartient qu'à un petit nombre d'habitants qui en ont les moyens. Dire qu'il a amené 2 hectares de forêts au quartier est une aberration car ces 2 hectares sont privatisés pour 480 personnes alors qu'une forêt traditionnelle pourrait en accueillir des milliers. Cette nouvelle forme de végétalisation ne fait que renforcer l'écart entre les classes sociales et apporte une nouvelle forme de ségrégation par la privatisation de la végétation.

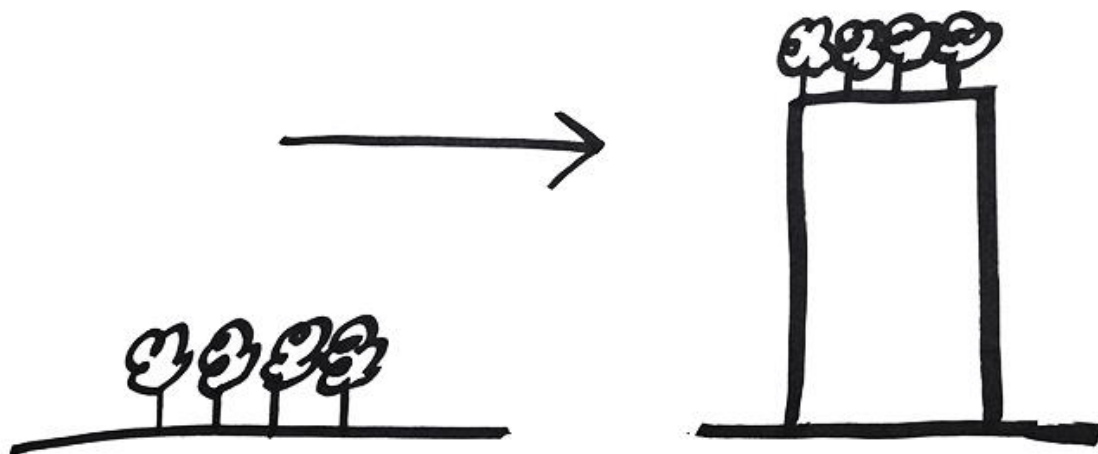


Figure 29: Illustration du principe de la privatisation verticale de la végétation.

Source : (<https://www.globalist.it/culture/2016/05/08/storia-dell-isola-il-quartiere-storico-che-vogliono-cancellare-68713.html>)

10.5 Rôle de la nature en ville

Il est également légitime de s'interroger sur la question de la nature en ville ainsi que son rôle vis-à-vis de la population. Les arbres sur le Bosco Verticale se limitent à refléter une nouvelle société qui a réussi à individualiser la végétation. Cependant, la question de la nature en ville ne se résume pas uniquement à la superficie que prend cet espace vert, mais à ce qu'on en fait. C'est-à-dire que la végétation doit jouer également des rôles d'un point de vue social et culturel. De surcroît, selon certaines études, l'accès à ces espaces verts en ville permet d'améliorer la santé des habitants, de réduire le stress et favorise l'activité physique.

10.5.1 Isola Pepe Verde

Il ne faut pas chercher loin du Bosco Verticale pour trouver l'exemple d'une utilisation responsable de la végétation. À 300 mètres a été créé le « Isola Pepe Verde ». Celui-ci est né d'un collectif citoyen qui a pour but de mettre à disposition un jardin qui n'est pas uniquement une surface verte mais un lieu ouvert à tous, où chacun peut venir faire pousser des plantes, des fleurs et des légumes. Situé anciennement sur une friche industrielle, cet endroit accueille aussi bien les habitants du quartier que les enfants d'une crèche voisine qui peuvent y observer les changements liés aux saisons et s'initier aux pratiques du jardinage urbain.



Figure 30: Photographie du collectif citoyen Isola Pepe Verde à Milan.

Source : (<http://isolapepeverde.org/2013/11/19/articolo-miracolo-a-milano/>)

Ce petit collectif qui voit défiler des milliers de personnes chaque année est en plein essor. Cet envol prouve que la population locale est à la recherche de ce type d'espace vert où il y a un réel contact entre l'homme et la nature. Ce jardin partagé est un exemple du vrai sens de la nature en ville et prouve qu'elle a de nombreux rôles. Il ne se limite pas à être une étendue verte de décoration mais un lieu de partage, de savoir et de culture entre l'ensemble des habitants.

10.5.2 Contrôle de la nature

En continuité du point précédent, il semble également judicieux d'aborder la question du contrôle de la végétation. Toujours dans le cas du « Isola Pepe Verde », la population est amenée à entretenir un lien avec cette végétation. Les habitants y viennent retourner la terre, semer, arroser, couper et espérons-le, récolter. Ces actions en relation avec la nature en milieu urbain sont très importantes, elles permettent de reconnecter l'homme à la terre. Le libre accès permet à la population de planter une multitude de végétaux qui vont créer un écosystème unique. Les mauvaises herbes en font parties.

C'est tout le contraire du Bosco Verticale ! Tous ses arbres, buissons ou plantes ont été rigoureusement sélectionnés pour créer un écosystème prédéfini. Cet écosystème est tellement fragile qu'il est interdit aux habitants du Bosco Verticale d'introduire de nouvelles espèces végétales. Cela risquerait de bouleverser l'écosystème du bâtiment. Pire que cela, les habitants n'ont ni le droit d'arroser ni même de tailler les végétaux. Ceux-ci sont réservés à des professionnels qui viennent entretenir les végétaux plusieurs fois par an. Que devient donc l'intérêt de posséder des arbres sur son balcon si l'on ne peut pas les toucher, peut-on dans ce cas-ci parler de végétation artificielle ?

Généralement, lorsque les espaces verts se font rares, les habitants ont tendance à faire pousser des plantes sur leur balcon et à jardiner afin de retrouver une relation directe avec le végétal. Cette pratique ordinaire ne répond pas uniquement à notre besoin de nature mais apprend également à l'homme à être attentif et à prendre soin de cette mère nature. Le fait de jardiner est en quelque sorte une sensibilisation tant à la nature qu'aux enjeux climatiques. Alors comment sensibiliser et enseigner les bonnes pratiques liées à l'écologie urbaine si la nature est contrôlée et que toute tentative de jardinage est proscrite ?

« Je me demande combien de temps il faudra pour que le CO₂ libéré lors de la fabrication du béton qui soutient les arbres ait la même quantité de CO₂ absorbée par les arbres. Je pense que jamais. »²⁸

²⁸ Alter, L. (2013, 25 juin). Putting trees on skyscrapers : An interview with Lloyd Alter. Archdaily. Consulté sur <https://www.archdaily.com/393347/putting-trees-on-skyscrapers-an-interview-with-lloyd-alter>

10.6 Arbre béton

J'aimerais présenter un argument complémentaire à ceux déjà énumérés au sujet de l'idée absurde de vouloir planter des arbres en hauteur. J'estime qu'il est le plus important. C'est lors de la visualisation d'une image durant la construction du Bosco Verticale que j'ai eu le déclic. Ci-dessous, on peut y voir un arbre surélevé par une grue au milieu de deux énormes tours de béton. Elles sont grisâtres sans aucune âme alors que l'arbre est quant à lui coloré et rempli de vie. Cette photo, ci-dessous, met en évidence la face cachée de ces tours qui ont dû nécessiter énormément d'énergie et de matière première pour être construites.

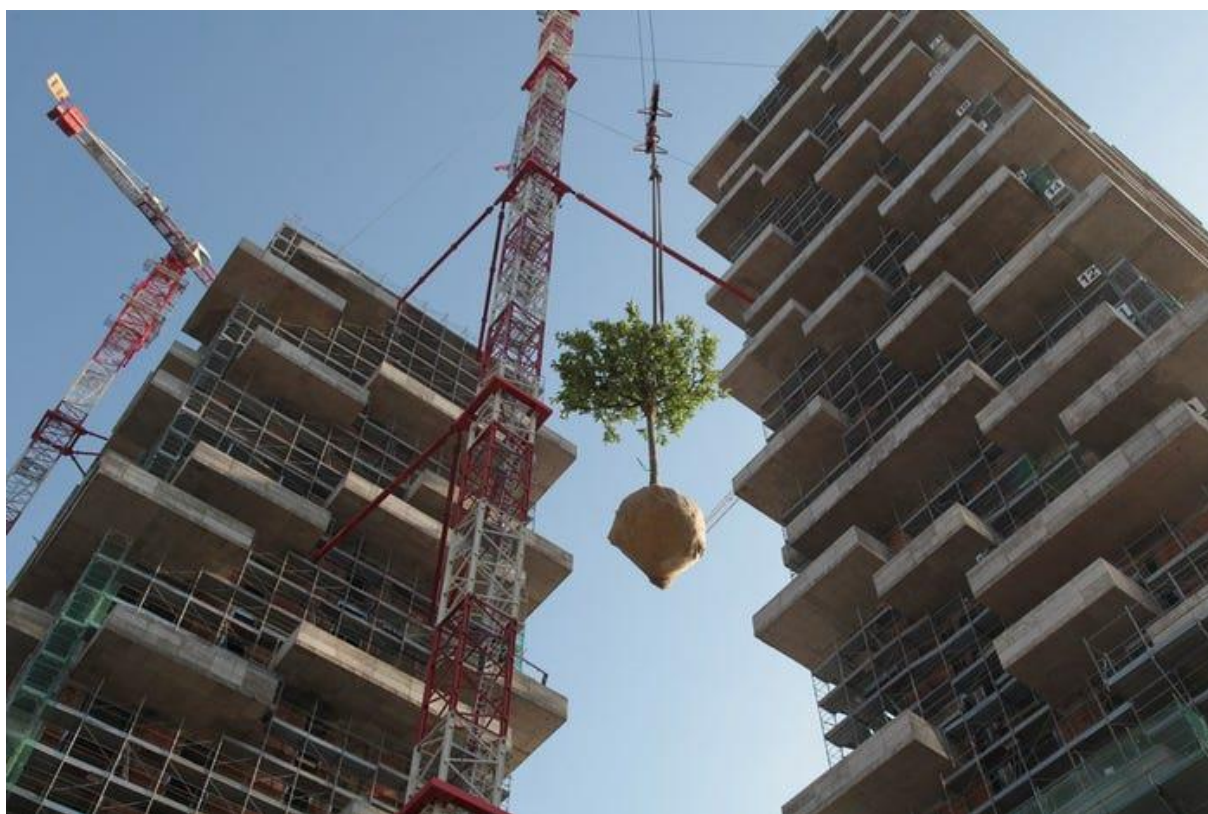


Figure 31 : Photographie du Bosco Verticale lors de la mise en place des arbres sur les balcons.

Source : (<http://www.ecolopop.info/2013/02/bosco-verticale-une-foret-verticale-dans-le-centre-de-milan/16228>)

Il faut savoir qu'une majeure partie de la communication du Bosco Verticale et des futurs projets de Stefano Boeri vante leurs captations de CO₂ et donc de dépollution de l'air en milieu urbain. Ces forêts verticales, à la lecture des articles communiqués par l'architecte Stefano Boeri ainsi que des articles de presse, paraissent comme une solution pour faire face à la pollution urbaine. C'est dans ce contexte que j'ai eu envie de tenter de prouver que ces tours n'ont rien d'écologique, que du contraire ! Bien que cette démarche ne pourra pas être fiable à cent pourcent, cela semble tout de même judicieux d'apporter plus d'informations au sujet de la captation de CO₂. Car, s'il est vrai que les végétaux présents sur le Bosco Verticale absorbent une certaine quantité de CO₂, il ne faut pas négliger toute la mise en œuvre derrière l'édification d'un tel immeuble. Etant conscient que le milieu de la construction a de grandes responsabilités d'un point de vue de la pollution, le Bosco Verticale n'a pas échappé à la règle. En effet, alors que le béton est connu pour être en grande partie responsable des émissions du secteur du bâtiment, il est présent en masse dans le Bosco Verticale. Il est d'ailleurs presque entièrement construit en béton avec ses structures, ses dalles d'étages ainsi que ses balcons.

L'objectif de cette démarche est de s'intéresser aux balcons qui sont destinés à supporter l'ensemble de la végétation présente sur l'édifice. Elle aura pour but de calculer approximativement le taux de CO₂ émis pour leur mise en place et de le comparer, par la suite, avec le taux d'absorption de CO₂ que possède le Bosco Verticale grâce à sa forêt urbaine. Ayant des doutes sur la rentabilité du bâtiment avant même de commencer cette démarche, ceci permettra de savoir dans quelle échelle d'émission de CO₂ le Bosco Verticale se trouve. Et donc, par conséquent, d'avoir une réponse quant à l'intérêt de créer des structures capables d'accueillir une forêt verticale en milieu urbain.

10.6.1 Réalisation d'un balcon type

La première étape de cette démarche est de réaliser un balcon type qui généralise l'ensemble des balcons des deux tours. Il permettra de réaliser des calculs et ensuite de les ramener à l'échelle de l'ensemble des balcons présents.

Dans son livre, Stefano Boeri (2015) précise que la surface approximative de l'ensemble des balcons est de 8 900 m² et qu'il y a 250 sur l'ensemble des deux tours. Sachant que la largeur est de 3,25 mètres, la longueur moyenne est rapidement connue ($8\,900\text{ m}^2 / 3,25\text{ m} / 250 = 10,95\text{ m}$). Une fois le résultat arrondi, un balcon type fait 11 m x 3,25 m. L'épaisseur de la dalle du balcon en porte-à-faux est également connue et fait 28 cm.

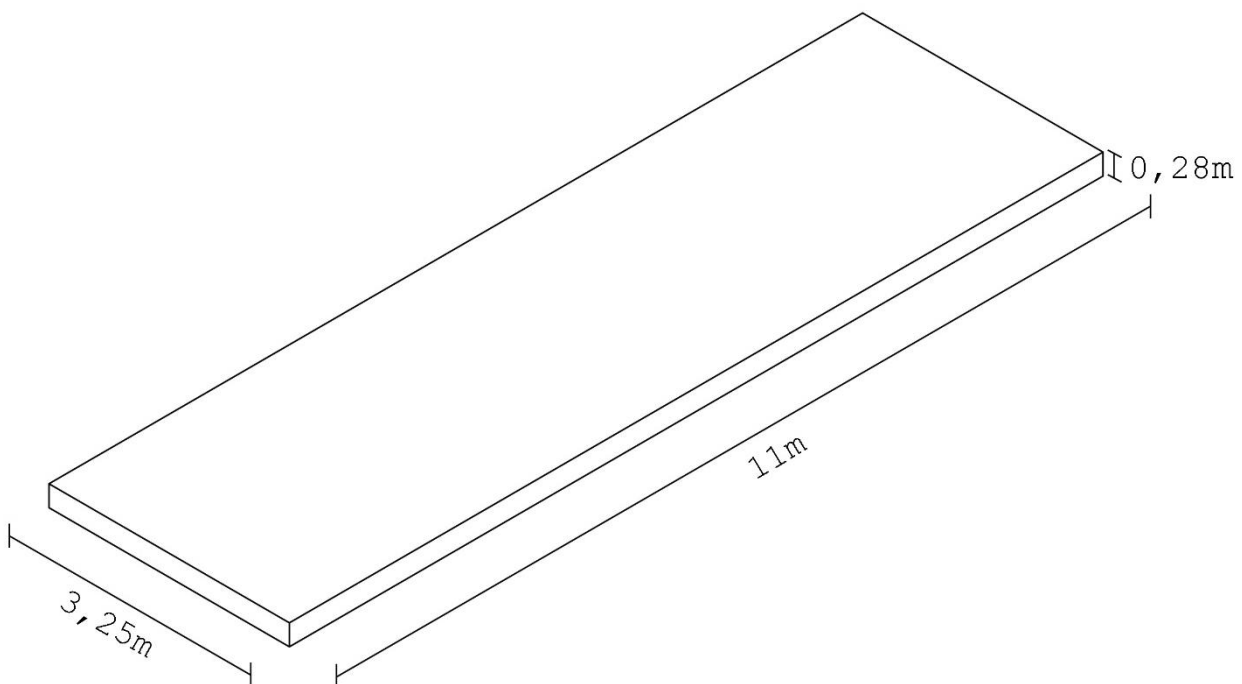


Figure 32: Illustration des dimensions d'un balcon type du Bosco Verticale.

Illustration personnelle.

10.6.1.1 Végétation par balcon

Afin de donner un aperçu des charges présentes sur chaque balcon, une division de l'ensemble des végétaux sur les tours permet de mettre en évidence la quantité de végétation plantée. Sachant qu'il y a environ 711 arbres, 5 000 arbustes et 20 000 plantes (Boeri, 2015) et que les deux tours contiennent 250 balcons, cela revient à 2,84 arbres, 20 arbustes et 80 plantes par balcon. Toute cette végétation est contenue dans des pots qui sont placés sur l'ensemble de la longueur des balcons et fait office de garde-corps. Ils subissent donc d'énormes charges, sans compter qu'ils sont placés en porte-à-faux. D'où l'intérêt de se pencher sur ces balcons jouant un rôle crucial dans ce projet de forêt verticale.



Figure 33: Nombre de végétaux présents par balcon.

Illustration personnelle.

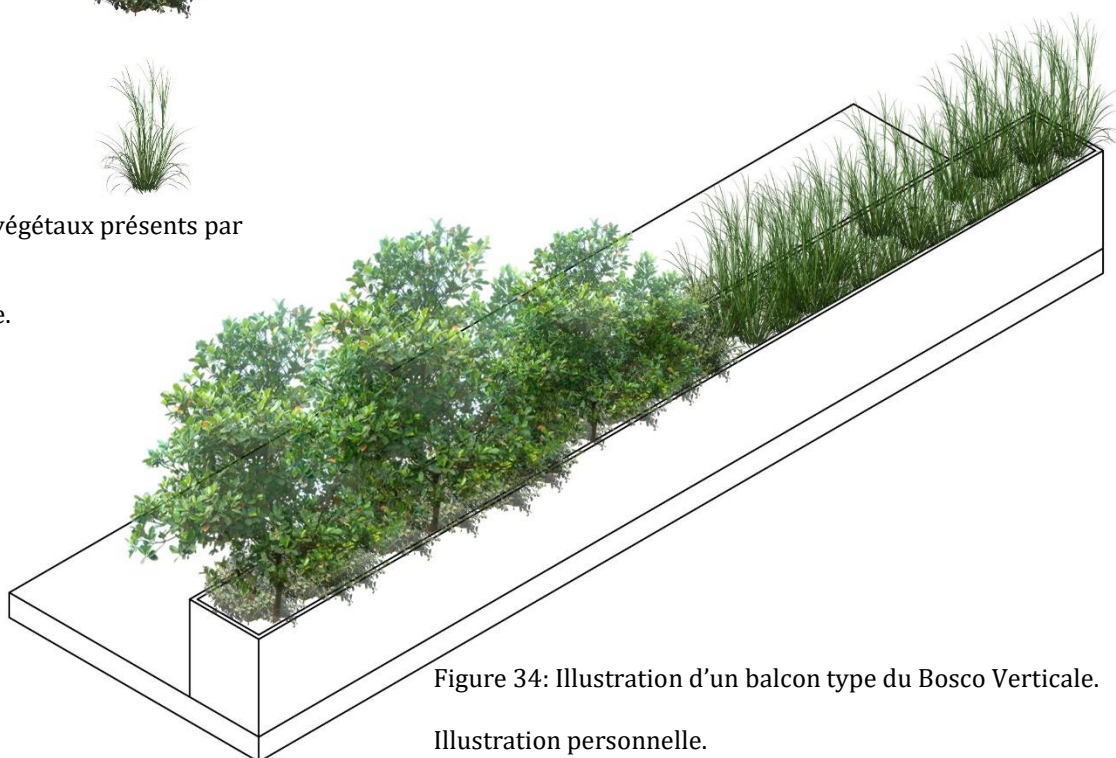


Figure 34: Illustration d'un balcon type du Bosco Verticale.

Illustration personnelle.

10.6.1.2 Emission de CO₂ pour la construction des balcons

Par manque d'information sur la composition exacte des balcons, les résultats obtenus dans cette démarche ne seront pas fiables à cent pourcent. Cependant, ils permettront de donner une échelle approximative quant à la durée que prendra la végétation sur le Bosco Verticale à capturer le CO₂ émis lors de la mise en place des balcons en béton. La première étape consiste à évaluer le pourcentage de ferrailage présent dans chaque balcon. A l'aide d'un bureau d'étude en stabilité, j'ai pu être renseigné quant à la masse approximative des armatures présentes par mètre cube de béton, qui avoisine les 150 à 180 kg/ m³. Ensuite, en référence au tableau KBOB (annexe 3) qui m'indique l'émission de CO₂ par kg de chaque matériau, je peux trouver facilement le taux d'émission total pour chaque balcon.

Pour les armatures, le tableau KBOB indique que le taux de kilos de CO₂ par kilos d'armature est de 0,682 (kg CO₂-eq). Sachant qu'il s'agit d'environ 150 kg/ m³, le résultat est de 102,3 kg de CO₂ pour un mètre cube ($0,682 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \times 150 \text{ kg/ m}^3 = 102,3 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$).

Pour le béton, le tableau KBOB indique que le taux de kilos de CO₂ par kilos de béton pour travaux de génie civil est de 0,107 (kg CO₂-eq). Sachant qu'il a une masse volumique de 2350 kg/ m³, le résultat est de 251,45 kg de CO₂ pour un mètre cube ($0,107 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \times 2350 \text{ kg/ m}^3 = 251,45 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3$).

Maintenant que les informations d'émission de kilos de CO₂ par m³ sont connues pour les armatures ainsi que le béton, il ne reste qu'à transformer ce résultat à l'échelle complète du bâtiment.

Un balcon fait approximativement 10 m³ (L x l x h = 11m x 3,25m x 0,28m = 10.01 m³). Sachant qu'il y a 250 balcons, le résultat obtenu à l'échelle complète du bâtiment est d'environ 884 tonnes de CO₂ émis rien que pour la construction des balcons ($(251,45+102,3) \times 10 \times 250 = 884\,375 \text{ kg de CO}_2$). Alors que le Bosco Verticale se vante d'absorber plus de 19 tonnes de CO₂ par an grâce à sa végétation (Boeri, 2015), il faudra d'abord plus de 46 ans avant que tout le CO₂ émis pour la construction des balcons ne soit absorbé ($884\,375 / 19\,000 = 46,54 \text{ années}$).

10.6.1.3 200 tours du monde

Afin de prendre réellement conscience de l'ampleur de cette valeur de 884 375 kg de CO₂, il me semble judicieux de rapporter ce résultat à un moyen de transport qui reste très controversé, l'avion. En effet, d'après une étude menée par l'Agence Européenne de l'Environnement en 2014, l'avion est le moyen de transport le plus polluant avec 285 grammes de CO₂ par passager et par kilomètre (annexe 4). L'ensemble des émissions émises pour ces balcons seraient donc équivalente à 200 fois le tour du monde en avion.



Figure 35: Illustration de l'équivalence du nombre de tours du monde en terme d'émission de CO₂ pour la mise en œuvre des balcons.

Illustration personnelle.

10.6.1.4 Analyse du résultat

Bien que ce résultat, par manque d'information, ne puisse être entièrement fiable il permet tout de même de donner un ordre de grandeur quant au taux d'émission de CO₂ pour la création des balcons. Il faut savoir également que des étapes n'ont pas été prises en compte lors de ce calcul, comme le transport et la mise en œuvre qui sont des facteurs d'émission de CO₂. Pour obtenir des résultats plus précis, il serait nécessaire d'obtenir des documents techniques sur la composition exacte de ces balcons tels que des plans de ferrailage.

Sachant que l'ensemble des balcons (Boeri, 2015) représente environ 22% de la surface totale construite (environ 8 900 m² de balcons et 40 000 m² de surface construite), on peut imaginer approximativement le nombre d'années nécessaires pour rentabiliser écologiquement le Bosco Verticale ($46,54 \times 4,54 = 211,29$ années). Étant conscient que dans ce rapide calcul énormément d'étapes n'ont pas été prises en compte et que plus de 200 ans soient nécessaires pour compenser le CO₂ émis, il est peut-être préférable de ne pas imaginer les centaines d'années nécessaires pour contrebalancer l'entièreté de la construction du bâtiment qui vont au-delà de son espérance de vie ainsi que celle de la végétation.

« C'est criminel qu'une personne puisse occuper 18,5 mètres carrés d'espace pour garer une voiture, alors qu'on peut faire pousser 1400 dollars de nourriture dans cet espace. »²⁹

²⁹ Alter, L. (2013, 25 juin). Putting trees on skyscrapers : An interview with Lloyd Alter. Archdaily. Consulté sur <https://www.archdaily.com/393347/putting-trees-on-skyscrapers-an-interview-with-lloyd-alter>

10.7 Paradigme des voitures

Du point de vue de certains architectes, dont celui de Stefano Boeri, la verticalité paraît être la solution idéale pour faire face aux problèmes d'étalement urbain et d'augmentation de la population en ville. Cependant, cette méthodologie n'est pas viable à long terme et ne se confronte pas à la source réelle du problème. En effet, de nos jours la mobilité urbaine pose de plus en plus problème à cause de l'automobile qui est sans cesse remise en question. De nombreux paradigmes imaginent la ville sans voiture car on commence à se rendre compte que ce secteur demande énormément de surface. Alors qu'en ville, il existe de plus en plus d'alternatives telles que le vélo, la trottinette ou le scooter, on continue à se déplacer majoritairement en voiture, également pour des courts trajets et bien souvent seul. Alors qu'il y a plus d'1,4 milliard de véhicules à moteur à quatre roues ou plus en circulation dans le monde (transition & énergies, 2020), ce chiffre est en constante augmentation.

Même si l'espace en ville se fait de plus en plus rare, on continue à pouvoir y entrer en voiture et à se garer sur des parkings publics ou privés, en centre-ville au bord des routes,... Si les voitures permettent à l'homme de se déplacer sur les routes, il faut savoir qu'elles passent plus de temps sur les parkings. Ceux-ci prennent énormément de place dans la ville. Une récente étude (2020) menée par le service italien du transport public nommé Azienda Trasporti Milanesi (ATM) a permis d'estimer le nombre de places de parking aux bords des routes dans la ville de Milan. Il y en aurait plus de 90 000 (annexe 5)!

Sachant qu'une place de parking fait en moyenne 10 m², la surface totale de l'ensemble des places en bord de route serait d'environ 900 000 m² (90 hectares). Sachant que le Bosco Verticale se vante de proposer 2 hectares de forêt en ville, on pourrait en récupérer bien plus en repensant le modèle de circulation de la ville de Milan. En termes de terrain de foot, toutes ces places de parking sont équivalentes à environ 128 terrains de football.

Il faut savoir que dans ce rapide calcul, seuls les parkings en bord de route ont été pris en compte. N'ayant aucune source en ce qui concerne le nombre total de places de garages ainsi que des parkings publics ou privés, ils n'ont pas pu être comptabilisés. Cependant, si la surface de parking aux bords des routes est déjà d'approximativement 128 terrains de football, la surface totale dédiée dans la ville à la voiture doit probablement être bien plus élevée. Repenser les moyens de transport dans une ville permettrait d'aider à résoudre de nombreux problèmes tels que le manque de places ainsi que d'espaces verts, la pollution atmosphérique qui accentue l'ICU, etc.

Bosco Verticale:



Places de parking en bord de route:

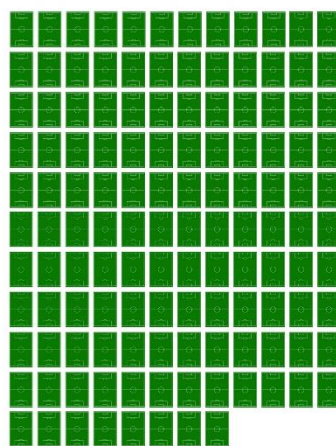


Figure 36: Illustration comparative de la surface de végétation présente entre le Bosco Verticale et les places de parking au bord des routes à Milan.

Illustration personnelle.

10.8 Conclusion

Cette seconde approche permet de mettre en évidence d'autres sujets qui ne me sont pas venus directement à l'esprit lors de la première vision du Bosco Verticale. Outre la question des bienfaits de la végétation qui reste indiscutable, de nombreuses autres interrogations gravitent quant à l'intérêt de positionner des arbres sur une tour. Coût, effet de mode, greenwashing, telles sont les thématiques qui ressortent lorsqu'on analyse cette première forêt verticale.

En effet, le coût de la mise en œuvre ainsi que l'entretien d'une telle infrastructure reste très élevé. Si l'objectif est de ramener la végétation en milieu urbain, il existe d'autres moyens plus économiques qui pourraient profiter à l'ensemble de la population tels que des parcs, des espaces verts, des forêts traditionnelles ou même des jardins collectifs. Cette privatisation de la végétation par la verticalité jouit uniquement à une minorité de personnes provenant de la classe aisée. Cela va amplifier l'écart entre les classes sociales et par conséquent, créer des ruptures entre les différents quartiers à proximité.

La question de la place de l'arbre vient également se poser. Ayant toujours vécu enraciné à-même le sol, d'où vient cette idée d'intégrer des arbres sur les bâtiments ? Les enjeux environnementaux actuels ont probablement incité cette nouvelle mode de présence de végétaux. Faut-il encore l'utiliser à bon escient avec par exemple des plantes grimpantes qui sont faites pour vivre en hauteur, à défaut des arbres.

Alors que la communication autour du Bosco Verticale ainsi que des prochaines forêts verticales est tournée vers sa capacité à dépolluer l'air en ville, il a été prouvé qu'il n'en est rien. En effet, par sa mise en œuvre complexe qui demande énormément de ressources émettrices de CO₂, il faudrait des centaines d'années avant que le Bosco Verticale ne soit réellement rentable d'un point de vue écologique.

PARTIE 3 : CAS D'ÉTUDE

11 LE PAVILLON DES PAYS-BAS À L'EXPOSITION UNIVERSELLE EN 2000 CONÇU PAR MVRDV

Dans ce travail de recherche basé sur les forêts verticales et plus précisément sur le Bosco Verticale qui fait office de précurseur des forêts verticales, il semble judicieux de rechercher dans le passé si d'autres bâtiments n'ont pas également essayé d'associer des arbres et de la nature dans l'architecture. Le pavillon de MVRDV à l'exposition universelle d'Hanovre en 2000 en est un parfait exemple et pourrait être considéré comme un des nombreux précurseurs de ce concept de forêt verticale. Cela est principalement dû à son principe d'intégration d'arbres ailleurs que sur le toit. De nombreux projets ont intégré de la végétation sur leur toiture mais très peu l'ont fait au sein même du bâtiment pour en faire un élément structurant.



Figure 37: Photographie du pavillon d'Hanovre à l'exposition universelle en 2000, conçu par MVRDV.

Source : (<https://www.mvrdv.nl/projects/158/expo-2000>)

11.1 « Homme, Nature et Technologie »

L'élément intéressant dans cette mise en relation entre le Bosco Verticale et le pavillon d'Hanovre est sa thématique. En effet, celle-ci lors de l'exposition en 2000 à Hanovre a eu pour thème « L'homme, la nature et la technologie » avec comme tendance des sujets tenant compte de l'environnement, de l'énergie ainsi que du développement durable. L'objectif était de mettre en valeur les limites ainsi que les défis du progrès technologique mondial à travers ces expositions temporaires. Chaque pavillon se devait de présenter un projet exemplaire dans la manière d'aborder les problématiques environnementales de l'époque.

La terre, l'eau, l'air, le feu sont les éléments qui ont influencé la pensée de l'architecte lors de la création du pavillon. Ces quatre éléments antiques qui ont structuré le monde jadis, redeviennent d'actualité. Ces projets ont pour but de démontrer qu'ils peuvent encore structurer le monde d'aujourd'hui.

11.1.1 « La Hollande crée l'espace »

Les Pays-Bas étant un pays densément peuplé, l'objectif était de montrer comment créer de l'espace, à l'avenir, en s'étendant dans le sens vertical et non plus horizontal. Dans la mesure où près d'un tiers du pays qui se trouve en dessous du niveau de la mer, les Pays-Bas sont constamment à la recherche de solutions pour faire face à la montée des eaux. Les polders en sont un parfait exemple. Avec de grandes étendues artificielles gagnées sur l'eau par le biais de grandes digues, ils sont par conséquent sous le niveau de la mer. Etant donc très limité au point de vue du développement horizontal, l'approche du développement vertical reste alors la seule solution. Cela fait référence aux villes, qui de nos jours, ne peuvent plus s'étendre de manière infinie à l'horizontale. Elles cherchent des solutions pour résoudre les problèmes démographiques par la verticalité.

Nommé « La Hollande crée l'espace », le pavillon s'articule autour de quatre thèmes : créer de l'espace pour un nouvel environnement, un nouveau territoire, une nouvelle nature et de nouvelles solutions. MVRDV a conçu ce pavillon afin de souligner les différents paysages présents au Pays-Bas. Pays qui souhaite toujours se présenter comme une société qui, sur une faible superficie, recherche constamment l'équilibre entre environnement et économie, individu et société, liberté et organisation stricte, etc. Composé comme un empilement de paysages, le pavillon se compose de différentes tranches avec des hauteurs et des natures différentes.

En 1999, l'agence MVRDV publia un ouvrage nommé *MetaCity DataTown* qui s'intéressait déjà au questionnement du paysage au Pays-Bas. L'objectif était de réaliser différents types de simulations autour de l'espace vertical urbanisé sur un sol artificiel. On peut trouver dans cet ouvrage certains thèmes qui apparaissent dans le pavillon de la Hollande. Considéré comme un prototype, cette superposition de paysages met en valeur les différentes situations paysagères du pays.

11.1.2 « Les Pays-Bas empilent les paysages »

Initiateur du concept du copier/coller, l'agence MVRDV va empiler pas moins de six paysages distincts se référant tous à des paysages présents au Pays-Bas. Au premier étage on y trouve un « paysage de dunes » réalisé en béton qui mène ensuite au second étage, le « paysage de serres » dans lequel la production agricole est mise en avant, notamment avec les cultures de tulipes. Au troisième étage, le « paysage de pots » abritant les racines des arbres situés à l'étage supérieur et qui fait référence à la culture artificielle et hors sol. Le quatrième étage est le plus important à nos yeux, il fait référence au « paysage forestier » qui recouvre près de 10% des Pays-Bas. Il est composé de 14 arbres qui font la structure ainsi que d'environ 35 chênes vivants. Sa mise en place au milieu du bâtiment renforce ce système de « paysages empilés » par sa position assez particulière car il est commun de retrouver des arbres sur la toiture mais pas dans un bâtiment.

Au sixième étage, à 40 mètres du sol, le « paysage de la pluie » se caractérise par un grand lac et une cascade. Il a pour but de montrer qu'une majeure partie des Pays-Bas se situe sous le niveau de la mer et que la verticalité peut faire face au problème de montée des eaux. On retrouve également le « paysage des polders » avec des grandes éoliennes sur le toit. Celles-ci avaient pour but de produire l'électricité pour le bâtiment et donc d'avoir un apport en énergie de manière écologique.

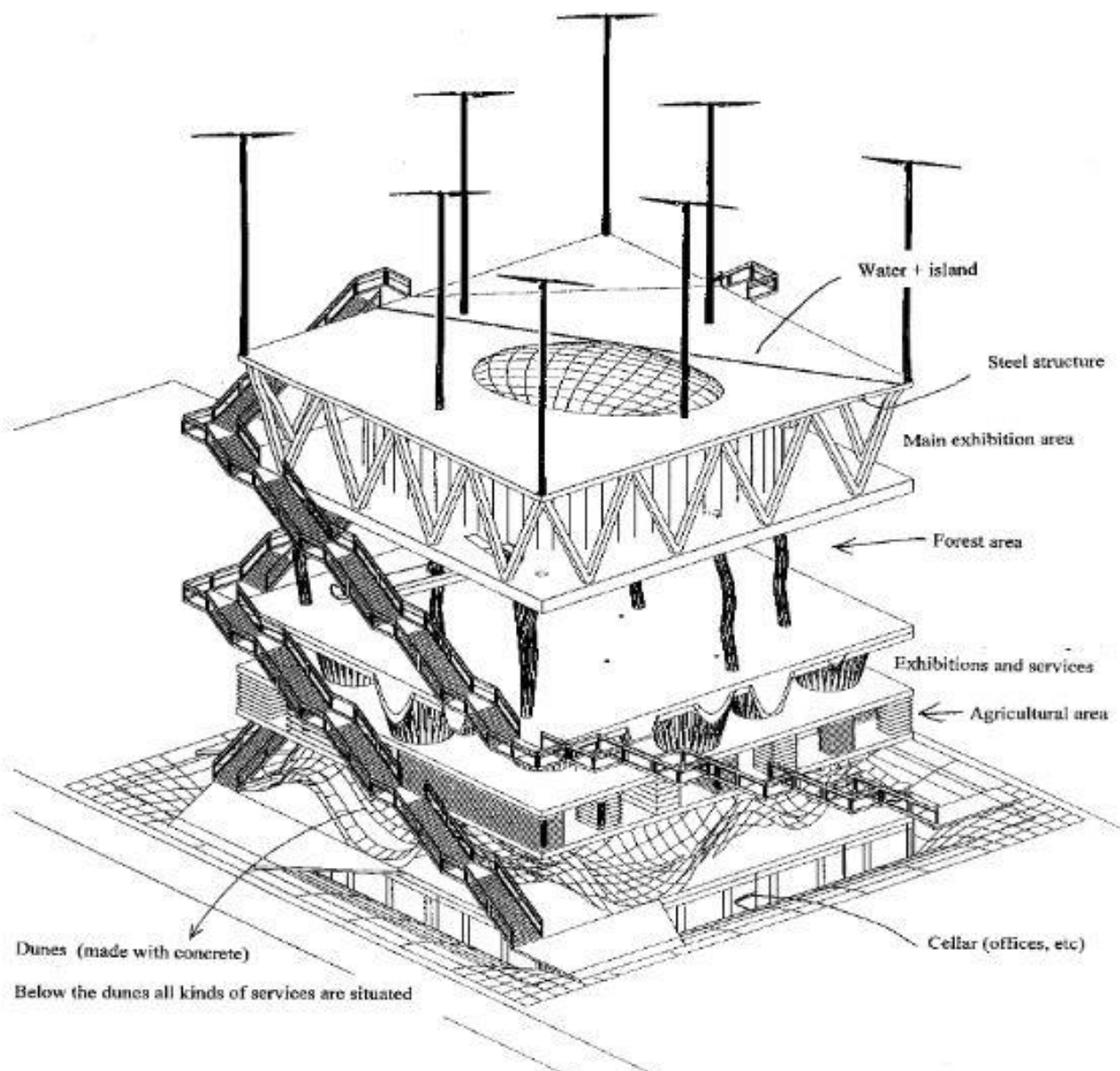


Figure 38: Axonométrie du pavillon d'Hanovre.

Source : (<https://docplayer.net/22210044-The-dutch-pavilion-at-the-expo-2000-in-hannover.html>)

11.2 Vision écologique

Ayant pour but de limiter au maximum les dépenses en surface, en matière et en énergie, près de la moitié des pavillons étaient affectés à être démontés au terme de l'exposition. Seul 26 des 62 pavillons existants étaient destinés à rester de manière permanente sur le site via une nouvelle activité. Chaque pays avait le choix du type de parcelle, à savoir : une temporaire où chaque pays était dans l'obligation de tout démonter et de ne laisser aucune trace du pavillon ; ou un pavillon qui allait compléter de manière durable le site d'Expo 2000. L'agence MVRDV a décidé de créer un pavillon qui allait rester sur le site de manière continue et accueillir de nouvelles activités pour lui donner une seconde vie.

Ce bâtiment est un franc succès durant l'Expo 2000 par ses nombreuses thématiques abordées ; l'écologie, la densité de population, la relation entre le naturel et l'artificiel,.. Il permet également d'économiser de l'énergie, de l'espace, de l'eau et du temps. Ce mini écosystème a également essayé d'apporter des solutions face au manque de terrain et de lumière qui se fait ressentir à travers le pays.

11.2.1 Après l'exposition

Si l'on observe de plus près les matériaux utilisés, sa méthode d'assemblage ainsi que son état actuel en 2020, la vision écologique que le pavillon voulait diffuser est à remettre en question. S'il n'était pas destiné à être démonté, il devait tout de même servir par la suite. Les principaux éléments utilisés sont le métal, le béton et le bois brut qui sont empilés indistinctement les uns au dessus des autres afin de créer cette superposition de paysages. Pour une meilleure flexibilité du bâtiment en cas de réutilisation, une différenciation des matériaux par tranche d'étage aurait pu permettre une meilleure récupération des ceux-ci. De surcroît, ces séries de plateaux, composés de béton, ne sont pas en concordance avec la thématique d'économie d'énergie ainsi que d'écologie.

Si aujourd'hui il est laissé à l'abandon, cela vient certainement du fait qu'il n'a pas été pensé à changer d'usage. En effet, chaque étage était construit de manière singulière (collines, troncs d'arbres, pots,...) et impliquait un manque de flexibilité pour quant à accueillir de nouveaux programmes au sein du pavillon. Son assemblage ainsi que la méthode d'utilisation des matériaux sont assez similaires à un bâtiment classique qui a pour but une certaine durabilité.



Figure 39: Photographie du pavillon d'Hanovre à l'abandon.

Source : (<https://afasiaarchzine.com/2015/05/mvrdv/>)

11.2.2 Pavillon Suisse

A l'opposé de ce manque de réflexion quant à sa réutilisation après l'Expo 2000, analysons le pavillon Suisse de Peter Zumthor. Conçu pour être démontable à la fin de l'exposition, il a été construit uniquement avec des poutres de même dimension qui permettaient de délimiter les espaces par le biais de grandes parois. Aucune vis, clou, trou, colle, agrafe n'ont été utilisés pour assembler le pavillon, seuls des sangles et des ressorts permettent de maintenir la structure. Alors intactes durant le montage ainsi que durant l'exposition, toutes les poutres ont pu être démontées et vendues pour la construction d'autres projets.

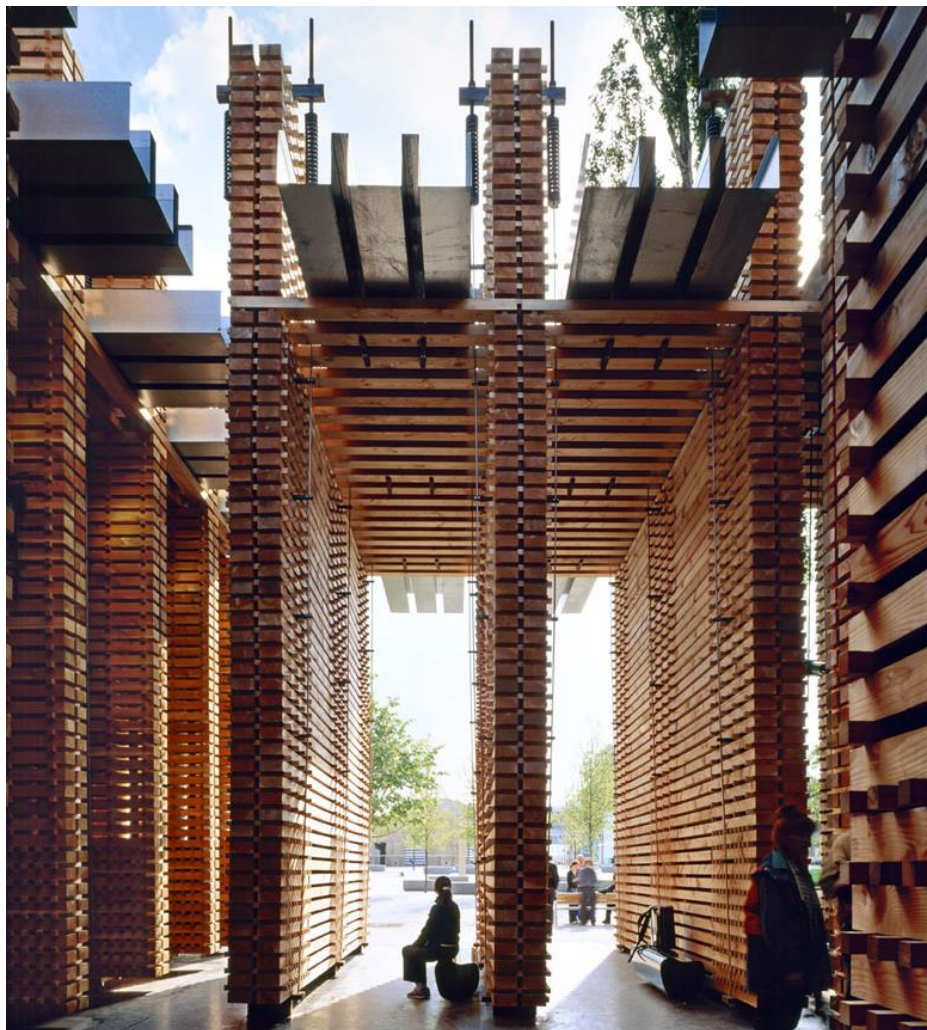


Figure 40: Photographie du pavillon Suisse, conçu par Peter Zumthor.

Source : (<https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/pavillon-swiss-sound/#>)

Bien qu'il ait été imaginé dès ses débuts comme étant démontable à la fin de l'exposition, au contraire du pavillon des Pays-Bas, le pavillon Suisse mérite d'être salué pour son intelligence de mise en œuvre des matériaux. En effet, dans les deux cas, une seconde vie était envisagée, que ce soit au niveau des éléments constructifs ou du bâtiment. C'est dans ce cadre de réutilisation que le pavillon des Pays-Bas aurait dû être pensé. Fort de ses valeurs transmises durant l'exposition, il est malheureusement laissé à l'abandon.

11.3 Conclusion

Même si le Bosco Verticale et le pavillon des Pays-Bas ont été construits dans un contexte différent ainsi que pour des fonctions différentes, cette mise en relation permet de mettre en évidence plusieurs points similaires ; la verticalité, le mélange entre la technologie et la nature, un écosystème unique, des valeurs véhiculées,...

C'est dans l'optique de repenser l'espace que le pavillon des Pays-Bas a été conçu. Il a pour but d'imaginer le milieu urbain dans un futur assez proche. Étant donné qu'une partie du territoire se trouve sous le niveau de la mer, les moyens d'actions, pour éviter l'étalement horizontal, sont faibles. Le pavillon de MVRDV repense donc l'espace et propose d'en trouver non plus sur la mer, comme cela a déjà été fait, mais plutôt verticalement. Le Bosco Verticale, dans la même thématique, propose de lutter contre l'étalement urbain et contre l'augmentation croissante de la population mondiale, de manière verticale. Ayant également pour objectif de faire face aux effets d'îlots de chaleur urbains et au manque d'espaces verts en ville, Stefano Boeri vient ancrer de la végétation sur l'ensemble de ses tours.

C'est dans cette forêt verticale qu'un écosystème unique et fragile a été créé. Un écosystème que l'on peut également retrouver dans le pavillon des Pays-Bas par le biais d'une superposition de paysages ainsi que par l'intégration de végétation au sein même du bâtiment. Ces arbres structurent l'édifice, ils créent l'espace interne. Dans les deux cas, la végétation fait partie intégrante du projet, ils ont été spécifiquement conçus pour accueillir ces arbres, qui font leur caractéristique.

Alors que les problématiques renvoyées par les bâtiments sont claires et justifiées, les solutions proposées pour y remédier restent mitigées. En effet, après analyse des deux bâtiments, qui peuvent être considérés comme des laboratoires, ils n'apportent pas « la solution » pour faire face à tous ces problèmes. Bien que le pavillon ait inspiré initialement beaucoup de projets et sensibilisé la population aux enjeux actuels, il a été laissé à l'abandon. Ce n'est par contre pas le cas du Bosco Verticale qui paraît toujours, aux yeux de beaucoup de personnes, comme la solution idéale. Bien que l'on puisse démontrer que son bilan écologique soit déficitaire, tout comme son impact social.

12 DÉSILLUSION

Les villes d'aujourd'hui sont plus que jamais concernées par de nombreux enjeux ; pollution de l'air, îlots de chaleur urbains, étalement urbain, manque d'espaces verts, surpopulation, gestion des coûts, etc. Ainsi, elles se trouvent dans une période charnière où elles doivent être en mesure de présenter des projets qui sont capables de concilier les problèmes environnementaux et démographiques. C'est ce qu'a proposé Stefano Boeri avec la première forêt verticale : le Bosco Verticale.

Lors de ce travail, j'ai pu envisager différentes approches de cette thématique. Elles m'ont permis de faire évoluer le mécanisme de pensée et d'aborder de manière différente les prochains projets. En effet, en tant que futur architecte, il est de mon devoir d'apporter un jugement critique le plus précis possible.

Premièrement, cette étude m'a éclairé quant au manque de conscience des problèmes environnementaux. Alors que j'observais la majorité des futurs projets se composer de végétation, j'ai compris qu'une présence végétale ne signifiait pas forcément « écologie urbaine ». Toute cette verdurisation est devenue un effet de mode et un élément de marketing pour paraître comme un dessein écologique qui prend en compte la nature. Il faut donc éviter de se laisser influencer par ces tendances de « poudre aux yeux », se forger un jugement personnel et réaliser des recherches quant à la manière d'intégrer la végétation.

La mise en œuvre est également un élément important à prendre en compte. Par rapport à un édifice traditionnel, un bâtiment accueillant de la végétation telle qu'une forêt verticale se doit d'adopter des mesures spécifiques d'un point de vue structurel. En effet, les structures ont souvent besoin d'être renforcées à l'aide de béton et d'armatures car les arbres sont propices à la prise au vent, sans oublier d'ajouter leur propre poids ainsi que celui des bacs de terre. Le problème est que ces deux matériaux demandent énormément d'énergie et rejettent par conséquent beaucoup de CO₂ dans l'atmosphère. Se vanter que son bâtiment absorbe et dépollue les villes grâce à des arbres placés en hauteur est un raccourci un peu simpliste.

Grâce à un rapide calcul on peut déterminer grossièrement les émissions de CO₂ émises pour la réalisation du bâtiment et déterminer son aspect écologique. Dans ce cas-ci, je me suis limité au calcul des balcons qui sont destinés à supporter les arbres et les plantes. Compte tenu que cela nécessite déjà plus de 45 ans pour rentabiliser ces balcons, il est incompréhensible de qualifier le Bosco Verticale comme étant un bâtiment écologique.

N'oublions pas non plus négliger l'aspect social et culturel qui se cache derrière la végétation. Son importance au sein de la ville et des communautés n'est plus à démontrer. Elle ne se limite pas à être un simple espace vert de décoration mais un lieu de partage, de savoir et de culture entre l'ensemble des habitants. Arroser une plante a bien plus d'importance que l'on pourrait le croire. En effet, comment sensibiliser et enseigner les bonnes pratiques liées à l'écologie urbaine si la nature est contrôlée et que toute tentative de jardinage est proscrite ?

J'ai finalement appris que pour se forger un jugement personnel et critique, il faut chercher des informations dans différents domaines et non se limiter à un seul axe de recherche. Se renseigner auprès de personnes issues de domaines variés permet d'obtenir des points de vue nuancés et donc de développer différentes ouvertures sur le sujet. Que cela soit environnemental, architectural, social, économique, etc. Tous doivent être en harmonie avec les enjeux actuels en milieu urbain.

En réponse à la question : « Les forêts verticales sont-elles capables d'apporter une réponse aux problèmes en milieu urbain ? »

A ce jour, je dirais non ! Bien qu'elles puissent apporter des bienfaits aux habitants de l'immeuble, elles ne peuvent pas répondre à l'ensemble des problèmes présents en milieu urbain. Les avantages fournis par le Bosco Verticale auraient pu être bien plus bénéfiques si les mêmes moyens avaient été déployés dans des espaces verts traditionnels encore disponibles. Ce bâtiment est l'exemple type d'une nouvelle société qui cherche à s'enrichir en surfant sur le mouvement écologique actuel. La forêt verticale ne sauvera malheureusement pas nos villes. D'autres solutions plus performantes écologiquement et économiquement sont à exploiter avant de se lancer dans pareilles élucubrations.

Cependant, le Bosco Verticale comme le pavillon d'Hanovre, ont le mérite d'aborder les questions des enjeux environnementaux, sociétaux et architecturaux. Même s'ils ne sont pas l'exemple à suivre dans le futur, pour nous jeunes architectes, ils doivent être utilisés dans l'objectif de conscientiser la population à tous ces enjeux actuels.

13 BIBLIOGRAPHIE

Articles et ouvrages consultés

- Bass, B., Liu, K. K. Y., & Baskaran, B. A. (2003). *Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas* (p. 110 p.). National Research Council of Canada. <https://doi.org/10.4224/20386110>
- Earon, O. (2011, novembre 4). *From green architecture to architectural green : Facade versus space*. GreenAge, Istanbul, Turquie.
<https://adk.elsevierpure.com/en/publications/from-green-architecture-to-architectural-green-facade-versus-spac>
- Köhler, M. (2008). Green facades—A view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11, 423-436. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0063-x>
- Kucherovala, A., & Narvaez, H. (2018). Urban Forest Revolution. *E3S Web of Conferences*, 33, 01013. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183301013>
- Potienko, N., Kuznetsova, A., Solyakova, D., & Klyueva, Y. (2018). The Global Experience of Deployment of Energy-Efficient Technologies in High-Rise Construction. *E3S Web of Conferences*, 33, 01017. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183301017>
- Schrenk, L., & Jensen, M. (2014). Dystopia in the world of utopia : Unsustainable realities of sustainably themed expositions. *ARCC Conference Repository*.
<https://doi.org/10.17831/rep:arcc%y309>
- Velazquez, L. S. (2005). Organic greenroof architecture : Sustainable design for the new millennium. *Environmental Quality Management*, 14(4), 73-85.
<https://doi.org/10.1002/tgem.20059>
- Weber, N. (2000, février 16). *NEWFOR - new forests for Europe : Afforestation at the turn of the century*. Proceedings of the scientific symposium, Freiburg, Germany.

Livres consultés

- Boeri, S. Brunello, M., Gatti, L., & Gocatek, J. (2015). *Un bosco verticale* (Guido Musante et Azzurra Muzzonigro). Corraini edizioni.
- Callebaut, V., & Andrieu-Millagou, C. (2015). *Paris 2050* (French Edition). Michel Lafon.
- Giacomello, E., Valagussa, M., & Council on Tall Buildings and Urban Habitat. (2015). *Vertical Greenery*. Council on Tall Buildings.
- Restany, P. (1978). *Hundertwasser*. Chêne.
- Yudina, A. (2017). *Garden City : Supergreen Buildings, Urban Skyscapes and the New Planted Space* (1^{re} éd.). Thames & Hudson.

Mémoires consultés

- Ann Marugg, C. (2018). *Vertical Forest : The Impact of Green Balconies on the Microclimate by Solar Shading, Evapotranspiration and Wind Flow Change* [Mémoire de maîtrise, Université de Delft, Pays-Bas].
- Bernier, A. (2011). *Végétalisation du bâtiment en milieu urbain : bénéfices et perspectives* [Mémoire de maîtrise, Université du Québec, Canada].
- Bongartz, J. (2019). *Construction durable au 21ème siècle, mythe ou réalité ? Approche critique : transition, low tech, résilience* [Mémoire de maîtrise, Université de Liège, Belgique].
- Cepisul, L. (2013). *Cycle d'usage des bâtiments* [Mémoire de maîtrise, Université de Marne-la-Vallée, France].
- Kempeneers, G. (2019). *Comment la végétation peut-elle contribuer à un bienfait atmosphérique en milieu urbain ?* [Mémoire de maîtrise, Université de Liège, Belgique].
- Shen, S. (2012). *The Environmental Impact of Expositions : A Study of Some Contributing Factors* [Thèse de doctorat, Université de Wellington, Nouvelle-Zélande].

Sites internet consultés

- Agence Européenne de l'Environnement. (2019, 25 juin). *CO2 emissions from passenger transport*. Consulté le 25 juillet 2020, à l'adresse <https://www.eea.europa.eu/media/infographics/co2-emissions-from-passenger-transport/view>
- Agence Wallonne de l'Air et du Climat. (s. d.). *inventaires d'émissions*. Consulté le 9 avril 2020, à l'adresse <http://www.awac.be/index.php/inventaires-d-emissions>
- Architecture player. (s. d.). *Creating (virtual) space*. Consulté le 15 juillet 2020, à l'adresse <https://www.architectureplayer.com/clips/expo-2000>
- Bellomo, F. (2019, novembre 18). *Le foreste sono orizzontali. L'editoriale di Fabrizio Bellomo*. Consulté le 2 mai 2020, à l'adresse <https://www.artribune.com/artivisive/2019/11/boeri-bosco-verticale-tirana-editoriale-fabrizio-bellomo/>
- Blanc, P. (2018, 9 octobre). *Le Nouvel, Kuala Lumpur*. Consulté le 11 juillet 2020, à l'adresse <https://www.murvegetalpatrickblanc.com/realisations/kuala-lumpur/le-nouvel-kuala-lumpur>
- Chahi, C. (2009, 27 janvier). *Patrick blanc, l'artiste du mur végétal*. Consulté le 11 juillet 2020, à l'adresse <https://www.batiactu.com/edito/patrick-blanc-artiste-mur-vegetal-22185.php>
- De Chant, T. (2013, mars 21). *Can We Please Stop Drawing Trees on Top of Skyscrapers?* Consulté le 01 mai 2020, à l'adresse <https://www.archdaily.com/346374/can-we-please-stop-drawing-trees-on-top-of-skyscrapers>
- Ecological Footprint Explorer. (s. d.). *Ecological Footprint Explorer*. Consulté le 10 avril 2020, à l'adresse <http://data.footprintnetwork.org/#/>
- Environnement.brussels. (s. d.). *Focus : Ilôts de chaleur*. Bruxelles Environnement. Consulté le 9 avril 2020, à l'adresse <https://environnement.brussels/lenvironnement-etat-des-lieux/rapports-sur-letat-de-lenvironnement/rapport-2011-2014/climat/focus-0>
- Furuto, A. (2017, 14 septembre). *"Le Cinq" Office Tower/ Neutelings Riedijk Architects*. ArchDaily. Consulté le 02 juillet 2020, à l'adresse <https://www.archdaily.com/254888/le-cinq-office-tower-neutelings-riedijk-architects>

- GIEC. (s. d.). *Les rapports du GIEC*. Consulté le 09 avril 2020, à l'adresse <https://www.climat.be/fr-be/changements-climatiques/les-rapports-du-giec>
- Harrouk, C. (2020, 30 juin). *Stefano Boeri Wins International Competition to Design Largest Rehabilitation Center in Shenzhen, China*. ArchDaily. Consulté le 11 juillet 2020, à l'adresse <https://www.archdaily.com/942690/stefano-boeri-wins-international-competition-to-design-largest-rehabilitation-center-in-shenzhen-china>
- La Repubblica. (2017, 23 novembre). *Botta : « Viva la città moderna ma Milano non è Abu Dhabi »*. Consulté le 09 avril 2020, à l'adresse <https://milano.repubblica.it/dettaglio/botta:-viva-la-citta-moderna-ma-milano-non-e-abu-dhabi/1392947>
- LEED. (s. d.). *LEED rating system / U.S. Green Building Council*. Consulté le 18 avril 2020, à l'adresse <https://www.usgbc.org/leed>
- Levin, A. (2013, juin 25). *Putting Trees on Skyscrapers: An Interview with Lloyd Alter*. Consulté le 06 mai 2020, à l'adresse <https://www.archdaily.com/393347/putting-trees-on-skyscrapers-an-interview-with-lloyd-alter>
- Marion, F. (2019, août 25). *Emission de gaz à effet de serre : laisse béton !* Consulté le 10 avril 2020, à l'adresse <https://up-magazine.info/index.php/technologies-a-la-pointe/technologies/8670-emission-de-gaz-a-effet-de-serre-laisse-beton/>
- MVRDV. (2020, 5 août). *MVRDV*. Consulté 15 juillet 2020, à l'adresse <https://afasiaarchzine.com/2015/05/mvrdv/>
- MVRDV. (s. d.). *MVRDV - Expo 2000*. Consulté 15 juillet 2020, à l'adresse <https://www.mvrdv.nl/projects/158/expo-2000>
- Nations Unies. (2018, mai 16). *2,5 milliards de personnes de plus habiteront dans les villes d'ici 2050*. Consulté le 09 avril 2020, à l'adresse <https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/2018-world-urbanization-prospects.html>
- Rédaction, L. (2020, avril 21). *Combien y-a-t-il de voitures dans le monde? Transitions & Energies*. Consulté 28 juillet 2020, à l'adresse <https://www.transitionsenergies.com/combien-voitures-monde/>
- Rosenfield, K. (2017, 14 septembre). *MVRDV proposes 400 meter tall « vertical city » in Jakarta*. Consulté 15 juillet 2020, à l'adresse

<https://www.archdaily.com/295962/mvrdv-proposes-400-meter-tall-vertical-city-in-jakarta>

Simoens, C. (2012, février 1). *La croissance démographique: comment la gérer ?* Consulté le 09 avril 2020, à l'adresse <https://www.glo-be.be/fr/articles/la-croissance-demographique-comment-la-gerer>

Smith, E. (2019, juillet 3). *NASA's Ecostress Maps European Heat Wave From Space*. Consulté le 09 avril 2020, à l'adresse , <https://www.nasa.gov/feature/jpl/nasas-ecostress-maps-european-heat-wave-from-space>

Statista. (2020, 16 avril). *Number of parking spaces of the local public transportation*. <https://www.statista.com/statistics/697267/atm-parking-lots-in-italy-by-type/>

WikiArquitectura. (2017, 21 février). *Pavillon Swiss Sound - Données, Photos et Plans*. Consulté 15 juillet 2020, à l'adresse <https://fr.wikiarquitectura.com/b%C3%A2timent/pavillon-swiss-sound/#>

Wikiarquitectura. (2018, 11 avril). *Holland Pavilion for expo 2000*. Consulté le 18 juillet 2020, à l'adresse <https://en.wikiarquitectura.com/building/holland-pavilion-for-expo-2000/>

World Health Organization: WHO. (2018, mai 2). *Neuf personnes sur 10 respirent un air pollué dans le monde*. Consulté le 09 avril 2020, à l'adresse <https://www.who.int/fr/news-room/detail/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

Communiqué de presse

GIEC. (2018, octobre 8). *Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C* [Communiqué de presse]. Consulté 08 avril 2019, à l'adresse https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_fr.pdf

Vidéos consultées

Arte. *Habiter sur terre* [vidéo en ligne]. Dailymotion, 05 mars 2019 [vue le 09 avril 2020]. <https://www.dailymotion.com/video/x73jbb3>

Maison & Objet. *Patrick Blanc, le principe de la nature dans l'habitat* [vidéo en ligne].

Vimeo, 10 septembre 2018 [vue le 05 mai 2020].

<https://www.dailymotion.com/video/x73jbb3>

MVRDV. *Metacity Datatown* [vidéo en ligne]. Youtube, 1999 [vue le 15 avril 2020].

<https://www.youtube.com/watch?v=JiMJpfsavME>

The Architecture Player. *Expo 2000* [vidéo en ligne]. Vimeo, 08 novembre 2018 [vue le

02 juillet 2020]. <https://www.youtube.com/watch?v=JiMJpfsavME>

14 ANNEXES

Annexe 1 : Informations générales du Bosco Verticale.

VERTICAL FOREST IN FIGURES ✱	
1.7	Kms (approx.) of overall linear development of plant pots
2	hectares of forest (the equivalent of two soccer fields)
3	levels of protection provided by the anchor systems
4 - 6	annual pruning operations scheduled
6 - 13	kN/m ³ , soil density: dry (min)/saturated (max)
9	m (approx.) maximum tree height
10	m (approx.) maximum internal span of the structure
33	species of evergreen plants
50 - 110	cm, depth of plant pots
59	species of plants useful for birds
60	species of trees and shrubs
60 - 500	m ² , range of surface areas of the apartments
62	species of plants attractive to butterflies
65	species of plants adapted and suitable for insect populations
66	species of plants useful for pollinator insects
78	m (18 floors) the height of the Confalonieri tower
100	cm, the thickness of the soil substrate

131 apartments

190 km/h, wind speed in the plant test in the wind tunnel

300 kg, design weight of the largest tree (6 m), without turf/soil at the moment of planting

325 cm total balcony depth

480 human beings

600 kg, design weight of the largest tree (6 m), without turf/soil during its lifespan

711 trees

820 kg, weight of the largest tree including turf/soil at the moment of planting

1,600 birds and insects (approx.)

5,000 shrubs (approx.)

8,900 m², the approximate overall balcony surface area

15,000 perennials and drooping plants (approx.)

19,825 kg/year of CO₂ absorption (estimated quantity)

20,000 plants of different kinds (approx.)

40,000 m², built surface area (approx.)

100,000 m², expansion area of single-family homes (equivalence in terms of urban density)

* the data refer to the Vertical Forest built in Milan Porta Nuova and the year 2014

Annexe 2 : Coût de reforestation en Europe.

36 NEWFOR – New Forests for Europe: Afforestation at the Turn of the Century

Appendix 1. Update of the first results

Information forwarded by the Member States under Regulation 1054/94 on progress in implementing the programmes

Cumulative situation at 30.4.1999

PRIVATE AFFORESTATION	Aid for afforestation <i>(applications definitively approved - after completion of work)</i>	Number of recipients	131 966
		Area	ha 899 857
		Total cost eligible for Community part-financing	M€ 1 443
		Average cost - per hectare - per recipient	€ 1 554 € 10 936
	Premium for maintenance of woodland	Number of recipients	79 272
		Area	ha 662 437
		Total cost eligible for Community part-financing	M € 551
		Average cost - per hectare - per recipient	€ 832 € 6 951
	Compensation for loss of income	Number of recipients	99 486
		Area	ha 762 023
		of which: - farmers - other recipients	ha 544 297 ha 217 726
		Total cost eligible for Community part-financing	M € 2 054
		Total cost eligible per recipient	€ 20 650
	AID FOR INVESTMENTS FOR THE IMPROVEMENT OF WOODLANDS <i>(applications definitively approved)</i>	Number of recipients	41 828
		Total cost eligible for Community part-financing	M € 190
		Total cost eligible per recipient	€ 4 538
Total cost eligible for Community part-financing			M € 4 238

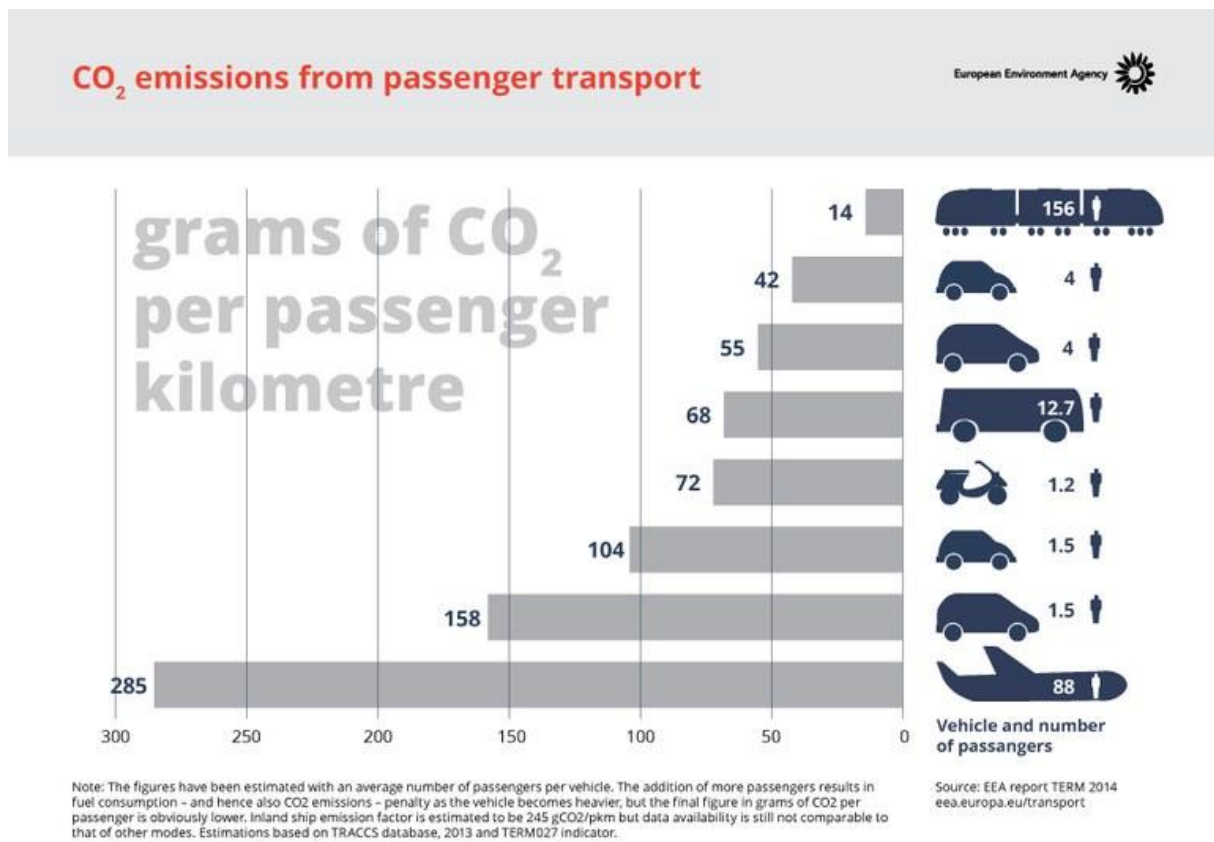
Annexe 3: Tableau KBOB.

KBOB / eco-bau / IPB 2009/1:2016

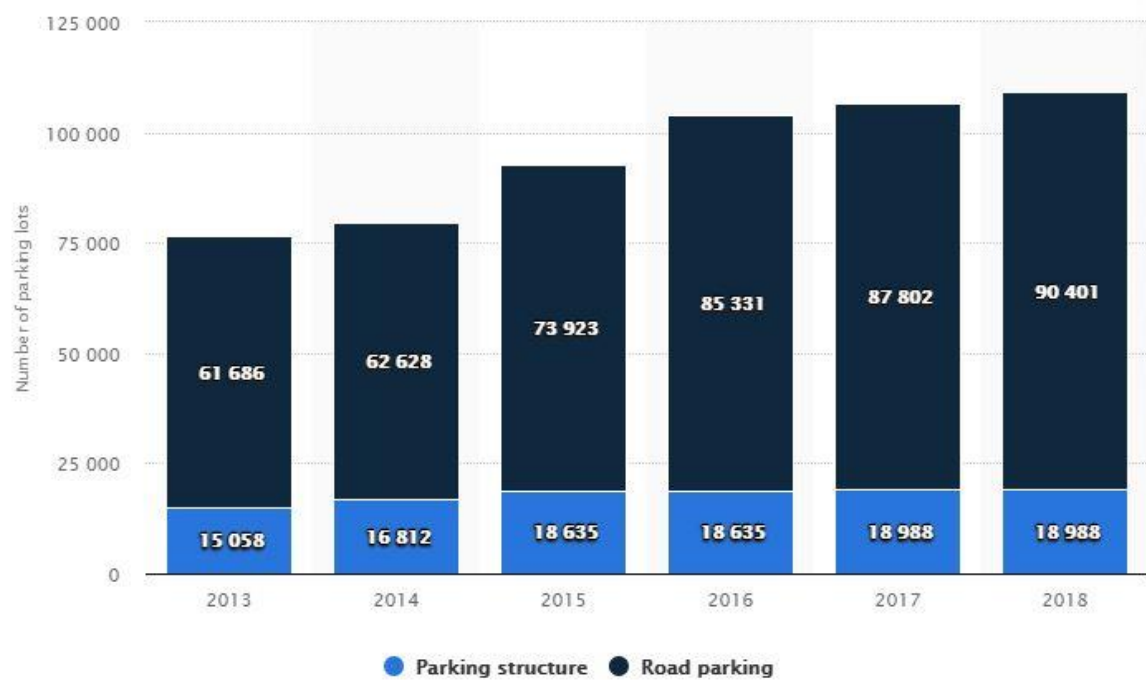
Donnees écobilans dans la construction

Rohdichte/ Flächen- masse Masse volumique/ surface	Bezug Reference	UBP*13		Primärenergie Energie primaire				Treibhaus- gasemissionen Emissions de gaz à effet de serre				MATÉRIAUX [Bibliographie treeze, version 2.2.2016] Remarque: Affichage des données spécifiques aux fabricants et aux régions de production en cliquant sur les "+, -" sur le bord gauche. Travaux de préparation			
		UBP		renouvelable		non renouvelable (Graue Energie)		Emissions de gaz							
		Total Total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total Total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination	Total Total	Herstellung Fabrication	Entsorgung Elimination					
		UBP	UBP	UBP	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kWh oil-eq	kg CO ₂ -eq	kg CO ₂ -eq	kg CO ₂ -eq				
-	-	m ²	1,010,000	877 000	130 000	110	101	9,57	2,280	2,020	258	828	778	50,2	Blindage de fouille, paroi parisienne, étayé
-	-	m ²	952,000	822 000	130 000	94,3	84,8	9,57	2,090	1,830	258	788	738	50,2	Blindage de fouille, paroi parisienne, flottant
-	-	m ²	778,000	692 000	86 200	82,8	76,4	6,32	1,510	1,340	170	512	478	33,1	Blindage de fouille, paroi parisienne, fixe
-	-	m ²	171,000	152 000	18 900	17,9	16,6	1,39	324	286	37,5	116	109	7,28	Blindage de fouille, paroi clouée
-	-	m ²	332,000	302 000	30 100	108	106	2,20	934	874	59,5	266	254	11,6	Blindage de fouille, paroi berlinoise, en porte-à-faux
-	-	m ²	240,000	222 000	17 800	46,7	45,4	1,31	677	642	35,2	184	177	6,84	Blindage de fouille, paroi berlinoise, étayé
-	-	m ²	259,000	238 000	20 800	43,9	42,4	1,51	681	640	40,7	192	184	7,90	Blindage de fouille, paroi berlinoise, fixe
-	-	m ²	648,000	583 000	65 500	73,3	68,6	4,76	1,250	1,120	130	407	382	25,2	Blindage de fouille, paroi moulée, 400 mm
-	-	m ²	1,230,000	1,100 000	129 000	136	126	9,43	2,270	2,010	256	777	728	49,6	Blindage de fouille, paroi de palplanche, en porte-à-faux
-	-	m ²	228,000	228 000	0	46,2	46,2	0	747	747	0	163	163	0	Blindage de fouille, paroi de palplanche, étayé
-	-	m ²	129,000	129 000	0	25,3	25,3	0	421	421	0	92,3	92,3	0	Blindage de fouille, paroi de palplanche, étayé
-	-	m ²	255,000	255 000	0	55,3	55,3	0	813	813	0	181	181	0	Blindage de fouille, paroi de palplanche, fixe
-	-	m	48,600	48 600	0	7,74	7,74	0	116	116	0	30,6	30,6	0	Fondations profondes, micropieu
-	-	m	229,000	229 000	0	22,4	22,4	0	404	404	0	159	159	0	Fondations profondes, pieu coulé sur site, 700 mm
-	-	m	331,000	331 000	0	35,0	35,0	0	566	566	0	239	239	0	Fondations profondes, pieu coulé sur site, 900 mm
-	-	m	506,000	506 000	0	55,6	55,6	0	851	851	0	372	372	0	Fondations profondes, pieu coulé sur site, 1200 mm
-	-	m	122,000	122 000	0	9,87	9,87	0	226	226	0	72,2	72,2	0	Fondations profondes, pieux forés vissés, 560/480 mm
-	-	m	152,000	152 000	0	13,2	13,2	0	273	273	0	91,3	91,3	0	Fondations profondes, pieux forés vissés, 660/580 mm
-	-	m	29,900	29 900	0	1,10	1,10	0	30,9	30,9	0	6,45	6,45	0	Fondations profondes, colonnes ballastées
-	-	m	38,800	38 800	0	4,22	4,22	0	66,1	66,1	0	28,6	28,6	0	Fondations profondes, pieu en béton préfabriqué
-	-	m ³	14,4	14,4	0	0,020	0,020	0	0,101	0,101	0	0,004	0,004	0	Epaissement des eaux, hauteur de roulement, 2,5 m
-	-	m ³	16,8	16,8	0	0,023	0,023	0	0,119	0,119	0	0,005	0,005	0	Epaissement des eaux, hauteur de roulement, 5 m
-	-	m ³	19,6	19,6	0	0,027	0,027	0	0,138	0,138	0	0,006	0,006	0	Epaissement des eaux, hauteur de roulement, 7,5 m
-	-	m ³	22,5	22,5	0	0,031	0,031	0	0,159	0,159	0	0,007	0,007	0	Epaissement des eaux, hauteur de roulement, 10 m
kg/m ³															Béton
2.150	kg	65,1	40,2	24,9	0,009	0,007	0,002	0,139	0,092	0,047	0,059	0,050	0,009	0,009	Béton maigre (sans armature)
2.300	kg	94,3	67,3	27,0	0,013	0,012	0,002	0,201	0,148	0,054	0,099	0,089	0,010	0,010	Béton pour bâtiment (sans armature)
2.350	kg	99,9	72,9	27,0	0,014	0,013	0,002	0,217	0,164	0,053	0,107	0,096	0,010	0,010	Béton pour travaux de génie civil (sans armature)
2.325	kg	106	79,0	26,9	0,016	0,014	0,002	0,228	0,175	0,053	0,117	0,107	0,010	0,010	Béton pour pieux (sans armature)
2.770	kg	477	454	23,8	0,057	0,056	0,002	0,768	0,721	0,047	0,265	0,255	0,009	0,009	Élément préfabriqué en béton, béton à hautes performances, sortie d'usine
2.500	kg	245	218	26,1	0,096	0,094	0,002	0,484	0,432	0,052	0,172	0,162	0,010	0,010	Élément préfabriqué en béton, béton normal, sortie d'usine
600	kg	371	370	0,743	0,882	0,882	0,000	0,984	0,982	0,003	0,288	0,288	0,000	0,000	Béton chaux-chanvre
kg/m ³															Produits en métal
2.690	kg	7.300	7.300	0	5,29	5,29	0	26,7	26,7	0	5,62	5,62	0	0	Tôle d'aluminium, nue
2.690	kg	6.980	6.980	0	5,30	5,30	0	27,3	27,3	0	5,71	5,71	0	0	Profil d'aluminium, nu
7.850	kg	2.860	2.860	0	0,211	0,211	0	3,55	3,55	0	0,682	0,682	0	0	Acier d'armature
11.340	kg	6.530	6.530	0	0,236	0,236	0	4,03	4,03	0	1,04	1,04	0	0	Plomb
7.900	kg	6.890	6.890	0	2,38	2,38	0	15,3	15,3	0	3,76	3,76	0	0	Tôle d'acier nickel-chrome 18/8, nue
7.900	kg	10.700	10.700	0	2,66	2,66	0	23,0	23,0	0	5,45	5,45	0	0	Tôle d'acier nickel-chrome étamée 18/8
7.700	kg	5.250	5.250	0	0,923	0,923	0	9,53	9,53	0	2,24	2,24	0	0	Tôle d'acier chromé, nue
7.700	kg	8.990	8.990	0	1,20	1,20	0	17,2	17,2	0	3,93	3,93	0	0	Tôle d'acier chromé, étamée
8.900	kg	51.500	51.500	0	1,65	1,65	0	9,27	9,27	0	2,19	2,19	0	0	Tôle de cuivre, nue
8.300	kg	47.000	47.000	0	1,89	1,89	0	11,5	11,5	0	2,71	2,71	0	0	Tôle de laiton/bronze de construction
7.850	kg	3.570	3.570	0	0,294	0,294	0	7,75	7,75	0	1,83	1,83	0	0	Tôle d'acier nue
7.850	kg	16.100	16.100	0	1,05	1,05	0	15,7	15,7	0	3,51	3,51	0	0	Tôle d'acier, zinguée
7.850	kg	1.000	1.000	0	0,251	0,251	0	3,46	3,46	0	0,734	0,734	0	0	Profil en acier, nu
7.200	kg	35.800	35.800	0	2,59	2,59	0	17,4	17,4	0	4,04	4,04	0	0	Tôle zinc-titane

Annexe 4 : Émissions de CO₂ par transport.



Annexe 5 : Nombre de places de parking en bord de route à Milan.



© Statista 2020