

Gratte-ciel: Une conception de bâtiment durable

Travail de Maturité 2023/ 2024
Céline Taglioni, 2006
Classe G6g

Professeur tuteur: Dr. Fabienne Douls Eicher
Expert: Anna Janser

Freies Gymnasium Zürich, Octobre 2023

Table des matières

1. Préface	4
2. Introduction	5
2.1 Mon projet	5
2.2 Mes limitations	5
2.3 Procédure	6
3. Contexte	8
3.1 Qu'est-ce qu'un gratte-ciel ?	8
3.2 La structure d'un gratte-ciel	10
3.2.1 Matérialité	10
3.2.2 Design	10
3.2.3 Eléments structurels principaux	11
3.3 Importance des gratte-ciels	15
3.3.1 Population	15
3.3.2 Concurrence mondiale et globalisation	16
3.3.3 Régénération urbaine	16
3.3.4 Prix des terrains	17
3.3.5 Consommation des terres	17
3.3.6 Transports et infrastructures	18
3.3.7 Aspirations humaines, symbolisme	19
3.3.8 Technologies émergentes	19
3.4 Emplacement idéal	20
4. Enjeux écologiques	22
4.1 Problèmes causés par les gratte-ciels	22
4.1.1 Les émissions de CO ₂ et l'effet de serre	22
4.1.2 Îlots de chaleur urbains (ICU)	25
4.1.3 L'ombrage	27
4.2 Analyse hypothétique	29
4.2.1 Panneaux solaires	29
4.2.2 Conception solaire passive	30
4.2.3 Végétation	31
4.2.4 Matériaux	32
4.3 Solutions	34
4.3.1 Panneaux solaires	34
4.3.2 Conception solaire passive	35
4.3.3 Végétation	39
4.3.4 Matériaux	40

5. Projet architectural d'un gratte-ciel durable.....	41
5.1 Mon gratte- ciel.....	41
5.1.1 Inspiration	41
5.1.2 Stage.....	41
5.1.3 Sketch et dessins	42
5.1.4 Produit final.....	45
5.1.5 Coupe écologique.....	47
5.1.6 Plans de bâtiments.....	51
5.2 Ma maquette	54
5.2.1 Dimension	54
5.2.2 Matériel	57
5.2.3 Procesus	57
<i>Illustration 37 : Maquette finale.....</i>	<i>61</i>
5.2.4 Réflexion.....	62
6. Conclusion.....	63
6.1 Résumé.....	63
6.2 Conclusion de mon projet	64
6.3 Réflexion personnelle	64
7. Annexes	66
7.1 Interviews	66
7.1.1 Architecte Catia Da Silva.....	66
7.1.2 Dr. Jaqueline Pauli	67
7.1.3 Dr. Kurt Teichert.....	69
7.2 Rapport de stage.....	72
8. Remerciements.....	74
9. Bibliographie	75
10. Photos, Graphiques, Tableaux	82

1. Préface

L'architecture m'a toujours fascinée. Quand j'étais plus jeune, j'étais convaincue que toutes les maisons de mes amis et de ma famille étaient exactement comme la mienne ; mur pour mur, brique pour brique. J'étais convaincue que la taille et les constructions étaient toutes identiques, car je ne pouvais pas m'imaginer que quelqu'un puisse construire quelque chose de plus parfait que ce que j'avais moi. Je me souviens très bien du jour où je suis allée chez mon amie pour son anniversaire, et que j'ai été choquée de voir que sa maison ne ressemblait en rien à la mienne. C'était tout le contraire, ils avaient choisi des couleurs plus foncées pour aller avec le parquet et c'était une maison plutôt mince et longue, alors que la nôtre était plutôt large et courte. Tout était complètement différent, mais avait son propre charme, ce qui m'apportait une certaine joie à ma surprise. Depuis ce jour, chaque fois que je rendais visite à des amis, j'étais excitée de voir à quoi ressemblait leur maison. Je prenais de petites notes sur ce que j'adorais et sur ce que j'aimerais avoir moi-même un jour dans ma propre maison. Et jusqu'à ce jour, cette fascination pour l'architecture n'a pas diminué. Chaque fois que mes parents et moi visitons une nouvelle ville, j'essaie d'observer le plus possible l'architecture. Je me concentre principalement sur la façade du bâtiment, car elle en dit long sur sa période historique, son architecte et son esprit. J'adore particulièrement l'architecture du XVIIIe siècle. La période baroque a été bien définie par son style dramatiquement théâtral, utilisant des colonnades et des dômes. Cette passion pour l'architecture s'est beaucoup développée au fil des ans. A tel point que je l'ai fortement envisagée comme direction d'études et carrière potentielle, et en commençant par ce travail de maturité.

2. Introduction

2.1 Mon projet

Comme j'ai toujours été fascinée par l'architecture, le sujet de mon travail de maturité ne faisait aucun doute. Cet intérêt pour un art aussi unique s'est accompagné d'une admiration pour les gratte-ciels. Avec la beauté des skylines et des vues qu'ils offrent, ainsi que le sentiment de puissance et de symbolisme qu'ils procurent, ils font tous partie des villes qui, avec chaque bâtiment, sont entrées dans l'histoire. Ils sont devenus un symbole de richesse et une course entre les nations pour atteindre le plus haut sommet. En pensant à ce projet, j'ai eu l'impression que l'idée était un peu simple et qu'il fallait trouver un objectif plus intéressant que la simple conception d'un bâtiment. En allant dans l'âge, je suis de plus en plus consciente des crises auxquelles nous sommes confrontés et de leur importance. Depuis une dizaine d'années, nous sommes plus conscients que ce que nous faisons sur cette planète a un impact lourd. Nous sommes davantage tenus responsables de nos actes et nous avons compris que si nous n'agissons pas en conséquence, nous serons les seuls à blâmer le moment venu. La crise climatique et les dommages environnementaux qui en découlent sont devenus une course contre la montre. C'est pourquoi j'ai trouvé que c'était la thématique idéale à ajouter en complément à la création de mon propre gratte-ciel. Ces deux sujets très débattus et controversés, qui, mis ensemble, semblent paradoxale, constituent les visions de notre avenir. Ainsi, mon travail de maturité se penchera sur la question suivante :

Existe-t-il un moyen de rendre les gratte-ciels plus durables d'un point de vue environnemental ?

2.2 Mes limitations

Pour ce projet, je me suis limitée à en faire une idée conceptuelle, ce qui signifie que je n'ai pas pris en considération la possibilité de construire ce gratte-ciel de manière réaliste. Ce travail a pour but de montrer un concept qui rassemble plusieurs idées possibles en une seule, comme une vision de l'avenir. Les composants structurels et la problématique de la construction ont été ignorés, de même que le prix d'un tel bâtiment.

2.3 Procédure

Il s'agit ici de préciser ma procédure et le processus suivi pour rédiger ce travail, ainsi que mon organisation et mes objectifs.

- Tout d'abord, il importe de se familiariser avec le sujet de l'architecture et des gratte-ciels. Comme il s'agit d'un sujet relativement complexe et qu'il existe une variété d'approches, il est impératif de faire des recherches sur les sujets qui me donnent la meilleure explication de ce qu'est un gratte-ciel et de la façon dont ils sont créés. Il s'agirait simplement de trouver une définition du gratte-ciel, d'étudier sa structure et la manière dont il est conçu, tout en cherchant à savoir pourquoi les gens leur accordent une telle importance. Je prévois également de trouver la zone où il serait le plus logique pour moi d'installer mon propre gratte-ciel, c'est-à-dire où il serait le plus nécessaire et quelle ville a besoin d'infrastructures plus durables.
- Je conduirai des interviews avec Dr. Kurt Teichert, Dr. Jacqueline Pauli et l'architecte Catia Da Silva pour m'aider à me familiariser avec la question de la durabilité environnementale et les effets d'un gratte-ciel sur celle-ci. J'espère comprendre les domaines de préoccupation et trouver des solutions possibles et en discuter avec trois experts. Grâce à ces entretiens, j'ai également l'intention d'approfondir ma compréhension des composants structurels d'un gratte-ciel afin de pouvoir commencer à réfléchir à des moyens d'intégrer ces systèmes durables en tant que solutions.
- Après ces entretiens, je poursuivrai mes recherches sur la problématique de la durabilité et j'approfondirai mes connaissances. L'objectif est d'être en mesure d'analyser les informations et de formuler des hypothèses approfondies sur les moyens de rendre mon propre gratte-ciel plus respectueux de l'environnement. Grâce aux entretiens et à mes recherches personnelles, je devrais être en mesure d'apporter une réponse à ces hypothèses. Mon objectif est de valider mes hypothèses afin de pouvoir virtuellement implanter ces systèmes et concepts dans mon propre gratte-ciel.
- Mon stage chez « Ferrari Architectes » a pour but de lancer la conception autour de mon propre gratte-ciel. J'espère dessiner différentes esquisses qui montrent mon processus de réflexion et mes inspirations. De plus, un dessin final de l'extérieur de mon gratte-ciel devrait montrer optiquement comment j'ai l'intention d'inclure des

solutions durables. Je prévois également de créer des plans d'étage pour un modèle de penthouse et pour l'entrée du bâtiment.

- Une fois que mon gratte-ciel aura été conceptualisé et mis sur papier, je commencerai le modèle 3D. Je n'ai pas encore de plan établi pour la réalisation du modèle, mais je prévois de le rendre aussi simple que possible sur le plan structurel, tout en conservant les détails pertinents. Je suivrai le processus en prenant des photos, en notant les matériaux que j'ai utilisés et la façon dont j'ai procédé. Dans l'ensemble, ce modèle est censé représenter un concept de gratte-ciel écologiquement bénéfique.

3. Contexte

3.1 Qu'est-ce qu'un gratte-ciel ?

Le gratte-ciel est devenu, au cours des dernières années, un phénomène important pour plusieurs raisons. Il est le symbole d'une activité économique et d'une utilisation des sols spécifiques. En outre, il est considéré comme un point de repère très caractéristique que l'on trouve principalement dans les grandes villes. Bien qu'il s'agisse d'un phénomène qui se répande dans le monde entier et qui est devenu une structure typique de nos lignes d'horizon, il n'existe pas de définition universellement acceptée de ce qu'est un gratte-ciel. Celle que l'on trouve dans le dictionnaire français Larousse est « bâtiment d'habitation ou de bureaux à grand nombre d'étages et à faible emprise au sol par rapport à sa hauteur »¹. Cette définition semble assez commune et explique brièvement les caractéristiques d'un immeuble de grande hauteur. Cette superficialité s'explique par le fait que la notion de hauteur varie d'un pays à l'autre. En Allemagne, par exemple, les bâtiments de grande hauteur sont considérés comme ayant 22 mètres ou plus, alors que l'ASHRAE² les définit comme devant être supérieurs à 91 mètres. C'est pourquoi le CTBUH³, une organisation non gouvernementale, a défini quelques critères qui servent de lignes directrices pour de nombreuses structures. Le premier critère, la « hauteur par rapport au contexte »⁴, exige que le bâtiment dépasse de manière significative les hauteurs générales des bâtiments environnants. Le second critère, « la proportionnalité »⁵, implique que le bâtiment soit suffisamment **élancé** pour que la verticalité du bâtiment apparaisse comme celle d'un immeuble de grande taille. Il existe de nombreux bâtiments qui sont très structurés, mais qui ont également une grande surface de plancher, ce qui fait qu'ils ne sont pas considérés comme des bâtiments hauts, mais plutôt comme des bâtiments au sol. Le dernier critère, moins étudié, « technologies de construction liées à la hauteur »⁶, suggère qu'une infrastructure peut être considérée comme haute si elle utilise des technologies attribuées à la hauteur, telles que des technologies spécifiques de transport vertical ou des systèmes structurels efficaces contre les forces latérales. Le CTBUH distingue également cinq types d'immeubles de grande hauteur : « super tall building, ultra- tall building, high- rise

¹ Larousse.fr, 2023

² American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers

³ Council on Tall Buildings and Urban Habitat

⁴ Global.ctbuh.org, 2023

⁵ Global.ctbuh.org, 2023

⁶ Global.ctbuh.org, 2023

building, tower and skyscraper »⁷. Le gratte-ciel est un terme relatif pour un bâtiment qui semble durcir le ciel. Sa destinée dépend de son environnement et du fait qu'il modifie ou non sa ligne d'horizon et s'impose sur son entourage. Un immeuble de 30 étages à New York ne serait certainement pas décrit comme un gratte-ciel. En revanche, si ce même immeuble était placé dans une ville de faible hauteur, il pourrait être considéré comme tel. Emporis⁸, une société immobilière, a défini le gratte-ciel comme un « immeuble de plusieurs étages dont la hauteur architecturale est d'au moins 100 mètres »⁹.

⁷ Ctuh.org, 2023

⁸ Emporis est une entreprise immobilière située en Amérique

⁹ Global.ctuh.org, 2023

3.2 La structure d'un gratte- ciel

Comme dans n'importe quel bâtiment ou maison, l'un des éléments les plus importants est sa structure. Elle détermine la stabilité du bâtiment et la hauteur maximale qu'il peut atteindre. La structure doit résister aux vents forts et violents et supporter le poids total du bâtiment sans s'effondrer. C'est pourquoi, pour chaque nouvelle conception inventée, un élément structurel existant doit être utilisé pour toute construction.

3.2.1 Matérialité

L'une des principales composantes de sa structure est le béton armé¹⁰. Le béton en lui-même s'est avéré être fort, mais face à des dimensions aussi massives, il a dû être rendu deux fois plus résistant. Pour ce faire, des particules fines ont été ajoutées au béton utilisé, ce qui a permis d'augmenter la surface et de créer une liaison plus forte entre les molécules. Un autre matériau essentiel utilisé est l'acier¹¹, qui apparaît souvent sous la forme de poutres. Ces poutres d'acier sont généralement préfabriquées à la taille voulue et amenées sur le chantier le jour où elles sont nécessaires, en raison du manque d'espace causé par les bâtiments environnants. Les poutres sont recouvertes d'un mélange de plâtre et de la sciure¹², qui sert de protection contre la corrosion¹³ et la chaleur. Une couche d'isolation¹⁴ supplémentaire, telle qu'un matelas en fibre de verre recouvert d'aluminium, peut être ajoutée sur la poutre. Ces deux composants seront utilisés ensemble pour maximiser la qualité et la stabilité ; une colonne de soutien sera formée en coulant du béton autour d'une poutre en acier. Enfin, divers matériaux peuvent être utilisés pour l'ossature¹⁵ du gratte-ciel. Les matériaux utilisés pour former l'extérieur, appelé « revêtement »¹⁶, peuvent être du verre, des métaux tels que l'acier inoxydable ou des matériaux de maçonnerie tels que le marbre.

3.2.2 Design

Chaque projet conçu par un architecte est unique et original. Cependant, dans leur structure, la plupart d'entre eux se ressemblent, car tous les gratte- ciels sont confrontés aux

¹⁰ Matériau de construction constitué de béton durci autour d'une poutre en acier ; utilisé contre les mouvements de flexion provoqués par les vents.

¹¹ Métal composé de fer et de carbone.

¹² Minéral utilisé dans la construction qui, sous l'effet de la chaleur, subit une expansion importante.

¹³ Réaction du métal avec son environnement qui dissout la matière.

¹⁴ Un matériau qui empêche la chaleur de s'échapper ou de pénétrer dans la maison/le bâtiment.

¹⁵ La structure rigide d'un bâtiment, qui supporte l'ensemble de l'immeuble.

¹⁶ Madehow.com, 2023

mêmes restrictions et aux mêmes problèmes. Alors que l'objectif, lors de la conception d'un immeuble de hauteur basse, est de trouver une structure qui supportera sa charge permanente¹⁷ et le poids des objets placés à l'intérieur, les ingénieurs sont confrontés au problème de la stabilité lorsqu'ils étudient la conception d'un gratte-ciel. La force latérale d'un gratte-ciel causée par le vent affecte la structure plus que le poids du bâtiment lui-même. Les ingénieurs doivent donc trouver des éléments structurels qui garantiront que le bâtiment ne s'effondrera pas ou ne se balancera pas lorsqu'il sera confronté à des vents plus forts. Il existe trois principaux éléments structurels qui peuvent être combinés ou utilisés individuellement. Le premier est l'utilisation d'une ossature en acier derrière des murs-rideaux non porteurs. Une autre possibilité consiste à utiliser une ossature en béton armé remplie de panneaux de revêtement pour former les murs extérieurs. Le dernier élément structurel est la création d'un noyau central en béton, suffisamment grand pour contenir les composants techniques du bâtiment, et d'un ensemble de colonnes de soutien autour du bâtiment qui sont reliées par des poutres horizontales les unes aux autres et au noyau. Chaque modèle est testé en soufflerie, afin de déterminer les effets des vents à grande vitesse sur le bâtiment et les effets des nouvelles configurations de vent créées par le bâtiment sur les bâtiments environnants. Si une instabilité potentielle est constatée, les ingénieurs ajoutent des dispositifs mécaniques pour restreindre la plupart des mouvements.

3.2.3 Eléments structurels principaux

La technique du noyau- central

Ce type de structure est la plus utilisée pour la construction d'un gratte-ciel. Dr. Jacqueline Pauli, membre du conseil d'administration de l'ETH, ingénieure et professeure de conception structurelle au département d'architecture de l'ETH Zurich, explique :

Dans un immeuble de grande hauteur, on trouve généralement au centre le noyau, qui est plus ou moins un rectangle. C'est là que se trouvent les ascenseurs, les passerelles d'évacuation, les colonnes montantes et que se trouve une grande partie de la structure porteuse. Ensuite, il y a les bureaux ou les appartements, puis la façade à l'extérieur. C'est la particularité d'un immeuble de grande hauteur par rapport à un bâtiment plus bas, c'est que beaucoup de choses doivent passer par la zone centrale au milieu¹⁸.

¹⁷ Charges qui restent constantes dans le temps et qui ne sont pas affectées par l'ajout d'un nouveau poids (par exemple, le poids des éléments structurels d'un bâtiment).

¹⁸ Interview personnel avec Dr. Jacqueline Pauli, 2023

Cette structure parcourt le bâtiment sur toute sa hauteur et est principalement distinguée par son noyau central qui tient tous les réseaux d'eau, d'électricité et les ascenseurs et escalier. Sa construction est normalement effectuée avec du béton armé. Des poutres sont mises entre le noyau et la façade, pour qu'elles soutiennent le plancher et redirige les forces créées par le vent sur le noyau. Dr. Pauli ajoute à son explication :

Si on le regarde du point de vue de sa structure porteuse, on se rend compte qu'il a beaucoup plus de poids. L'autre chose que l'on remarque aussi, c'est son affinité avec le vent et les tremblements de terre. Plus la maison est haute, plus elle a tendance à se balancer. Et pour maîtriser ce phénomène, il faut aussi le noyau interne ; il soulève pour ainsi dire toute la maison horizontalement¹⁹.

Cette structure a des limites d'hauteur, car pour en gagner, le noyau doit augmenter en taille. Ce qui veut dire qu'en ayant une base plus large, les appartements seront trop éloignés du bord pour recevoir de la lumière du jour. Ce design peut atteindre jusqu'à 30 étages ou 70 étages si l'on double la structure de base.

Les prismes en faisceaux

Ce type de construction part du principe des tubes en faisceaux ; « si une brindille seule est fragile, un fagot de brindilles est, lui, solide »²⁰. La construction repose sur l'assemblage de plusieurs tours différentes, chacune avec sa propre construction, ce qui crée un bâtiment beaucoup plus solide et stable. Cette structure permet au bâtiment d'avoir plus de 100 étages.

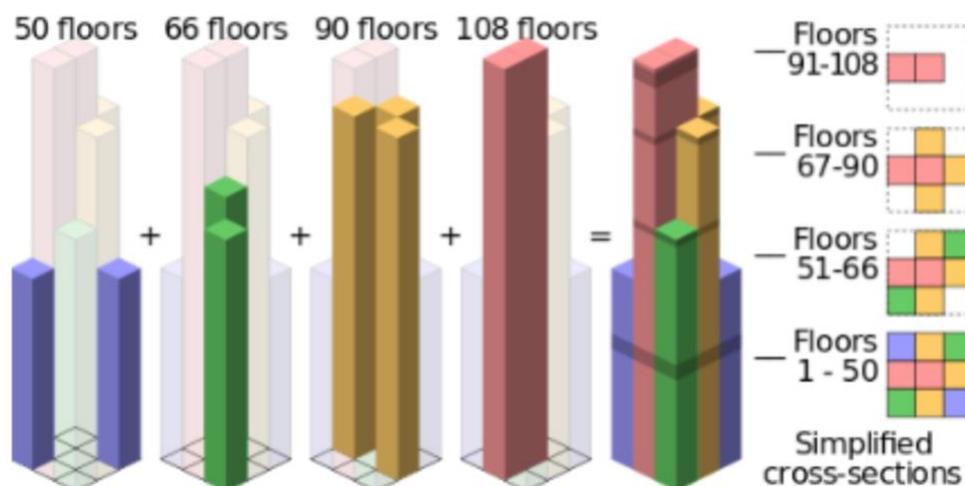


Illustration 1 : Représentation visuelle de la méthode de prismes en faisceaux.

¹⁹ Interview personnel avec Dr. Jacqueline Pauli, 2023

²⁰ Tpeconstructiontour.wordpress.com, 2023

Un beau bâtiment, situé à Chicago dans l'Illinois, qui utilise ce principe, est la Willis Tower²¹. Construite de 1970 à 1973, elle se compose de neuf tours individuelles, chacune d'une hauteur différente. Cela permet de réduire l'effet des vents sur l'ensemble de la tour. En raison de cet assemblage, la principale critique adressée à ces tours est leur poids excessif. Par exemple, la tour Willis pèse 222 500 tonnes, ce qui, comparé à d'autres tours, comme la Burj Al- Arab qui ne pèse que 9 000 tonnes, est considéré comme excessivement lourd.



Illustration 2 : La Tour Willis, 1973, Chicago.

Les ossatures extérieures

En utilisant des ossatures extérieures²² avec un noyau central, on renforce le noyau, ce qui nous permet d'atteindre de plus grandes hauteurs qu'avec le noyau classique. L'ossature extérieure est normalement préfabriquée, puis mise en place par des boulons²³ à haute résistance ou des amortisseurs²⁴. Il y a des différents types d'ossatures ; le premier étant une simple ossature métallique, le second étant des renforts triangulaires et le dernier étant des piliers d'angle. Grâce à cette structure, les tours jumelles du World Trade Center ont pu résister à des vents violents sans bouger de plus de 28 cm à leur sommet. Et ce, à New York qu'elles mesuraient environ 410 mètres de haut.

²¹ Willistower.com, 2023 (toutes les données mentionnées ont été trouvées sur le site officiel)

²² La structure rigide d'un bâtiment, qui support l'ensemble de l'immeuble, trouver à l'extérieur

²³ Un type de vis

²⁴ Système mécanique censé amortir ou absorber un choc.

L'exosquelette et les structures hyperboloïdes

Cette forme structurelle a été explorée très récemment et, en raison de cela est encore en cours de développement. Ce principe permet à la structure de résister à certains efforts mécaniques et redéfinit l'utilisation de l'espace intérieur puisqu'il n'y a plus de structure interne importante comme le noyau. Ce principe, bien qu'il ne soit pas encore très établi, utilise des technologies qui s'appuient beaucoup plus sur l'extérieur que sur l'intérieur. Les tours jumelles de Canton²⁵, à Shanghai, sont connues pour dépasser une hauteur de 500 mètres grâce à leur exosquelette et à leur forme d'escalier, inspirée de l'ADN humain.

²⁵ Tpeconstructiontour.wordpress.com, 2023

3.3 Importance des gratte-ciels

3.3.1 Population

La croissance exponentielle de la population est l'un des problèmes les plus urgents qui ont stimulé le développement des immeubles à grande hauteur. Au fil des ans, on a assisté à une augmentation considérable de la population urbaine dans le monde entier. À tel point que, selon des recherches menées par les Nations Unies, la population mondiale devrait augmenter de près de 2 milliards de personnes au cours des 30 prochaines années²⁶. En 2050, la population mondiale devrait dépasser les 9,7 milliards d'habitants et pourrait culminer à près de 10,4 milliards vers les années 2080. Les grandes villes devraient atteindre une population de 30 à 50 millions d'habitants, ce qui rendra ces concentrations urbaines colossales. En Chine, par exemple, on estime que d'ici 2025, 350 millions de personnes migreront vers les villes et auront besoin de cinq millions de nouveaux bâtiments de logement, ce qui équivaut à la taille de dix villes comme New York. La solution consistant à construire des immeubles de grande hauteur est devenue très attrayante, car ils offrent plus d'espace d'habitation sur une surface plus réduite.

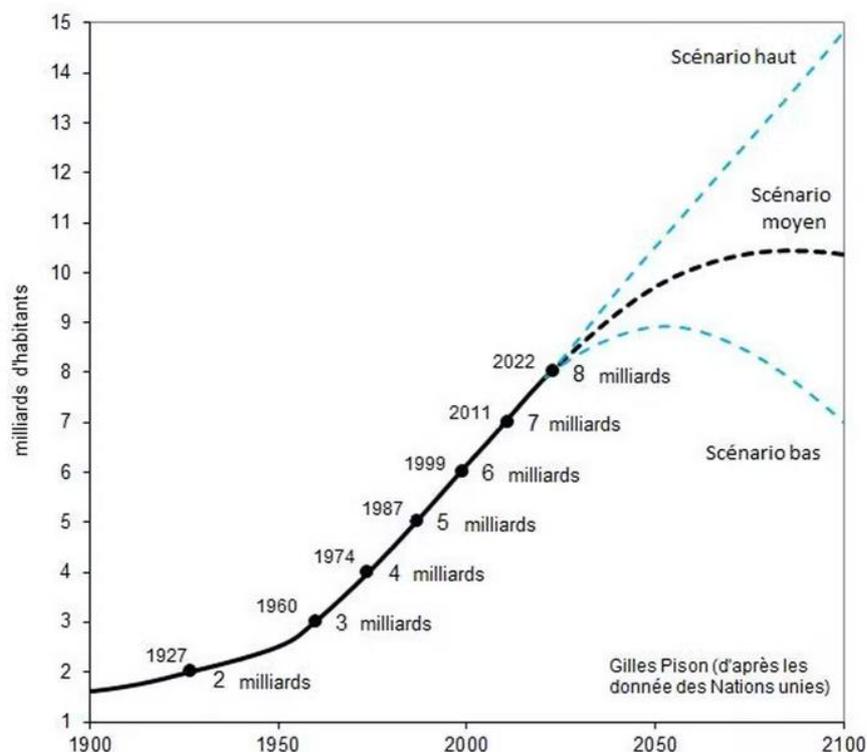


Illustration 3 : Population mondiale depuis 1900 jusqu'à 2100.

²⁶ Un.org, 2023

3.3.2 Concurrence mondiale et globalisation

La tendance actuelle en matière de bâtiments de grande hauteur reflète l'impact croissant de la concurrence mondiale sur le développement des grandes villes du monde. Depuis des décennies, les grandes villes développées sont en compétition pour créer le bâtiment le plus haut qui soit. Les facteurs déterminants sont la démonstration de la richesse économique, l'amélioration de l'image globale de la ville et la promotion de la ville comme étant connectée à l'échelle internationale. La mondialisation a également favorisé les économies locale et donc la construction soutenue de grands immeubles. Ce phénomène se distingue fortement dans la partie orientale du monde, comme la ville de Shenzhen en Chine. Cette ville était autrefois un petit village de pêcheurs. Cependant, grâce à la globalisation²⁷ et aux investissements étrangers, ce qui était autrefois un petit village est devenu un paysage de gratte-ciels.

3.3.3 Régénération urbaine

De nombreuses villes ont connu une suburbanisation²⁸ dans les années 60 et 70, au cours de laquelle de nombreuses personnes ont migré vers l'extérieur des villes. Au cours des deux dernières décennies, nous avons assisté à un grand retour vers les villes. Ce phénomène est principalement influencé par le désir des jeunes de vivre la vie urbaine, ce qui leur offre beaucoup plus de possibilités, que ce soit dans le domaine du travail ou des loisirs, et d'optimiser leur vie grâce au confort de la proximité. Les transports et le fait de ne pas avoir à mettre des heures pour se rendre à certains endroits ont également rendu la vie urbaine beaucoup plus attrayante. Cela étant dit, ce ne sont pas seulement les jeunes qui ont émigré, mais aussi les générations plus âgées qui essaient de se libérer de l'entretien exigeant des propriétés et du sentiment de solitude. La régénération des centres urbains ne nécessite pas de grands bâtiments, mais ceux-ci ont tendance à optimiser l'utilisation du sol. Par conséquent, les grands immeubles ont été utilisés pour régénérer les centres urbains délaissés.

²⁷ Un processus auquel des organisations développent une influence internationale ou opèrent au niveau international

²⁸ La croissance vers l'extérieur du développement urbain qui peut englober les villages environnants dans une agglomération urbaine plus importante.

3.3.4 Prix des terrains

Le prix des terrains a toujours été un facteur déterminant pour la construction de grands immeubles. En 1900, Cass Gilbert décrivait les gratte-ciels comme « une machine qui fait payer le terrain »²⁹, permettant donc d'amortir le prix d'achat. Dans les grandes villes, les propriétés sont plus chères et donc les bâtiments s'élèvent. Un faible coût des terrains maintient clairement les bâtiments plus près du sol ; les bâtiments élevés ne sont pas attrayants pour les petites villes. Carol Willis a inventé l'expression « form follows finance » (la forme suit le financement), selon laquelle l'économie des bâtiments de grande hauteur joue un rôle clé dans la conception de bâtiments³⁰. Les prix des terrains ont été nettement plus élevés, ce qui a favorisé le développement des bâtiments de grande hauteur. Alors que de nombreuses villes cherchent à repeupler leurs centres urbains, les immeubles de grande hauteur sont immédiatement considérés comme la principale structure de construction. Dans certaines villes comme New York ou Hong Kong, la croissance horizontale est limitée en raison des frontières géographiques. Par conséquent, pour répondre aux besoins de tous, les bâtiments doivent être de grande hauteur. Comme mentionné auparavant, Hong Kong dispose de 1000 km² de terrain géographique, dont seulement 25 % peuvent être utilisés pour la construction. Ces 25 % doivent accueillir 7,5 millions d'habitants.

3.3.5 Consommation des terres

La durabilité favorise un mode de vie urbain compact et la densité est considérée comme un outil permettant de créer une ville plus durable. De nombreuses institutions, telles que l'Urban Land Institute aux États-Unis, soutiennent ce point de vue et déclarent :

En augmentant stratégiquement le nombre d'unités d'habitation par acre, les villes ne feront pas qu'atteindre leurs objectifs de durabilité, elles seront également compétitives, résilientes et agréables à vivre.³¹

L'argument avancé est que des espaces plus denses permettent de préserver les espaces ouverts, un objectif clé de la durabilité. La disponibilité des espaces ouverts offre des avantages significatifs en termes de qualité environnementale et de santé. Ils préviennent les dommages causés par les inondations, servent à contrôler l'érosion et utilisent des terres moins précieuses. Il est également moins coûteux d'entretenir les espaces ouverts, ce qui est

²⁹ Global.ctbuh.org, 2023

³⁰ Global.ctbuh.org, 2023

³¹ Global.ctbuh.org, 2023

plus efficace que de payer pour de grandes infrastructures, qui nécessitent de temps à autre des réparations. Les bâtiments de grande hauteur favorisent la densité et contribuent à préserver les espaces ouverts en accueillant plus de personnes sur une surface plus petite, car ils sont définis comme la transformation verticale de l'expansion horizontale. Il faut également tenir compte du fait que lorsque les développements s'étendent verticalement, les espaces publics et les terrains riches en ressources restent intacts.

3.3.6 Transports et infrastructures

Les immeubles de grande hauteur sont généralement reconnus comme un type efficace de développement compact qui réduit les distances de déplacement et l'émission de carbone. L'expansion des villes vers l'extérieur, qui a eu lieu au cours du siècle dernier, a entraîné une augmentation de la durée des trajets, de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂. Les recherches montrent que l'un des meilleurs moyens de réduire les émissions de carbone est de construire des lieux compacts où les gens peuvent accomplir plus de choses en conduisant moins, d'où la nécessité d'un développement compact. Singapour, par exemple, est l'un des pays les plus efficaces en matière de transport et d'énergie et les plus respectueux de l'environnement. Les immeubles de grande taille situés dans un centre urbain compact peuvent réduire l'empreinte carbone par habitant d'une ville de banlieue. Les installations verticales sont également des infrastructures plus efficaces, car tout est regroupé en un seul endroit. Un lotissement de 500 logements nécessite par exemple plus d'énergie et de ressources qu'un grand immeuble de 500 logements, ce qui permet d'intégrer efficacement ces systèmes en un seul.

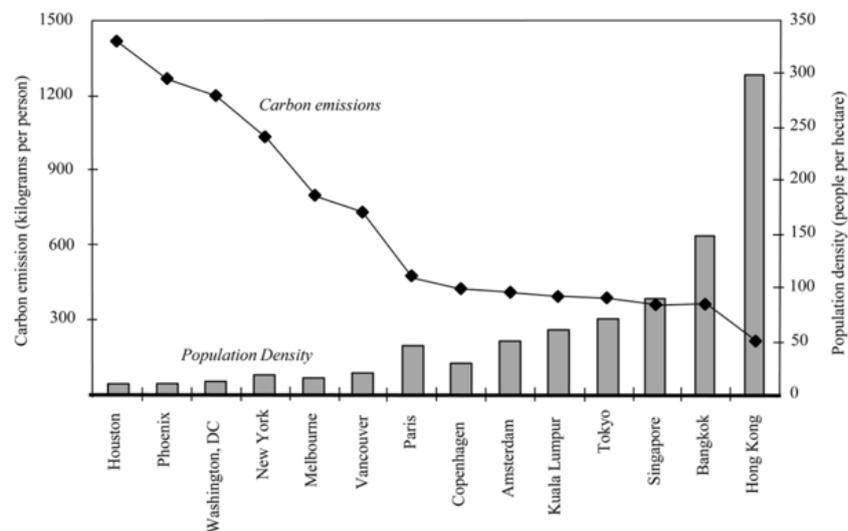


Illustration 4 : Les villes plus denses ont tendance à réduire les émissions de carbone dues au transport

3.3.7 Aspirations humaines, symbolisme

Selon Roberto Assagioli, théoricien de la psychosynthèse, la conception de la hauteur est liée à la « réalisation de soi » et au « potentiel humain », et c'est la raison pour laquelle nous avons toujours été fascinés par les structures de grande taille telles que les gratte-ciels³². Ce phénomène se retrouve dans les "sept merveilles" de l'ancien monde. Ces immenses panoramas à couper le souffle donnent une identité à une ville et projettent un sentiment de puissance socio-économique.

3.3.8 Technologies émergentes

La technologie actuelle devenant de plus en plus sophistiquée et améliorée, les architectes ont la possibilité de construire des expressions plus hautes et plus innovantes. Ils utilisent de plus en plus de nouvelles technologies et de nouvelles esthétiques, repoussant ainsi les limites de la perception de l'architecture. Cette demande de bâtiments de grande qualité a fait progresser les sciences telles que l'ingénierie mécanique, l'informatique et l'électricité.

³² Global.ctbuh.org, 2023

3.4 Emplacement idéal

En ce qui concerne l'emplacement d'un gratte-ciel vert, la ville de New York est l'une des zones idéales pour la construction. Avec une population de 8'335'897 habitants et la plus forte densité des États-Unis, la ville de New York a besoin de plus en plus d'espace pour ses habitants³³. Pour ne pas perdre des terrains précieux, la construction verticale devrait être la réponse, et donc appeler à des immeubles de grande hauteur respectueux de l'environnement. De plus, il est surprenant de constater que New York fait partie des trois villes les plus durables des États-Unis (numéro trois) et des vingt villes les plus durables du monde (numéro quinze)³⁴.

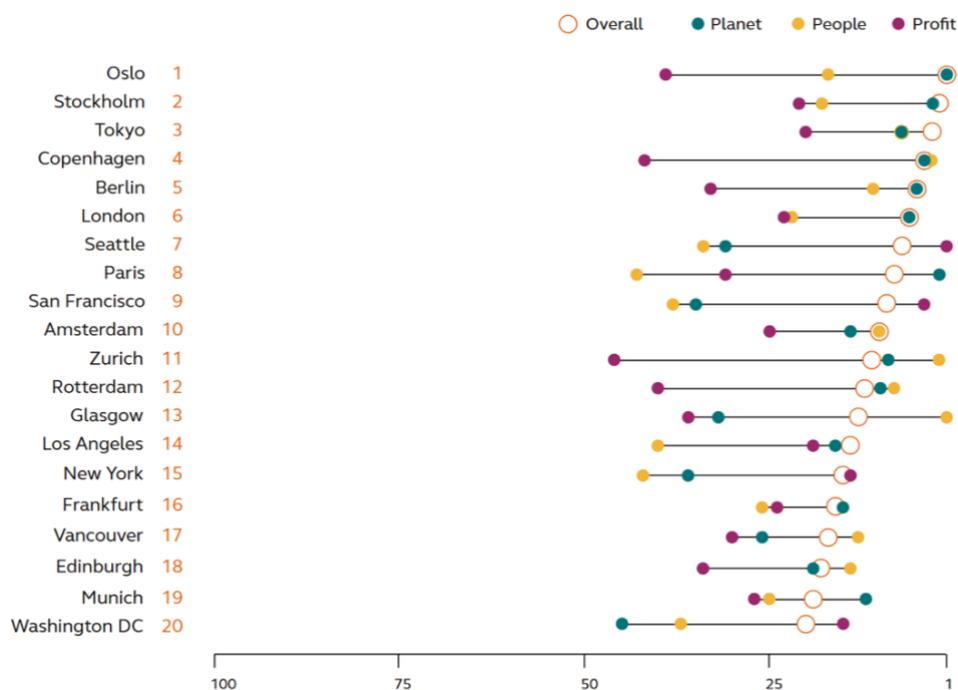


Illustration 5 : Graphique des cités les plus durables au monde.

Cela nous montre que les villes sont préoccupées par la crise climatique et qu'elles ont la volonté de développer et d'améliorer leurs méthodes. Elles ont déjà de nombreux plans et concepts qui sont mis en œuvre ; l'un d'entre eux étant « l'objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 80 % d'ici 2050 »³⁵. Les exigences étant modifiées en ce qui concerne les transports, l'énergie et l'empreinte carbone des bâtiments de la ville, ce travail de maturité peut s'adapter aux données new-yorkaises pour aider à concevoir des idées plus durables.

³³ Newyork-demographics.com, 2023

³⁴ LinkedIn.com, 2023

³⁵ Nyc.gov

La professeuse Jacqueline Pauli ajoute à cela :

Manhattan est génial parce qu'il se trouve sur un rocher, ce qui est le meilleur scénario, car on peut plus ou moins poser la maison directement sur le rocher. Dubaï, par exemple, se trouve sur le sable du désert ; il faut alors 50 mètres de fondations sous la maison pour qu'elle soit un tant soit peu stable. Plus la maison est haute, plus ce que l'on doit construire en dessous est extrême. Je pense que Manhattan ne serait pas mal. Il y a déjà beaucoup de choses là-bas, on peut bien s'orienter³⁶.

New York est surtout connue pour sa ligne d'horizon composée de gratte-ciels. L'idée de la ville qui ne dort jamais fait souvent référence aux lumières nocturnes vives que l'on voit de cette célèbre ligne d'horizon. C'est pourquoi j'ai choisi de placer mon gratte-ciel dans la ville de New York. Une ville pleine d'histoire architecturale et d'une vision d'avenir pour des espaces de vie plus propres.

³⁶ Interview personnel avec Dr. Jacqueline Pauli, 2023

4. Enjeux écologiques

4.1 Problèmes causés par les gratte-ciels

Lorsque nous pensons aux gratte-ciels, nous avons immédiatement à l'esprit cette image de grandes structures qui permettent d'atteindre les sommets. Il s'agit d'une conception impressionnante, qui reçoit beaucoup d'éloges pour son aspiration et son symbolisme de la culture et de la richesse. Cela étant dit, ce concept moderne fait également l'objet de nombreuses critiques. L'architecte Catia Da Silva déclare :

À titre personnel, je ne suis pas favorable aux gratte-ciels car ils représentent la plupart du temps un besoin d'affirmation de pouvoir plutôt que de répondre à un réel besoin de densification. La technicité requise pour la construction d'un gratte-ciel est tellement pointue que, dans l'aire de la construction durable, je trouve qu'ils sont à contre-courant³⁷.

4.1.1 Les émissions de CO₂ et l'effet de serre

Ce n'est un secret pour personne qu'au cours des dernières décennies, l'activité humaine a modifié l'atmosphère terrestre et ses gaz à effet de serre de manière néfaste. Nous avons constaté une augmentation des émissions de carbone, ce qui a provoqué un pic de réchauffement de la planète, qui ne semble pas vouloir s'atténuer. De nombreuses organisations s'occupant des questions climatiques, comme le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, estiment que d'ici la fin du siècle, les températures atmosphériques auront augmenté de 4,5 °C et que les émissions de dioxyde de carbone auront doublé. À ce jour, le secteur de la construction est responsable d'une grande partie de ces émissions, puisqu'il représente 38 % du total des émissions de carbone, en raison de sa consommation d'énergie et de ses rejets. Peggy Cameron, scientifique de l'environnement et auteur de « Buildings for the Climate Crisis - a Halifax Case Study », explique:

Le carbone incorporé comprend toutes les émissions produites pendant la phase de construction d'une structure, depuis la fabrication de matériaux tels que les fenêtres et les portes jusqu'au transport de ces matériaux, en passant par l'énergie consommée pendant la construction. Le carbone libéré lors de la démolition est également pris en compte³⁸.

³⁷ Interview personnel avec Catia Da Silva, 2023

³⁸ Nationalobserver.com, 2023

Par conséquent, lorsque l'on examine le cycle de vie d'un bâtiment, on le divise généralement en trois parties : l'énergie intrinsèque, l'énergie opérationnelle et la fin de vie par le biais de la démolition et de l'élimination.

Énergie intrinsèque

L'énergie intrinsèque d'un bâtiment est définie par l'énergie nécessaire à la production de tous les matériaux qui composent le bâtiment. Elle comprend également le transport de ces matériaux jusqu'au site de construction et l'énergie utilisée pendant le processus de construction de la maison, y compris les réparations présentes ou futures. Les différents matériaux ont des capacités différentes en termes d'énergie intrinsèque et peuvent être réutilisés ou non. Ceci est très important, car en fonction de ses caractéristiques, un matériau est plus susceptible d'être bénéfique ou non pour l'environnement.

Énergie opérationnelle

L'énergie opérationnelle est l'énergie utilisée pendant la phase d'occupation du bâtiment. Elle comprend le chauffage et le refroidissement des locaux et de l'eau, l'éclairage et le fonctionnement des appareils. Elle est généralement considérée comme la partie la plus longue du "cycle de vie" et peut représenter 80 à 90 % de la consommation totale d'énergie. Son effet sur l'environnement dépend fortement de la conception, de la technologie et des matériaux utilisés.

Démolition et élimination

Les déchets de démolition d'un bâtiment ont un impact considérable sur l'environnement et constituent souvent une lourde charge pour celui-ci. Ces conséquences ne dépendent pas seulement du volume de la masse éliminée, mais aussi du carbone incorporé dans les déchets. Plus la quantité de matériaux mis au rebut est importante et plus le pourcentage de carbone est élevé, plus les émissions sont importantes. Cela entraîne une augmentation des gaz à effet de serre qui emprisonnent l'air chaud.

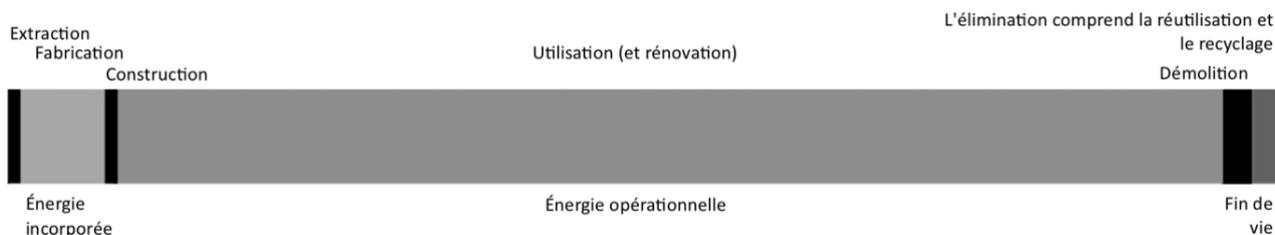


Illustration 6 : Le cycle de vie d'un bâtiment.

Par conséquent, un bâtiment de grande hauteur aura un impact plus fort et plus négatif sur l'environnement. Catia Da Silva, architecte environnementale, l'explique lors de notre entretien :

L'impact carbone est plus important sur les gratte-ciels sur le long terme que sur des constructions de faible hauteur. Si on considère le cycle de vie complet d'un gratte-ciel, la production de CO2 est beaucoup plus significative : depuis l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux de construction qui le composent, la construction, l'entretien, l'exploitation, et jusqu'à sa démolition/rénovation³⁹.

L'exigence d'une plus grande matérialité, due à sa structure plus lourde, à ses fondations plus épaisses et à sa hauteur, aura un impact plus important sur le cycle de vie du bâtiment. Des composants tels que l'acier et le béton sont généralement utilisés pour poser les fondations d'un gratte-ciel, deux matériaux dont l'empreinte carbone est très élevée. Cet impact des grands immeubles sur l'environnement, qui sont plus de 800 gratte-ciels à exister dans le monde⁴⁰, a gagné beaucoup de popularité. Une étude menée par J. Burnett⁴¹ montre que la consommation d'énergie des immeubles de grande hauteur, construits principalement en aluminium et en acier, représente près de la moitié de la consommation totale d'énergie à Hong Kong.

³⁹ Interview personnel avec Catia Da Silva, 2023

⁴⁰ Onenineelms.co.uk, 2023

⁴¹ Sciencedirect.com, 2023

4.1.2 Îlots de chaleur urbains (ICU)

Ces dernières années, nous avons assisté à une augmentation des vagues de chaleur et des étés chauds et intenses. Comme le montre une recherche de l'Université de Zurich⁴², ces phénomènes environnementaux, causés par le changement climatique, ont eu de graves répercussions sur la santé humaine, en particulier sur les habitants des villes, où un excès de chaleur s'accumule pendant la journée et n'est pas suffisamment évacué pendant la nuit. Ces zones sont également connues sous le nom d'îlots de chaleur urbains et se trouvent dans les villes les plus denses. Les îlots de chaleur urbains sont des zones de chaleur fortes et concentrées qui s'accumulent parce que l'air est piégé au niveau des rues et ne peut s'échapper en raison de la densité de la ville. Ces zones contiennent de nombreuses particules polluées, qui restent piégées et nuisent gravement au microclimat⁴³ et à la vie humaine.



Illustration 7 : Représentation graphique des îlots de chaleur urbaine.

Les bâtiments et l'ICU

Les types de bâtiments que l'on trouve dans les villes respectives ont un impact important sur la gravité de ces ICU. Plus les bâtiments sont compacts et hauts, plus la chaleur aura du mal à s'échapper. Ils créent des « canyons » urbains⁴⁴ qui empêchent le vent d'éloigner l'air chaud des rues, des bâtiments et des personnes. Les îlots de chaleur urbains sont en partie causés par les matériaux de construction lourds, qui emmagasinent beaucoup d'énergie

⁴² News.uzh.ch, 2023

⁴³ Le climat qui existe à l'échelle microscopique

⁴⁴ Un endroit où la rue est encadrée par des bâtiments des deux côtés, ce qui crée un environnement semblable à celui d'un canyon

solaire et la restituent à l'environnement sous forme de chaleur, et par la masse thermique⁴⁵ qu'ils créent à l'intérieur d'un bâtiment. Il ne fait donc aucun doute qu'un bâtiment plus haut, nécessitant plus de ces matériaux et ayant une masse thermique plus importante, contribuera énormément à l'augmentation de l'ICU. L'emplacement et la géométrie du bâtiment sont également des facteurs déterminants. Si une façade en béton est placée du côté le plus ensoleillé, elle produira beaucoup plus de chaleur que si cette façade est orientée vers le nord ou si le béton est remplacé par du verre, un matériau qui laisse pénétrer le soleil. La façon dont le bâtiment est conçu et façonné modifie également sa relation avec le soleil. Plus il y a de fenêtres, plus le soleil passe, alors que quand les façades sont en béton, elles absorbent la chaleur de jour et la renvoie la nuit. Les gratte-ciels modifient également la topographie du terrain, un autre facteur qui réduit ou augmente les îlots de chaleur urbains. Une topographie apparemment plate et plus étalée est beaucoup plus bénéfique, car l'air est moins piégé au niveau du sol et peut circuler plus librement. L'ajout d'un gratte-ciel à une telle topographie peut immédiatement modifier le flux d'air et la voie d'évacuation de l'air chaud.

L'intérieur d'un bâtiment et l'ICU

Il est intéressant de noter qu'il existe une forte corrélation entre la température des espaces intérieurs et l'émission de chaleur dans l'environnement d'un bâtiment. À l'intérieur des bâtiments, la régulation de la température est une préoccupation majeure. Cette régulation est fortement influencée par la conception extérieure du bâtiment. L'utilisation de nombreux matériaux lourds sur la façade permettra aux espaces de rester frais, mais dégagera beaucoup de chaleur dans l'environnement. L'utilisation de matériaux à haute conductivité thermique, tout en étant plus bénéfique pour l'environnement, réchauffera les espaces intérieurs beaucoup plus rapidement. L'orientation de la construction influe également sur la quantité de lumière solaire reçue par le bâtiment. En outre, la plupart des solutions utilisées pour résoudre ce déséquilibre génèrent des émissions supplémentaires de chaleur et de CO₂ dans l'environnement. L'air conditionné utilisé pour refroidir les pièces pendant l'été en est un exemple. Bien qu'elle permette à l'intérieur de rester dans un état agréable, elle libère de la chaleur vers l'extérieur et consomme beaucoup d'énergie, ce qui accroît l'ICU.

⁴⁵ Propriété du matériau dont est fait un bâtiment capable d'absorber et de conserver la chaleur

Les vents et les îlots de chaleur urbains

Les îlots de chaleur urbains ont été découverts principalement dans les zones où la vitesse du vent est faible, en raison de la géométrie des canyons, qui crée un effet « d'ombre dû au vent »⁴⁶. Ce manque de vent et d'air "frais" influence le processus de refroidissement, le contrôle du réchauffement local et l'humidité d'une ville ou d'une zone. Un grand bâtiment agira immédiatement comme un obstacle supplémentaire, modifiant les flux d'air et les ralentissant. Au fur et à mesure que les distances entre les maisons et les bâtiments se réduisent, les risques de développement d'un comportement négatif du vent⁴⁷ augmentent. Lorsque cela se produit, l'air contenant la chaleur peut commencer à s'accumuler au niveau de la rue, augmentant la température de l'air, ce qui constitue parfois un risque pour la santé.

4.1.3 L'ombrage

Les impacts négatifs les plus « visibles » sont l'impact visuel sur le skyline d'une ville et donc l'ombrage que le bâtiment porte sur les bâtiments et rues alentour⁴⁸.

C'est la réponse que m'a donnée Catia Da Silva lorsqu'on lui a demandé quel était l'un des principaux effets négatifs des gratte-ciels. Il n'est pas surprenant qu'un bâtiment plus haut projette de l'ombre sur les propriétés voisines et bloque leur accès au soleil, beaucoup plus qu'un bâtiment plus petit. Cet ombrage, qui est défini comme l'ombre projetée par un bâtiment sur les propriétés voisines, a un impact négatif considérable sur les propriétés environnantes, que ce soit d'un point de vue environnemental ou social. Comme elle bloque une grande partie de la lumière du soleil et donc de la chaleur naturelle, la charge de chauffage, définie comme l'énergie nécessaire pour maintenir une température intérieure confortable, sera augmentée tandis que la charge de refroidissement, définie comme l'énergie qui doit être libérée pour maintenir une température intérieure confortable, sera réduite. Par conséquent, toutes les constructions environnantes auront besoin de plus d'énergie que d'habitude et devront en restituer davantage. En outre, plus une maison reçoit de lumière naturelle, moins elle a besoin de lumière artificielle et d'énergie thermique, ce qui signifie qu'elle consomme beaucoup moins d'énergie. D'un point de vue socio-économique, une propriété qui n'a pas beaucoup d'accès à la lumière du jour perd de sa valeur, car la qualité de

⁴⁶ Sciencedirect.com, 2023

⁴⁷ lorsque le flux du vent est interrompu par la surface plane d'un bâtiment, il peut "s'accumuler" au centre et devenir pratiquement stationnaire ou même "rebondir". Cela crée un flux de vent négatif

⁴⁸ Interview personnel avec Catia Da Silva, 2023

vie des habitants s'en trouve amoindrie. De plus, la lumière du jour/soleil est très importante pour les humains ; elle est très bénéfique pour la santé et permet de s'orienter tout au long de la journée. En outre, les ombres ont la propriété de se déplacer. Tout au long d'une journée, un immeuble de grande hauteur projette de l'ombre sur beaucoup plus de propriétés qu'une maison de ville. Une étude de cas, menée par Esra Sakinç, montre les effets des quelques gratte-ciels de Levent, à Istanbul, sur les propriétés environnantes⁴⁹. Les mesures ont été effectuées de 12h00 à 16h00 les 21 décembre, 21 mars et 21 juin.

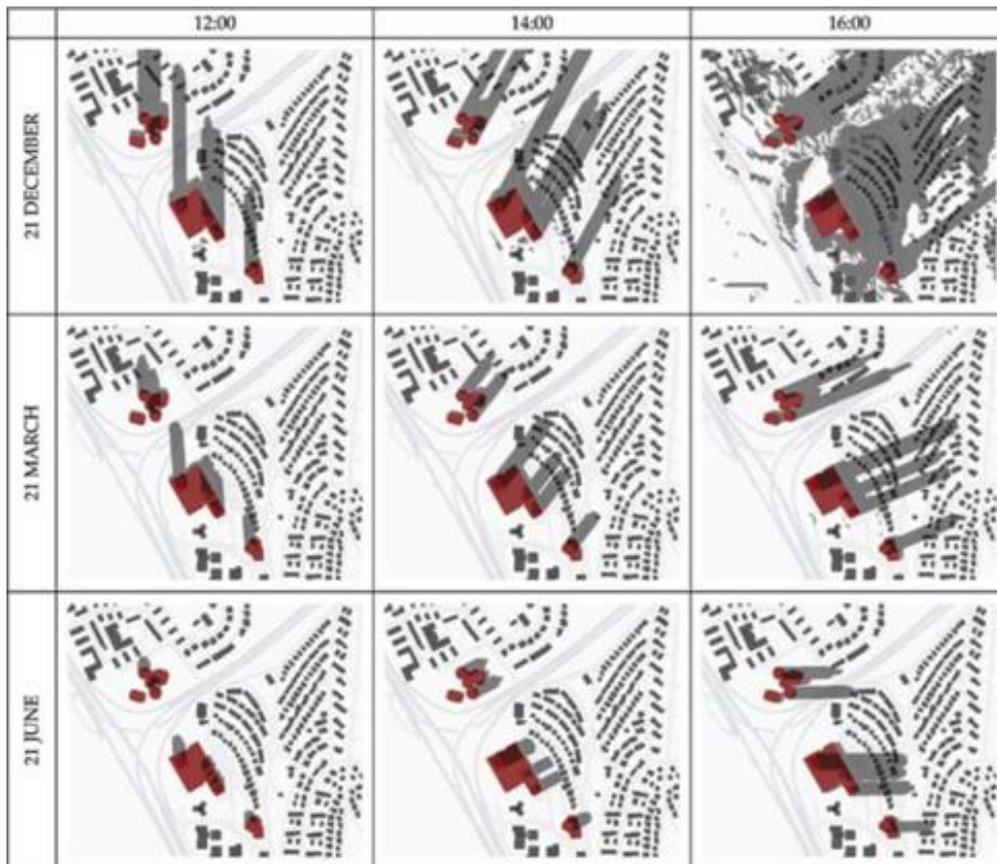


Illustration 8 : Graphique des batiments concernés et leurs ombrage, Levent, Istanbul

Il est évident que la zone voisine est affectée par un immense ombrage pendant l'hiver. Pendant l'été, ils n'ont accès à la lumière du soleil que pendant un temps limité. Ce diagramme ne montre que quelques immeubles Highrisers, qui atteignent une hauteur maximale de 190 mètres. S'il y avait beaucoup plus de tours identiques ou plus hautes, les effets seraient encore plus graves.

⁴⁹ Jfa.arch.metu.edu.tr, 2023

4.2 Analyse hypothétique

Après m'être familiarisée avec les éléments structurels d'un gratte-ciel et les principaux problèmes environnementaux qu'ils posent, j'ai interrogé trois experts dans les domaines concernés, afin de trouver des solutions durables pour l'environnement. J'ai ainsi interviewé le Dr Kurt Teichert, maître de conférences en environnement et société à l'Université de Brown, Rhode Island, le Dr Jaqueline Pauli, professeur de conception structurelle au département d'architecture de l'ETH de Zurich et, enfin, Mme Catia Da Silva, architecte environnementaliste chez Ferrari Architectes. Grâce à leur contribution et à des recherches plus intensives, j'ai réussi à trouver quelques approches possibles pour un gratte-ciel plus écologique.

4.2.1 Panneaux solaires

Il n'est pas étonnant que l'utilisation de panneaux solaires soit la première idée qui vienne à l'esprit. Ils font partie d'une technologie nouvelle, mais suffisamment avancée, qui est de plus en plus utilisée de nos jours. Ils sont faciles à utiliser et à installer et ont été optimisés au fil des ans pour générer une grande quantité d'énergie solaire. Catia Da Silva explique lors de notre rencontre que l'intégration de panneaux photovoltaïques en façade est clairement la solution qui pourrait rendre le gratte-ciel plus durable par l'autoconsommation énergétique⁵⁰. Bien que les panneaux solaires soient généralement placés sur le toit, celui-ci ne représente que 10 % de la structure d'un gratte-ciel, tandis que la façade en représente 90 %⁵¹. L'utilisation de la façade peut être optimale, car la surface est importante et permet de placer un grand nombre de panneaux solaires à la fois. Comme les gratte-ciels sont hauts et dépassent la plupart des bâtiments qui les entourent, ils ont également moins de zones ombragées, ce qui signifie que le gain d'énergie solaire possible est beaucoup plus élevé. Dr Jacqueline Pauli met toutefois en garde :

L'énergie solaire est toujours utile. On en fait de plus en plus, surtout pour les bâtiments de grande hauteur. Mais il faut voir quel rendement on peut générer. Il faut voir combien de jours d'ombre et combien d'heures d'ensoleillement on peut obtenir. Bien sûr, chez nous, c'est différent de ce qui se passe plus au sud ou plus au nord. Les heures d'ensoleillement sont différentes selon l'endroit. Il faut voir combien de kilowatts-heures on obtient par an et de combien on en a besoin⁵².

⁵⁰ Interview personnel avec Catia Da Silva, 2023

⁵¹ Interview personnel avec Dr. Kurt Teichert, 2023

⁵² Interview personnel avec Dr. Jaqueline Pauli, 2023

En gardant ces précautions à l'esprit, je pense que l'utilisation de panneaux solaires sur la façade de mon gratte-ciel apportera une solution durable à la création et à l'utilisation de l'énergie. Si suffisamment de panneaux solaires peuvent être placés, je pense également qu'une partie du bâtiment pourrait être alimenté uniquement par l'énergie solaire créée.

4.2.2 Conception solaire passive

Une grande partie des gaz à effet de serre émis provient des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, qui consomment beaucoup d'énergie. Une maison standard utilise 46 % de son énergie pour alimenter les systèmes de climatisation et de chauffage, ce qui représente une consommation de 28 à 63 kWh par jour⁵³. L'intégration de systèmes CVC⁵⁴ qui ne nécessitent pas d'énergie humaine et qui peuvent se produire naturellement, pourrait minimiser les émissions résultant de l'alimentation de ces appareils. C'est dans la conception solaire passive que se trouvent les réponses. La conception solaire passive consiste à utiliser l'énergie solaire, le climat géographique du bâtiment et les propriétés matérielles du bâtiment pour chauffer et refroidir les espaces intérieurs avec une autosuffisance maximale. Kurt Teichert explique :

Le défi que pose ce type de bâtiment est la prédominance du verre. Et lorsqu'il s'agit d'immeubles résidentiels de 200 mètres de haut, les codes vont limiter ce que l'on peut faire. Le défi de l'orientation solaire des bâtiments dans un climat mixte est qu'il y aura des mois extrêmement chauds où le verre sera un handicap. Il y aura aussi des mois plus froids où le verre sera un atout. Et lorsqu'il s'agit d'un inconvénient, il faut avoir la possibilité de l'ombrager⁵⁵.

Par conséquent, pour optimiser les systèmes CVC grâce à des conceptions solaires passives, il faut trouver des moyens d'ombrager et d'utiliser l'énergie solaire pendant l'été et de la maximiser dans les espaces intérieurs pendant l'hiver. Dr. Kurt Teichert ajoute à cela :

Dès que vous pouvez introduire de l'ombre et des fenêtres ou des portes ouvrantes, vous avez plus de possibilités de profiter des avantages du soleil sans avoir à vous préoccuper autant de la responsabilité. Tirer parti de la convection naturelle de l'air et de la ventilation naturelle par opposition aux systèmes mécaniques sont d'autres formes de conception passive qui peuvent être utilisées pour optimiser un espace⁵⁶.

⁵³ Directenergy.com, 2023

⁵⁴ Systèmes chauffage, ventilation et climatisation

⁵⁵ Interview personnel avec Kurt Teichert, 2023

⁵⁶ Interview personnel avec Kurt Teichert, 2023

C'est pourquoi je pense qu'en trouvant des conceptions et des matériaux qui peuvent être appliqués pour maximiser les avantages du verre sans en faire un handicap, le concept de conception solaire passive pourrait être optimisé et très bénéfique pour rendre mon gratte-ciel plus durable.

Le système de double façade est un système de ventilation composé de deux couches, généralement en verre, où l'air circule à travers l'espace. Ce système est très connu et souvent utilisé, notamment dans les gratte-ciels. En effet, la façade transparente ne gêne pas la vue et sert également d'isolation contre les températures extrêmes, les vents et le bruit. En les utilisant pour les gratte-ciels, les coûts de chauffage, de ventilation et de climatisation sont massivement réduits et le besoin de technologies spécifiques aux fenêtres est éliminé. L'aspect le plus louable de ce système est son adaptabilité aux différents climats grâce à l'ouverture et à la fermeture des ailettes d'entrée et de sortie ou à des circulateurs d'air actifs. En hiver, l'air peut être piégé à l'intérieur de la fente et donc réchauffer les espaces. Cela permet de réduire les coûts du système de chauffage. En revanche, en été, la fente peut être ouverte et permettre à l'air de circuler à l'intérieur et à l'extérieur. Cela se produit grâce à l'effet de cheminée, où la différence de densité de l'air crée un mouvement circulaire et pousse l'air chaud vers l'extérieur. Cette remontée d'air dans l'interstice crée une brise pour les fenêtres ouvertes environnantes.

4.2.3 Végétation

Une autre possibilité qui nous est venue à l'esprit est l'intégration de plantes. Lorsque cette idée a été abordée au cours des entretiens, les réponses ont toutes été similaires, suscitant des sentiments mitigés à ce sujet. Dr Pauli explique :

Pour les plantes, il existe bien sûr de nombreux systèmes. Mais c'est plutôt compliqué, car elles ont besoin de beaucoup d'attention, elles doivent toujours être belles. Ici, il faut justement voir comment on peut faire remonter l'eau vers elles. En fait, il faut des plantes qui n'ont pas besoin de plus que l'eau de pluie. Cela coûte en fait beaucoup d'argent et d'énergie⁵⁷.

Il va sans dire qu'il s'agit là de très bons arguments pour en faire une question de contre-productivité. Catia Da Silva a également déclaré que « nous n'avons pas assez de recul pour affirmer si cette solution est durable, puisque les plantes risquent de ne pas survivre aux

⁵⁷ Interview personnel avec Dr. Jacqueline Pauli, 2023

conditions atmosphériques plutôt rudes »⁵⁸. En effet, les conditions atmosphériques à haute altitude deviennent de plus en plus rigides et les plantes risquent de ne pas survivre aux conditions atmosphériques plutôt rudes. Ceci étant dit, l'intégration des plantes répond au problème des îlots de chaleur urbaine, car elles ne libèrent pas d'énergie sous forme de chaleur, mais l'absorbent et la transforment en oxygène grâce à la photosynthèse. Dr Pauli ajoute à sa déclaration :

Ils ont des plantes sur le toit (montre la façade de l'immeuble Aglaya à Rotkreuz, Zug), mais ils ont aussi un système d'arrosage automatisé. Quand on fait quelque chose comme ça, il faut tenir compte du fait que c'est une plante qui ne demande pas beaucoup d'efforts et que l'on peut laisser tomber. La terre pèse aussi beaucoup et doit être remise dans les fondations, cela signifie donc que les fondations sont plus grandes. Mais cela peut fonctionner⁵⁹.

Pour suivre cette idée, je pense que si elles sont placées de manière appropriée et si les végétaux adéquats sont utilisés, ils ne porteront pas atteinte à leur environnement et à leur cause, mais seront au contraire bénéfiques pour l'environnement.

4.2.4 Matériaux

La consommation de matériaux est l'une des principales causes des fortes émissions de CO₂ liées aux gratte-ciels. Les matériaux utilisés dans la structure ne se trouvent pas à l'état naturel et leur production et leur cycle de vie sont à l'origine d'un grand nombre d'émissions grises. C'est pourquoi il est essentiel de trouver différents moyens de minimiser ces effets. L'un des moyens de minimiser la production de matériaux est le réemploi de matériaux de construction. Cette idée a été présentée par Catia Da Silva, qui a expliqué:

Le réemploi dans la construction consiste à récupérer des éléments de construction (par exemple : murs, dalles, fenêtres, portes, éviers, etc.) afin de les réutiliser dans la construction d'un autre bâtiment⁶⁰.

Ce type de recyclage est une excellente approche pour mon gratte-ciel, car il me permet de minimiser la production de nouveaux matériaux et les émissions qui en découlent, tout en contribuant à minimiser la destruction des matériaux d'autres bâtiments anciens. Comme la destruction d'un bâtiment entraîne l'émission d'une grande quantité de gaz à effet de serre, la réutilisation de ces matériaux réduira également cet effet néfaste sur l'environnement. Une

⁵⁸ Interview personnel avec Catia Da Silva, 2023

⁵⁹ Interview personnel avec Dr. Jaqueline Pauli, 2023

⁶⁰ Interview personnel avec Catia Da Silva, 2023

autre façon de transformer les matériaux en matériaux plus durables est d'utiliser des matériaux organiques biodégradables. Catia Da Silva explique :

Ceux-ci stockent du CO₂ et sont en général issus de gisements locaux (à proximité du chantier) afin de limiter les émissions CO₂ dérivées du transport des matériaux⁶¹.

Certains de ces matériaux peuvent être utilisés dans la structure ou l'isolation pour prévenir les dommages lorsque le bâtiment est démoli. Je pense que grâce au recyclage des matériaux et à l'utilisation de matériaux plus organiques, la production et le cycle de vie complet de mon gratte-ciel pourraient être optimisés pour l'environnement.

⁶¹ Interview personnel avec Catia Da Silva, 2023

4.3 Solutions

4.3.1 Panneaux solaires

Au fil des ans, les panneaux solaires ont été développés et optimisés pour produire autant d'électricité que possible, grâce à des cellules photovoltaïques qui reçoivent le rayonnement solaire sous forme de lumière pure et le transforment en énergie électrique. Ils sont de plus en plus utilisés comme solution durable dans des structures à hauteur en façade. Il existe quatre générations différentes de cellules photovoltaïques : la première utilise du silicium monocristallin⁶² et polycristallin⁶³ ou de l'arséniure de gallium⁶⁴. La deuxième génération se développe à partir de la première génération et crée des couches minces grâce à la technologie des cellules photovoltaïques. La troisième génération utilise des composés chimiques et des technologies plus récents qui utilisent des films nanocristallins ou des polymères organiques. Et la dernière, qui utilise des polymères en couches minces et des nanostructures inorganiques comme cellules à faible coût. La première génération de cellules photovoltaïques est la plus utilisée de nos jours et représente 90 % du marché. Elle comprend non seulement les cellules à base de silicium, mais aussi les cellules solaires à base de GaAs⁶⁵. Ces cellules ont un rendement de 30 % et une grande stabilité⁶⁶. Leur durée de vie de 18 ans signifie également que ces panneaux ne doivent pas être remplacés aussi rapidement. Grâce à la mobilité et à la vitesse élevée des électrons saturés, ses transistors⁶⁷ peuvent fonctionner à des fréquences de 250 GHz. Comme l'arséniure de gallium possède de larges bandes interdites, il est relativement insensible à la surchauffe et crée moins de bruit dans les circuits électroniques⁶⁸. Leur capacité de production électrique est de 10 kW/an par panneaux solaire.

⁶² Cristallisé en un seul cristal

⁶³ Cristallisé en plusieurs cristaux

⁶⁴ Composé semi-conducteur utilisé dans les panneaux solaires

⁶⁵ Arséniure de gallium

⁶⁶ Ncbi.nom.nih.gov, 2023

⁶⁷ Appareil semi-conducteur utilisé pour amplifier ou échanger les signaux électriques

⁶⁸ Sinovoltaics.com, 2023

4.3.2 Conception solaire passive

Fenêtres

Les fenêtres sont le principal atout ou inconvénient d'un bâtiment lorsqu'on parle de conception solaire passive. Elles permettent à la lumière du jour mais aussi au rayonnement solaire de pénétrer dans les espaces de vie, ce qui doit être contrôlé. Le moyen de réduire les apports de chaleur par les fenêtres est d'optimiser leur taille et leur orientation. Dr Jacqueline Pauli ajoute à cela :

Il s'agit souvent de ne pas construire de trop grandes fenêtres. Pour cela, il ne faut pas construire des fenêtres sur toute la façade, mais autant que nécessaire pour faire entrer suffisamment de lumière. Il y en a qui disent au moins « 50% de fenêtres et 50% de normal »⁶⁹.

Pour le climat modéré que l'on trouve à New York, il est conseillé d'installer des fenêtres de taille moyenne sur les murs opposés afin d'assurer une bonne ventilation transversale. Dans la mesure du possible, les fenêtres doivent être situées au sud, afin de bénéficier d'un maximum de chaleur pendant l'hiver. En été, il ne faut pas couvrir plus de 50 % des fenêtres au sud, ce qui entraînerait une perte de chaleur trop importante. Comme il s'agit d'un gratte-ciel, qui utilise des fenêtres pratiquement partout, dans le but de donner au propriétaire une expérience agréable, la " minimisation " de la structure des fenêtres peut être faite en plaçant des panneaux photovoltaïques à la place ou en ayant un matériau de masse thermique sur la façade.

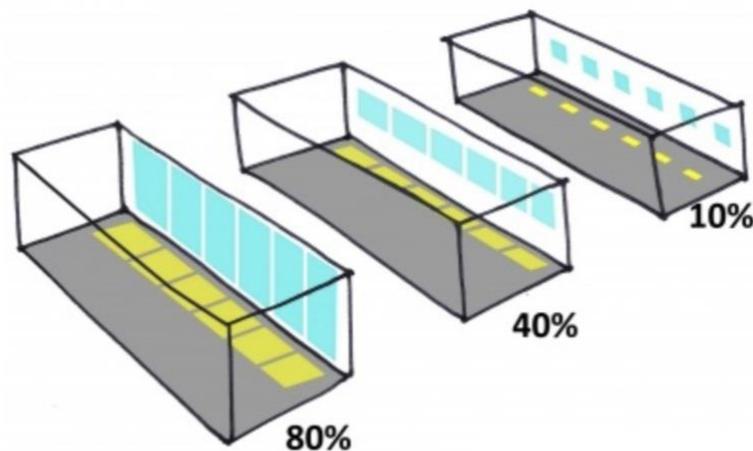


Illustration 9 : Ratio fenêtre et mur avec quantité de lumière.

⁶⁹ Interview personnel avec Dr. Jacqueline Pauli, 2023

La masse thermique

L'utilisation d'un matériau de masse thermique⁷⁰ est une des conceptions très utilisées pour la conception solaire passive. En été, la masse thermique peut absorber la chaleur présente dans l'air ambiant et, en hiver ou lorsque le soleil se couche, elle peut libérer l'air chaud lorsque la température de l'air ambiant diminue. Dans les deux cas, les températures des espaces intérieurs sont maintenues à un niveau optimal. Ces matériaux lourds sont généralement intégrés plus facilement au sol. C'est l'idéal car le soleil, surtout dans les espaces orientés au sud, frappe le sol presque en permanence. Les murs des espaces intérieurs, qui peuvent être en briques, en béton ou en pierre, constituent une masse thermique très efficace.

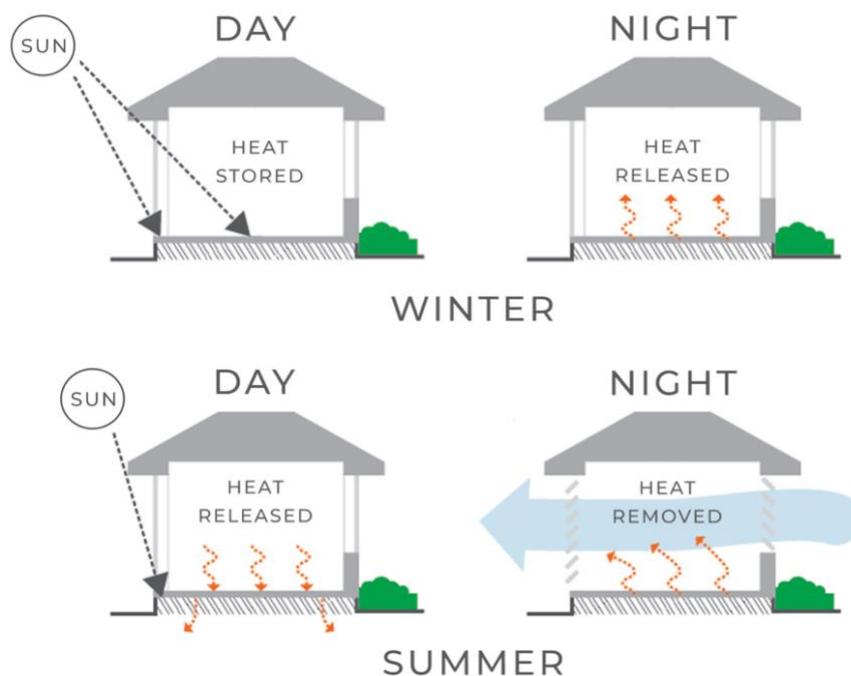


Illustration 10 : Explication de la masse thermique.

Forme et orientation

La forme et l'orientation d'un bâtiment pour une conception passive optimale sont souvent négligées. Leur importance réside dans le fait qu'elles affectent la quantité de lumière du jour reçue par un espace, la direction des vents et la quantité de lumière du soleil reçue par un espace. Le soleil est à un angle élevé pendant l'été, alors qu'il est à un angle faible pendant l'hiver. Dans les climats modérés, comme à New York, c'est le sud, hiver comme été, qui reçoit la plus grande quantité de lumière du soleil. Cela signifie que la conception du bâtiment doit permettre d'utiliser correctement la lumière du soleil en hiver, mais aussi de se protéger

⁷⁰ Propriété de la masse d'un bâtiment qui lui permet de conserver la chaleur et de la relâcher quand nécessaire

correctement de la lumière du soleil en été. Pour de tels climats, l'orientation est-sud est privilégiée car le bâtiment est exposé à la plus grande quantité de lumière du soleil. Il est également important que le bâtiment puisse profiter des vents pendant l'été et qu'il dispose d'un bon système de ventilation. Dans ce climat, les formes compactes des bâtiments sont préférées et leurs axes les plus longs doivent être orientés vers le nord et le sud.

L'ombrage

Pour un contrôle correct des systèmes de chauffage, de ventilation et de climatisation, l'ombrage est indispensable. Les dispositifs d'ombrage extérieurs et intérieurs sont très importants car ils réduisent les besoins mécaniques de refroidissement ou de chauffage. Ils limitent le gain de chaleur en bloquant le rayonnement entrant dans un espace. Pour obtenir le maximum d'efficacité et de contrôle sur l'ombrage, le meilleur système à utiliser est celui des dispositifs d'ombrage extérieurs mobiles. Les brise-soleils extérieurs sont moins efficaces car ils ne peuvent pas être déplacés en cas de changement de temps ; ils dépendent uniquement de la position du soleil. Pour un gratte-ciel qui fait face à un climat plus robuste, ce n'est pas l'idéal. De plus, le climat de New York est très varié, ce qui signifie que vous devez avoir le plus de contrôle possible sur l'ombrage. Les dispositifs d'ombrage intérieurs sont également moins fiables, car ils laissent toujours pénétrer la chaleur du soleil et dépendent fortement du comportement de l'utilisateur. Les dispositifs d'ombrage extérieurs mobiles sont donc les mieux adaptés. Les volets ou les écrans solaires, qui peuvent être retirés pendant l'hiver pour laisser entrer plus de lumière dans les espaces, peuvent être utilisés par exemple.

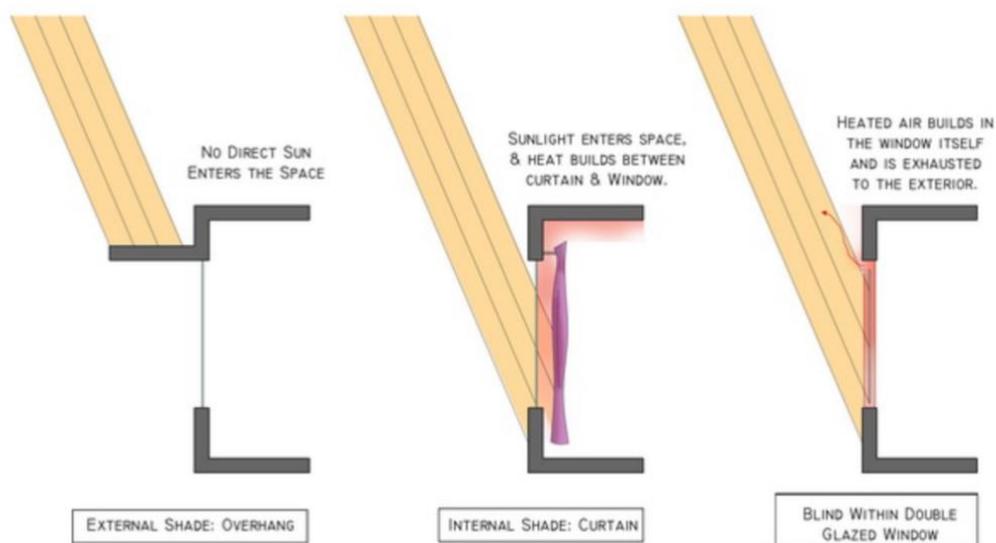


Illustration 11 : Systèmes différent d'ombrage.

L'isolation

L'isolation est un excellent moyen de réduire le transfert de chaleur entre l'intérieur et l'extérieur. Elle garantit une température intérieure confortable et constante en empêchant la chaleur d'être transférée aux espaces intérieurs par le biais des conditions thermiques. Différents matériaux peuvent être utilisés, les meilleurs ayant une conductivité thermique plus faible. Ces matériaux, tels que la cellulose, le coton, le polystyrène ou la mousse phénolique, sont également résistants au feu et à l'humidité. Certains d'entre eux peuvent cependant être toxiques et ont une énergie intrinsèque élevée, ce qui signifie qu'ils dégagent beaucoup de CO₂.

Système double façade

Le système de double façade est un système de ventilation composé de deux couches, généralement en verre, où l'air circule à travers l'espace. Ce système est très connu et souvent utilisé, notamment dans les gratte-ciels. En effet, la façade transparente ne gêne pas la vue et sert également d'isolation contre les températures extrêmes, les vents et le bruit. En les utilisant pour les gratte-ciels, les coûts de chauffage, de ventilation et de climatisation sont massivement réduits et le besoin de technologies spécifiques aux fenêtres est éliminé. L'aspect le plus louable de ce système est son adaptabilité aux différents climats grâce à l'ouverture et à la fermeture des ailettes d'entrée et de sortie ou à des circulateurs d'air actifs. En hiver, l'air peut être piégé à l'intérieur de la fente et donc réchauffer les espaces. Cela permet de réduire les coûts du système de chauffage. En revanche, en été, la fente peut être ouverte et permettre à l'air de circuler à l'intérieur et à l'extérieur. Cela se produit grâce à l'effet de cheminée, où la différence de densité de l'air crée un mouvement circulaire et pousse l'air chaud vers l'extérieur. Cette remontée d'air dans la fente crée une brise pour les fenêtres ouvertes environnantes.

4.3.3 Végétation

Une façon d'intégrer les plantes est de les placer sur le toit. Ces " toits verts " sont recouverts de végétation et dotés d'un système d'arrosage. Ces jardins sur le toit contribuent à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbaine en absorbant la chaleur environnante comme source de croissance de plantes. Ils aident également à contrôler la chaleur qui passe à travers le toit et dans les espaces intérieurs et agissent comme un réducteur de bruit. En absorbant l'eau de pluie, ils réduisent également le pourcentage d'eaux usées qui s'écoulent directement dans les réseaux d'égouts. Les plantations sont généralement constituées d'un support de culture léger, de plantes et d'une couche antiracinaire. Le système de toit vert extensif⁷¹ est le mieux adapté à la question de la durabilité, car il est généralement construit dans un souci de protection de l'environnement. Il a une épaisseur de 6 à 20 cm et sert de couche de protection pour les toits.



Illustration 12 : Différence entre toiture sans ou avec végétation.

On utilise des plantes nécessitant peu d'entretien, telles que des herbes, des graminées à faible croissance, des mousses et des plantes succulentes. Ce type de toit peut également être associé à des panneaux solaires, ce qui rend le toit plus frais et permet aux cellules de fonctionner plus efficacement. Ils produiront jusqu'à 16 % d'électricité en plus⁷². Cette végétation élimine également les polluants et les microparticules de l'air, qui pourraient potentiellement interférer avec les cellules photovoltaïques.

⁷¹ Fairconditioning.org

⁷² Fairconditioning.org

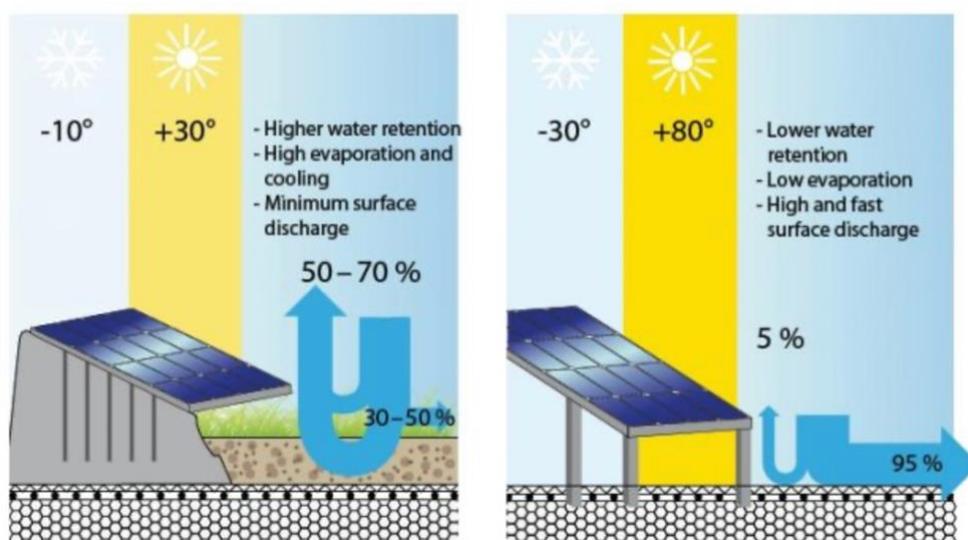


Illustration 13 : Différence entre des panneaux solaires avec ou sans végétation.

4.3.4 Matériaux

En recyclant les débris des bâtiments démolis, nous réduisons non seulement l'impact environnemental de la nouvelle construction, mais aussi les coûts du projet. La plupart des matériaux peuvent être recyclés afin de minimiser l'empreinte carbone du cycle de vie du gratte-ciel. Les matériaux tels que le béton, le bois, l'asphalte, les métaux et le verre sont souvent recyclés, et c'est de cela que les gratte-ciel sont principalement constitués. Si le recyclage n'est pas possible, l'utilisation de matériaux biodégradables devrait être la deuxième approche. Ceux-ci auront un impact moindre sur l'environnement et contribueront à créer un gratte-ciel plus durable tout au long de son cycle de vie. Parmi ces matériaux, on peut citer la cellulose, le chanvre ou la laine minérale pour l'isolation, ou encore la brique, le béton ou la pierre comme éléments structurels.

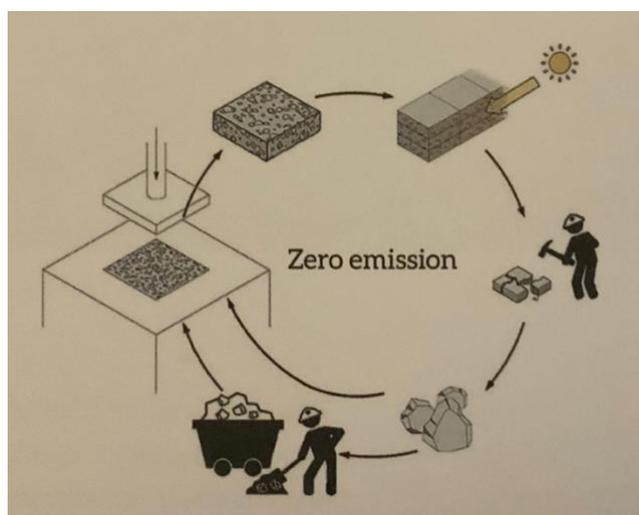


Illustration 14 : Recyclage des matériaux.

5. Projet architectural d'un gratte-ciel durable

5.1 Mon gratte- ciel

5.1.1 Inspiration

Pour ce projet, j'ai été fortement inspiré par l'architecte renommée Zaha Hadid. Zaha Hadid est une architecte irakienne et britannique qui a eu un impact considérable sur l'architecture de la fin du XXe siècle et du début du XXIe siècle. Elle est surtout connue pour ses concepts spéciaux innovants et sa vision futuriste de l'architecture. Ses créations s'inscrivent dans la catégorie du déconstructivisme radical et suscitent l'étonnement. Ses créations et ses styles m'ont beaucoup impressionnée et m'ont donné un sentiment d'émancipation féminine. Leurs formes arrondies s'inscrivent parfaitement dans le style futuriste que de nombreuses villes développent et dont je me suis inspirée pour mon projet.

5.1.2 Stage

Pour ce travail de Maturité, j'ai effectué un stage de trois jours à Lausanne au sein de l'entreprise Ferrari Architectes. Durant ces trois jours, j'ai donné vie à mon propre projet et j'ai utilisé des applications et technologies professionnelles pour dessiner et créer un gratte-ciel. Elodie Serrant m'a aidée tout au long de ces trois jours et tout au long de la création et m'a guidée. Le premier jour, j'ai discuté et dessiné sur papier quelques idées comme un brainstorming de ce que je voulais. J'ai également commencé à dessiner des plans d'étage possibles et j'ai appris à mettre à l'échelle et à dessiner avec une perspective correcte. Les deux autres jours, j'ai utilisé des programmes spéciaux et des applications sur l'ordinateur pour finaliser mes plans, tout en dessinant les esquisses finales de mon gratte-ciel. Cette étape m'a donnée un excellent aperçu du monde de l'architecture, car j'ai également pu visiter un chantier. Toutes ces expériences m'ont permis d'être mieux informée sur mon travail et sur ce que je voulais vraiment comme produit final.



Illustration 15 et 16 : Stage de trois jours chez Ferrari Architectes.

5.1.3 Sketch et dessins

Ces dessins montrent la conceptualisation de mon gratte-ciel et représentent le développement de mes visualisations. Les versions physiques de ces dessins se trouvent dans le deuxième dossier "Esquisses et plans du projet architectural".

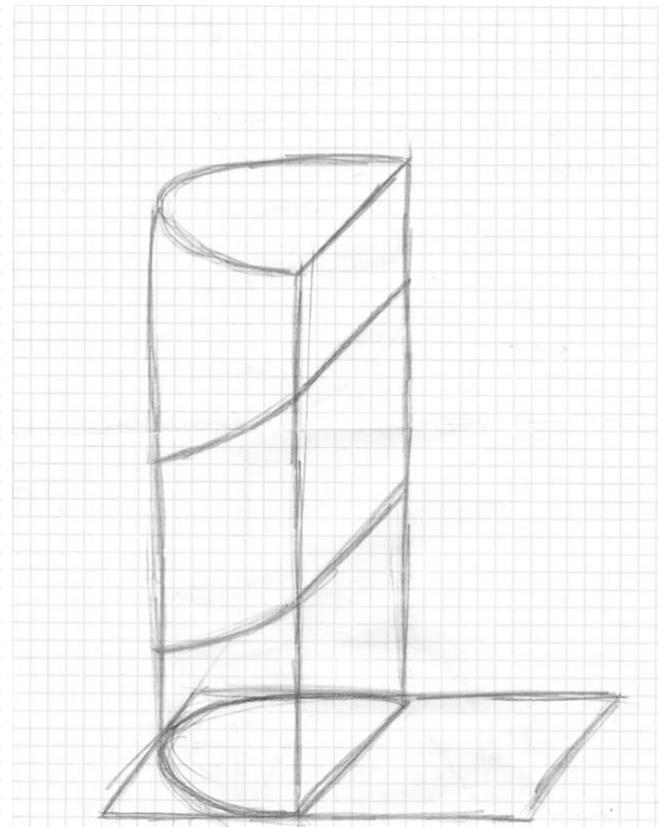
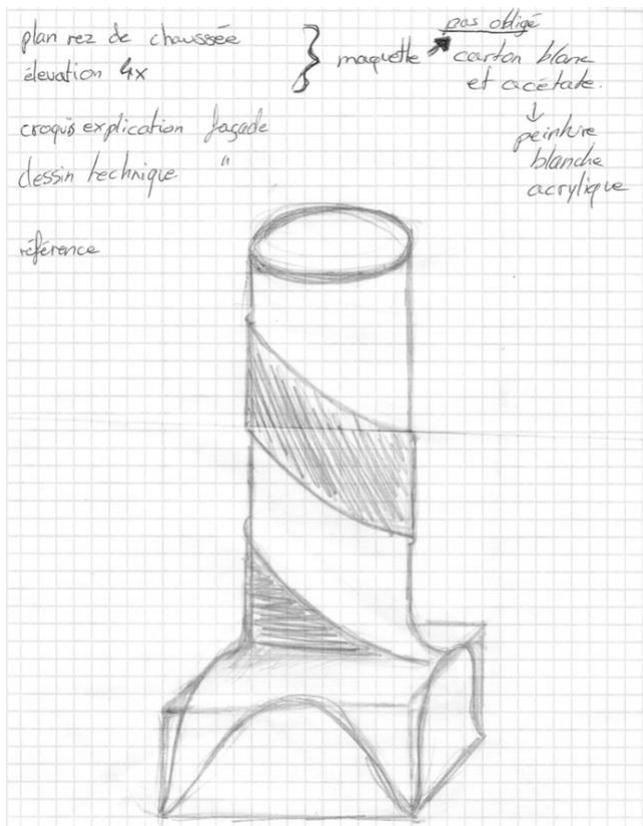


Illustration 17 et 18 : Sketch de la tour (avec panneaux solaires).

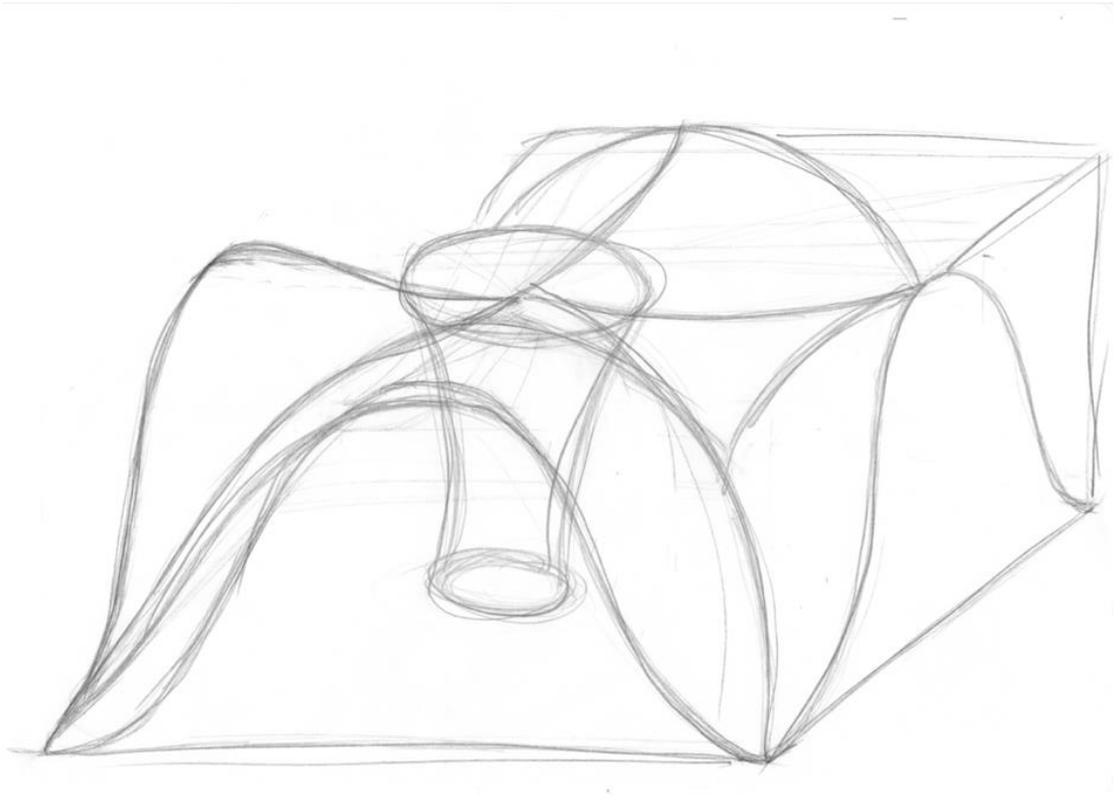


Illustration 19 : Sketch de debut de la base.

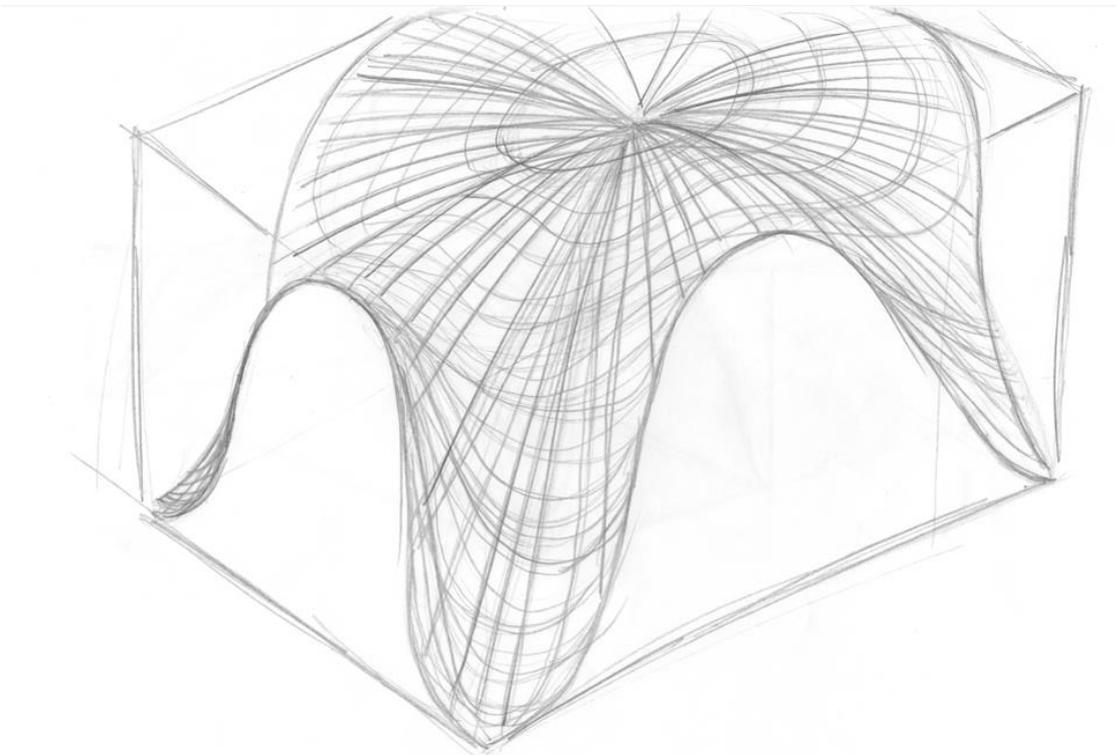


Illustration 20 : Sketch plus détaillé de la base.

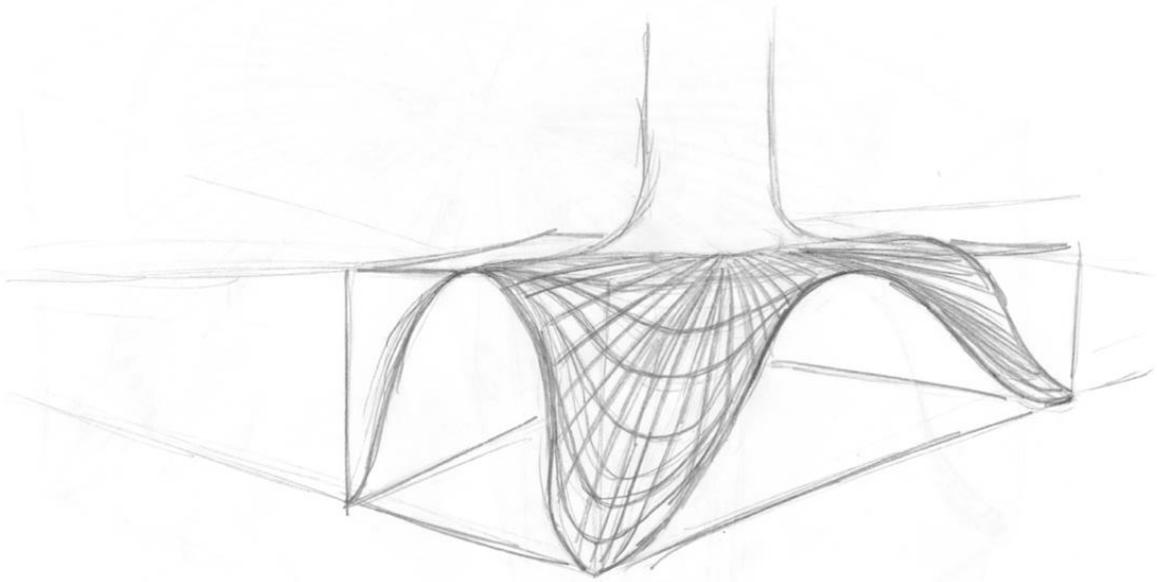


Illustration 21 : Sketch de la base avec attachment a la tour.

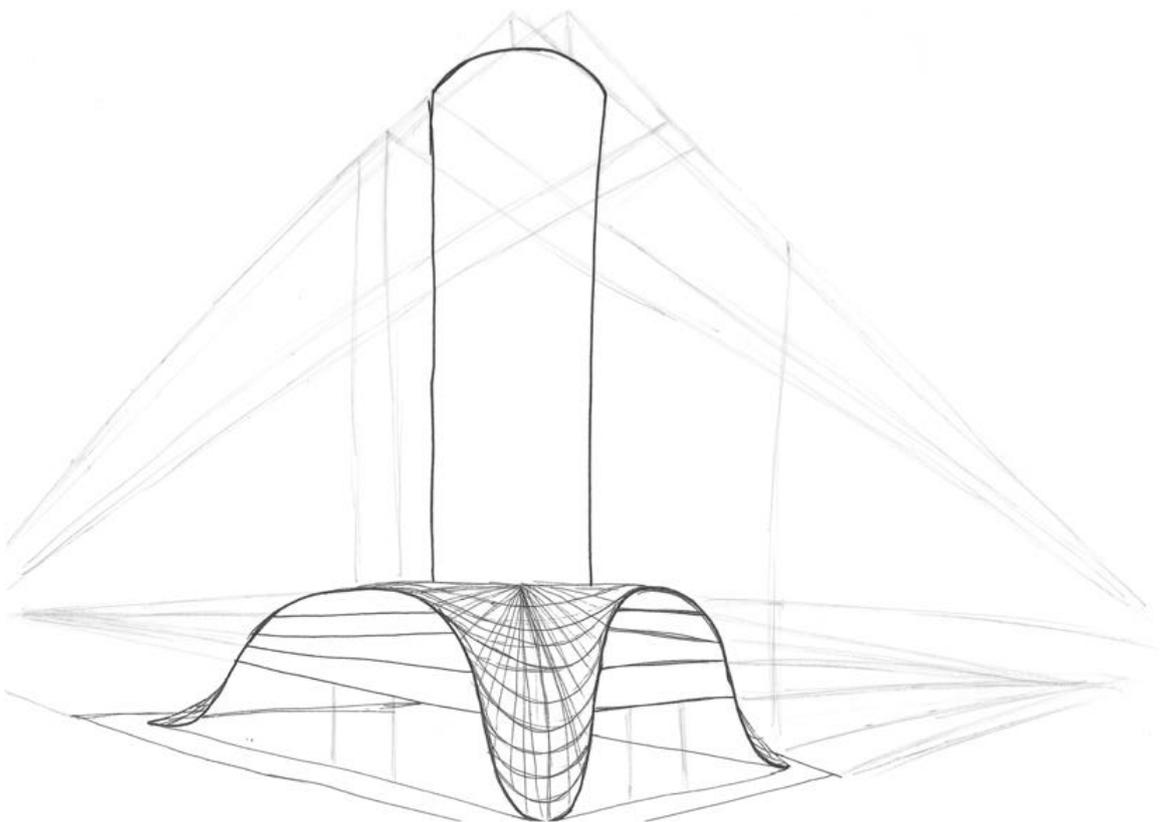


Illustration 22 : Sketch de tout le gratte-ciel.

5.1.4 Produit final

Mon gratte-ciel peut être divisé en deux parties: la base et la tour. La base est un carré qui prend la forme de vagues au fur et à mesure que la structure progresse. En raison de ce toit ondulé de la base, les façades du bâtiment sont arquées. Il compte au total quinze étages, dont les trois premiers constituent l'entrée. Les portes du bâtiment se trouvent sur deux façades opposées l'une à l'autre. L'étage de l'entrée sert de point d'information et deux ascenseurs, entourés d'escaliers circulaires, permettent d'accéder aux étages supérieurs. Les 12 étages qui se trouvent au-dessus de l'entrée pourraient potentiellement servir de bureaux, de restaurants ou d'appartements de luxe. Le toit est recouvert d'une végétation extensive, où l'on trouve des plantes grasses, de la mousse et de l'herbe. La tour, quant à elle, abrite tous les espaces de vie. Chaque étage a été conçu pour accueillir un penthouse, mais il est possible de s'adapter et d'avoir plus d'un espace de vie par étage. La tour a une forme circulaire et possède de grandes fenêtres pour offrir une vue optimale. Les panneaux solaires sont montés sur la façade en forme de bande et font le tour de la tour une fois. Il y a également une petite zone de pierre sur la façade où la bande de panneaux solaires commence et se termine. Sur le deuxième toit, nous avons un deuxième système de plantes étendu, en particulier des plantes grasses, de la mousse et de l'herbe.

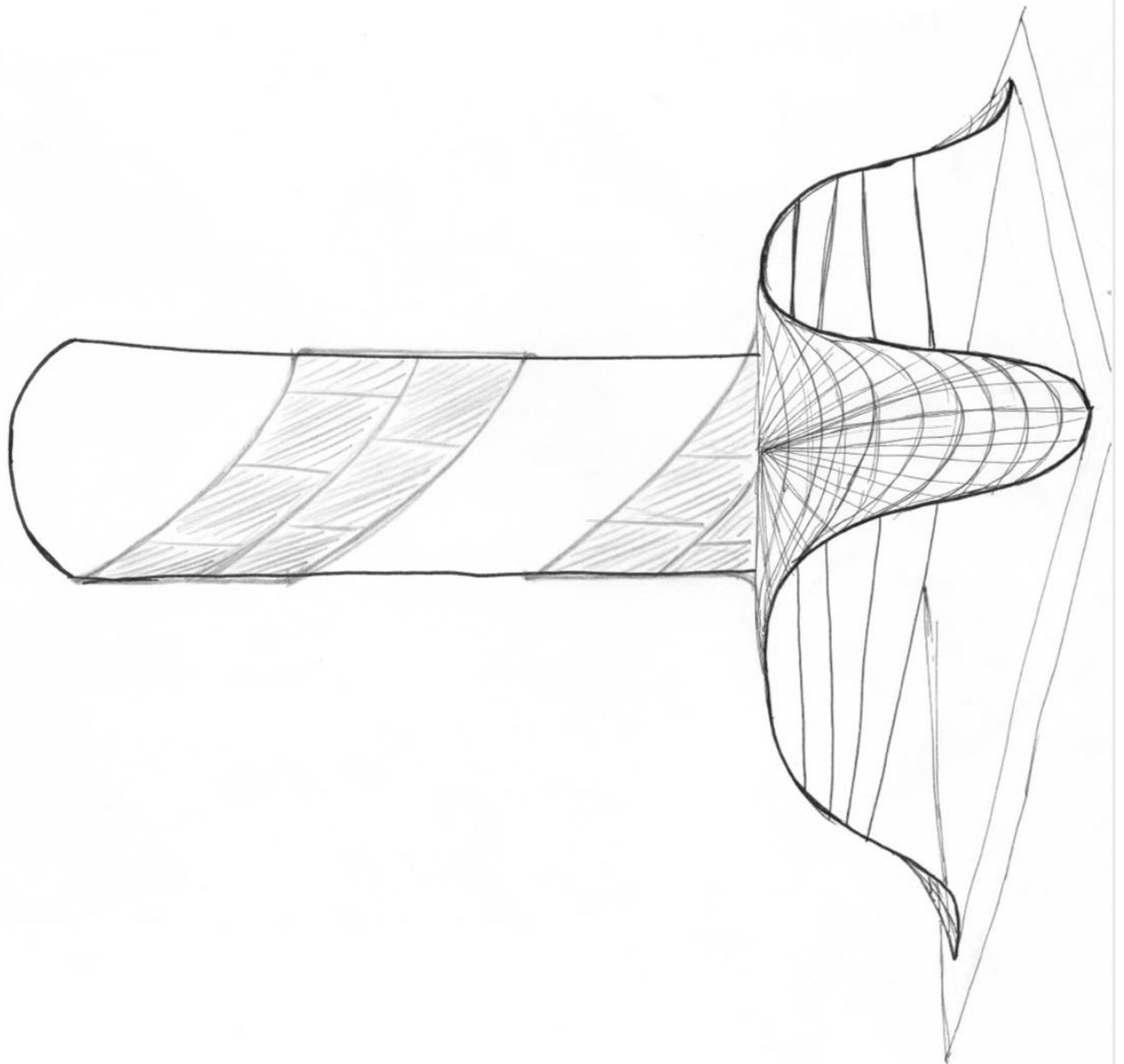


Illustration 23 : Dessin final de mon gratte-ciel.

5.1.5 Coupe écologique

1. Panneaux solaires sur la façade et le toit

Selon une étude de cas sur l'énergie et les bâtiments rédigée par B. Howard et J. Thompson, un immeuble résidentiel de 1 à 4 familles consomme 49,2 kWh/m² ⁷³.

Cela signifie qu'en une journée, ils utilisent 1 180,8 kWh/m². Si l'on utilise ces chiffres et qu'on les applique aux mètres carrés de l'un de mes appartements, on obtient une dépense énergétique quotidienne de :

$$1'180.8 * 707 = 834'825.6 \text{ kWh}$$

Par appartement, d'une superficie de 707 m², 834'825.6 kWh sont utilisés en une journée. La tour entière a donc besoin de 42 576 105,6 kWh pour s'alimenter en électricité pendant une journée entière. Les panneaux d'arséniure de gallium devraient produire 180 W/m² ⁷⁴ par heure. Cela signifie qu'en une journée, ils peuvent produire 4 320 W/m², ce qui donne 103,68 kWh/m². Il est évident qu'un seul panneau ne suffit pas à alimenter un appartement entier. Si l'on utilise ces chiffres et qu'on les applique aux mètres carrés que l'on trouve dans l'un de mes appartements, il faudrait :

$$\frac{834825.6}{103.68} = 8'052$$

Pour alimenter un appartement, et donc un étage, il faut 8 052 m². Comme il y a 51 étages, il faut donc 410'652 m² de panneaux solaires pour alimenter l'ensemble du bâtiment résidentiel. Malheureusement, la surface de la tour n'est que de 15'928 m², ce qui signifie que l'ensemble du bâtiment ne peut pas être alimenté uniquement par ces panneaux solaires. Cependant, comme prévu, une partie des appareils peut être alimentée par ces panneaux solaires GaAs, qui restent donc très utiles. C'est pourquoi, pour ma tour, j'ai décidé de les placer non seulement autour de la façade afin d'obtenir le plus de lumière possible, mais aussi sur le premier toit.

2. Plantes sur le toit

Pour intégrer le plus de végétation possible dans mon bâtiment, j'installerai de vastes systèmes de plantation sur les deux toits. Cela signifie que l'on trouvera des plantes telles que des

⁷³ Sciencedirect.com, 2023

⁷⁴ Space.nss.org, 2023

plantes grasses et de la mousse, ainsi que différents types d'herbes. Comme sur le premier toit il y a aussi des panneaux solaires, la végétation qui les entoure aidera à l'absorption de l'énergie solaire pour la production d'électricité.

3. Structure en pierre sur la façade

Pour apporter un peu plus d'ombre et atténuer la présence du verre, une " bande " de roche longera la façade de la tour. Il s'agira d'une couche de torchis, un type de pierre que l'on trouve dans la nature et qui agit comme une masse thermique. Il s'agit également d'un matériau organique dont l'utilisation ne nuit pas à l'environnement.

4. Plancher et murs à masse thermique

5. Dispositif d'ombrage extérieur

Pour un contrôle maximal de l'ombrage, tous les appartements sont équipés de systèmes d'ombrage extérieurs mobiles.

6. Double façade

Le système de double façade est mis en œuvre partout où il y a du verre afin de maximiser les avantages de la ventilation.

7. Isolation

Toute isolation nécessaire et ajoutée sera constituée de matériaux biosourcés tels que la cellulose, le chanvre ou l'isolation en laine minérale de pierre afin de réduire les matériaux toxiques ou les déchets.

8. Matériaux recyclés

Tout élément structurel tel que le béton, l'acier ou le verre sera recyclé afin de réduire les émissions de CO2 lors de la création du matériau.

9. Matériaux biodégradables

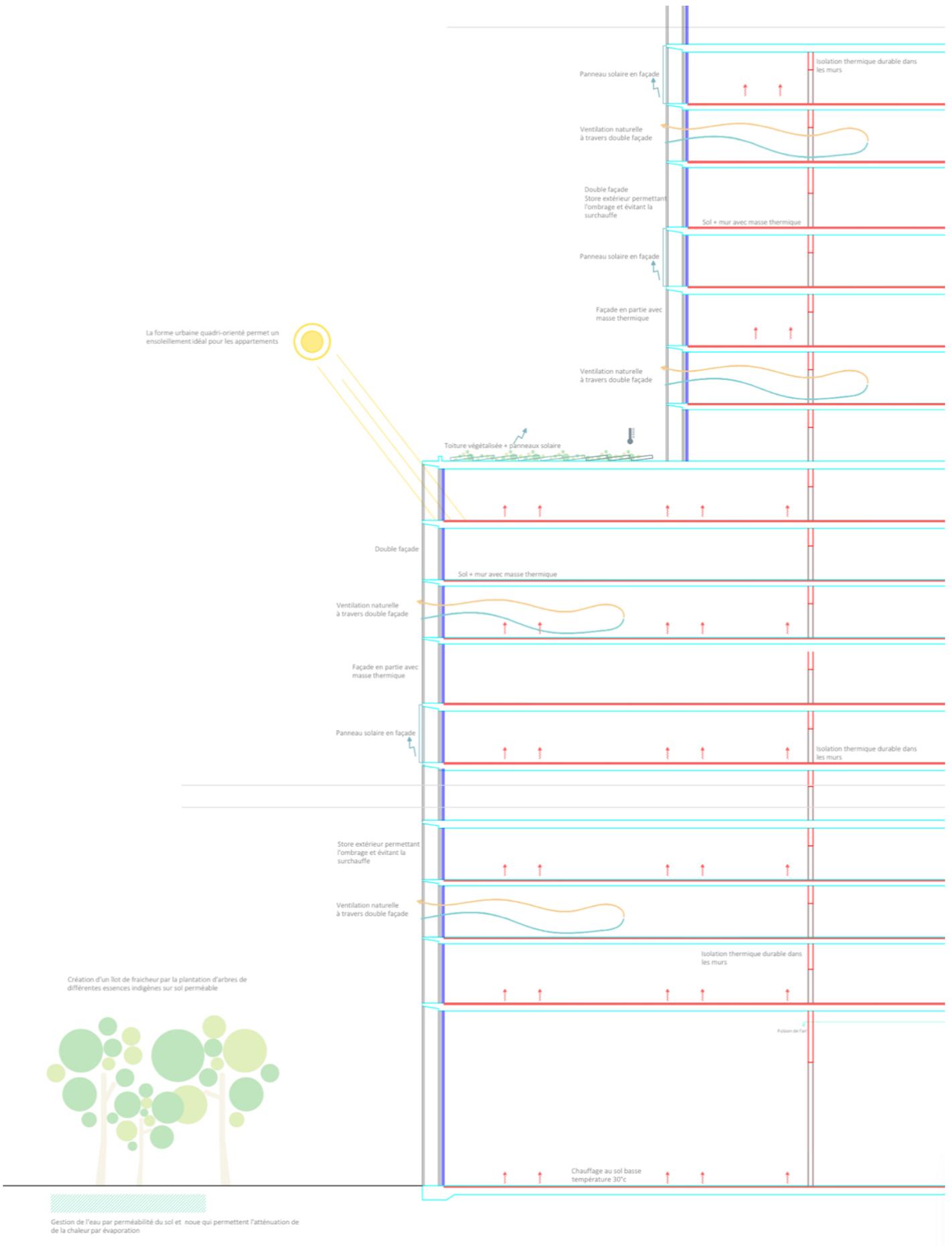


Illustration 24: Coupe écologique partie 1.

La forme urbaine quadri-orienté permet un ensoleillement idéal pour les appartements

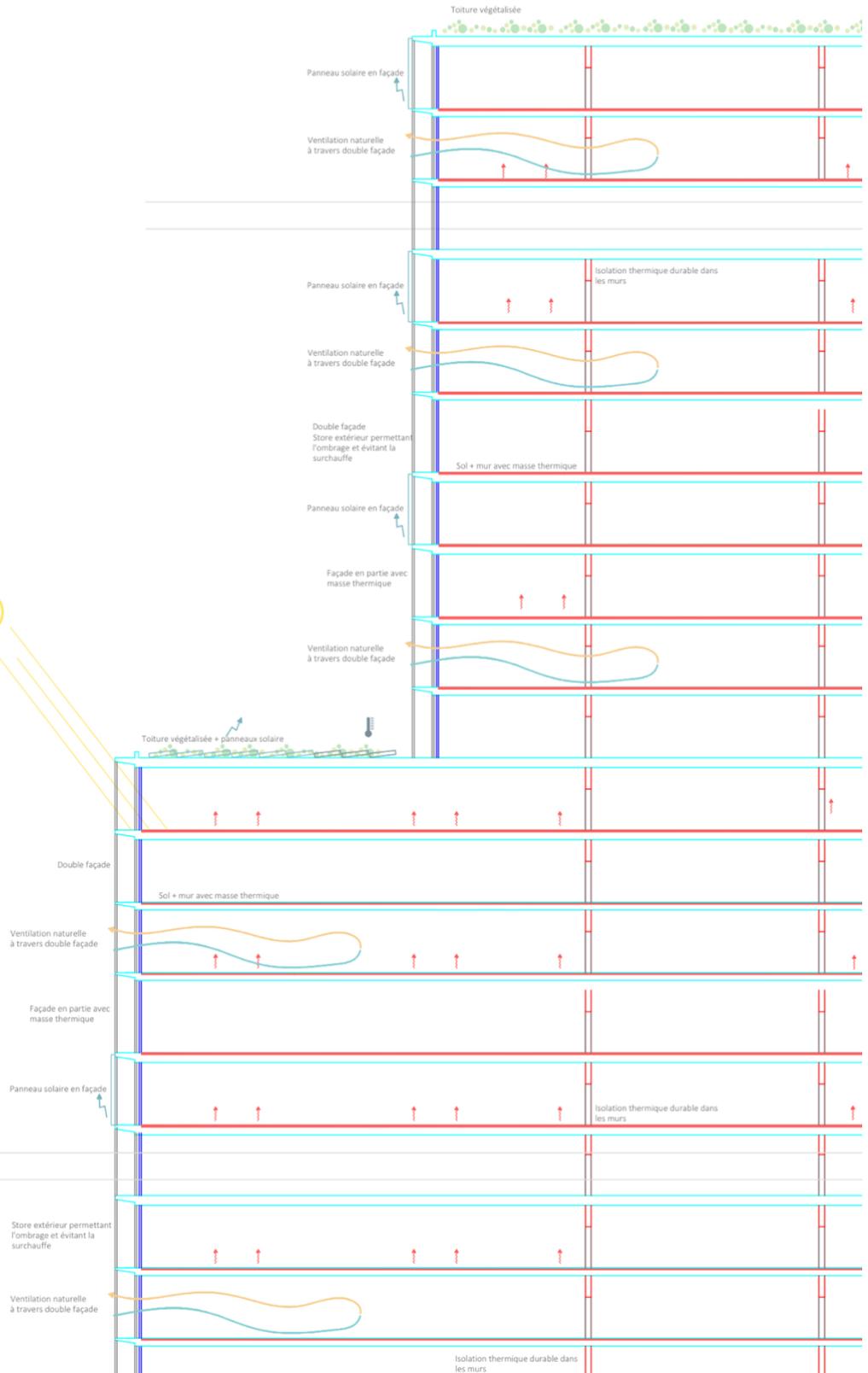
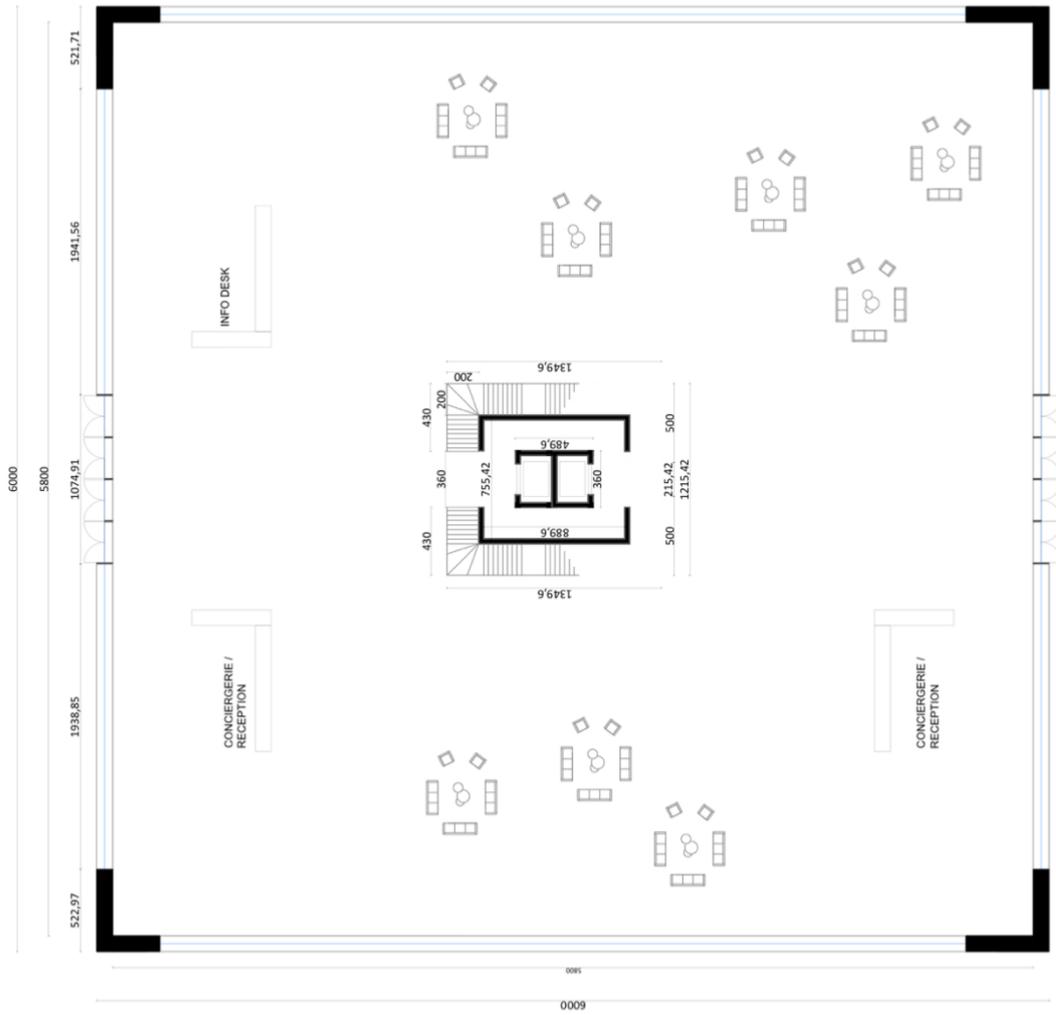


Illustration 25 : Coupe écologique partie 2.

5.1.6 Plans de bâtiments

Ces plans sont censés représenter ma vision de ce à quoi pourrait ressembler mon gratte-ciel. Il s'agit des plans des appartements possibles dans la section " tour " et de l'étage d'entrée. J'ai fait de l'appartement un penthouse, mais deux ou trois appartements, voire plus, pourraient tenir sur un étage, afin d'accueillir le plus grand nombre de personnes possible. Ces deux plans ont été réalisés professionnellement chez Ferrari Architectes. Les repères numériques sur les plans sont mesurés en centimètres et sont à l'échelle de la réalité.



TOUR Plan rez de chaussée	Plan N°	REZ
	Echelle	1:200
	Format	A3
	Date	30.09.2023

Illustration 26 : Plan de rez de chaussée.

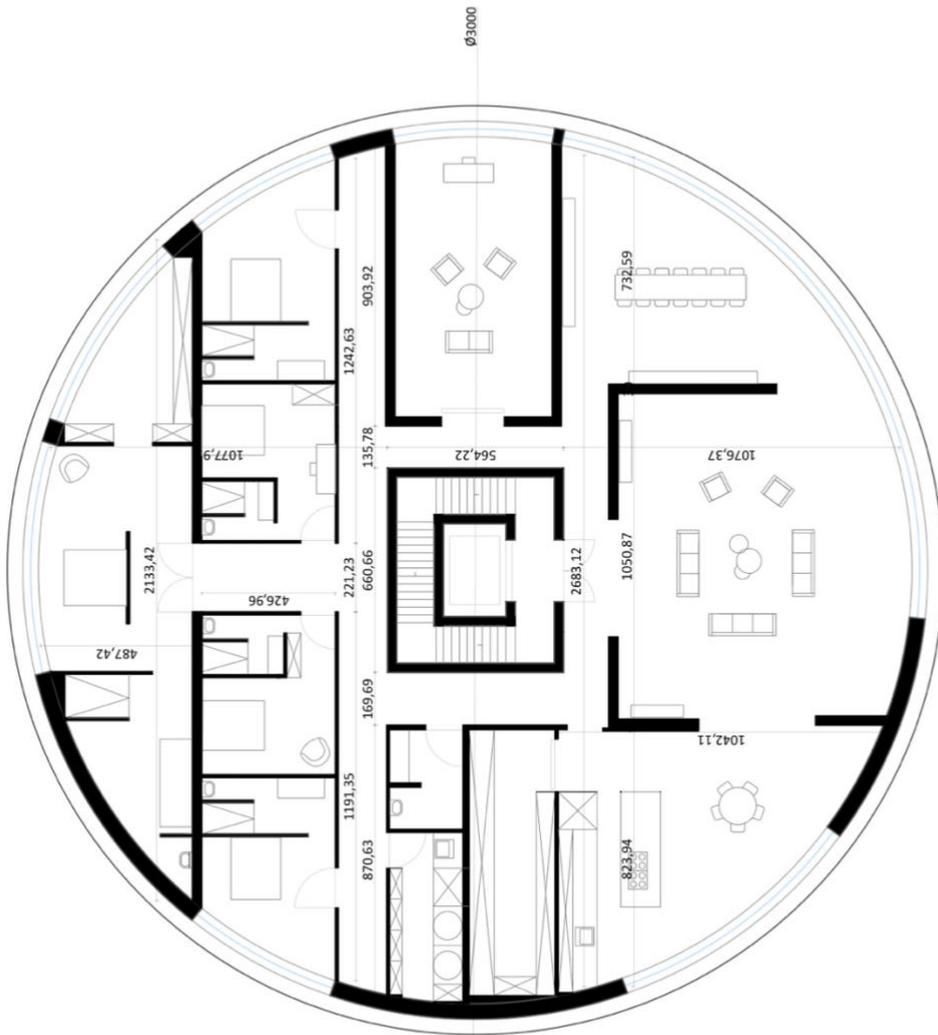


Illustration 27 : Plan de penthouse.

TOUR Plan rez. de chaussée	Plan N°	rez
	Echelle	1:100
	Format	A3
	Date	30.09.2023

5.2 Ma maquette

5.2.1 Dimension

Pour la mise à l'échelle, j'ai décidé d'utiliser une échelle de 1:200, ainsi dans la réalité, 1 mètre représente 200 mètres. J'ai choisi de faire un gratte-ciel de 200 mètres de haut parce que j'avais l'impression que c'était la taille parfaite, alors que personnellement, je commence à définir les gratte-ciels à environ 100 mètres. 100 mètres me semblait assez simple et plutôt petit, mais au-delà de 200 mètres, j'avais l'impression que j'allais être confronté à tous les problèmes, mais à une plus grande échelle. J'ai conçu le gratte-ciel en deux parties et j'ai mis à l'échelle tout ce qui allait être visible sur la maquette. Comme l'échelle 1:200 n'offre pas beaucoup de détails sur la maquette, les seuls aspects qui allaient être pré-représentés étaient les étages. Pour mettre à l'échelle les tailles et les dimensions, j'ai utilisé la formule suivante :
x = mètres en centimètres :

$$X * \frac{1}{200}$$

Ex. La base du carré est de 60m x 60m, donc en centimètres elle serait x = 6'000cm. En utilisant la formule ci-dessus, la base du modèle devrait être:

$$6'000 * \frac{1}{200} = 30 \text{ cm}$$

J'ai fait des croquis pour chaque pièce qui devait être mise à l'échelle, puis je les ai redessinés avec les mesures correctes pour le modèle, afin de ne pas m'embrouiller et d'avoir toutes les mesures à portée de main.

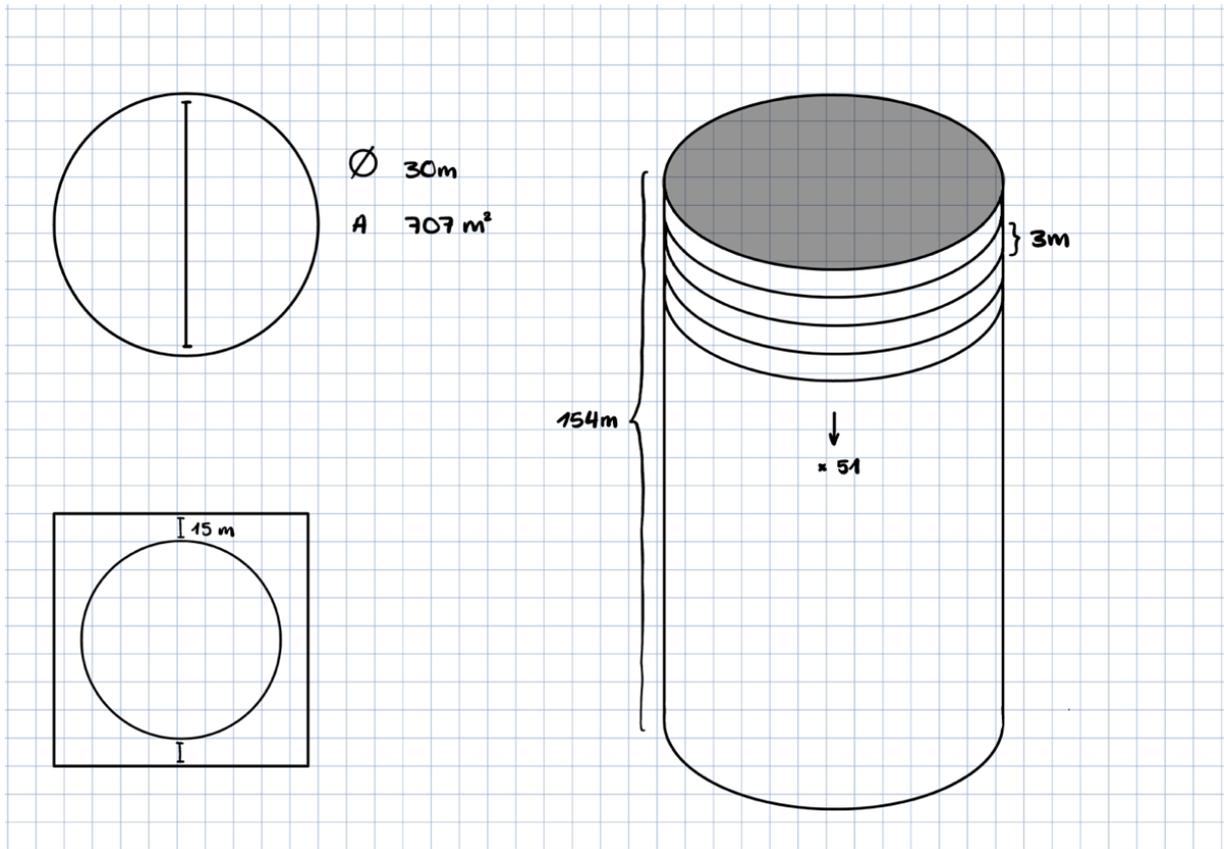


Illustration 28 : dessin et dimension en taille réelle (tour).

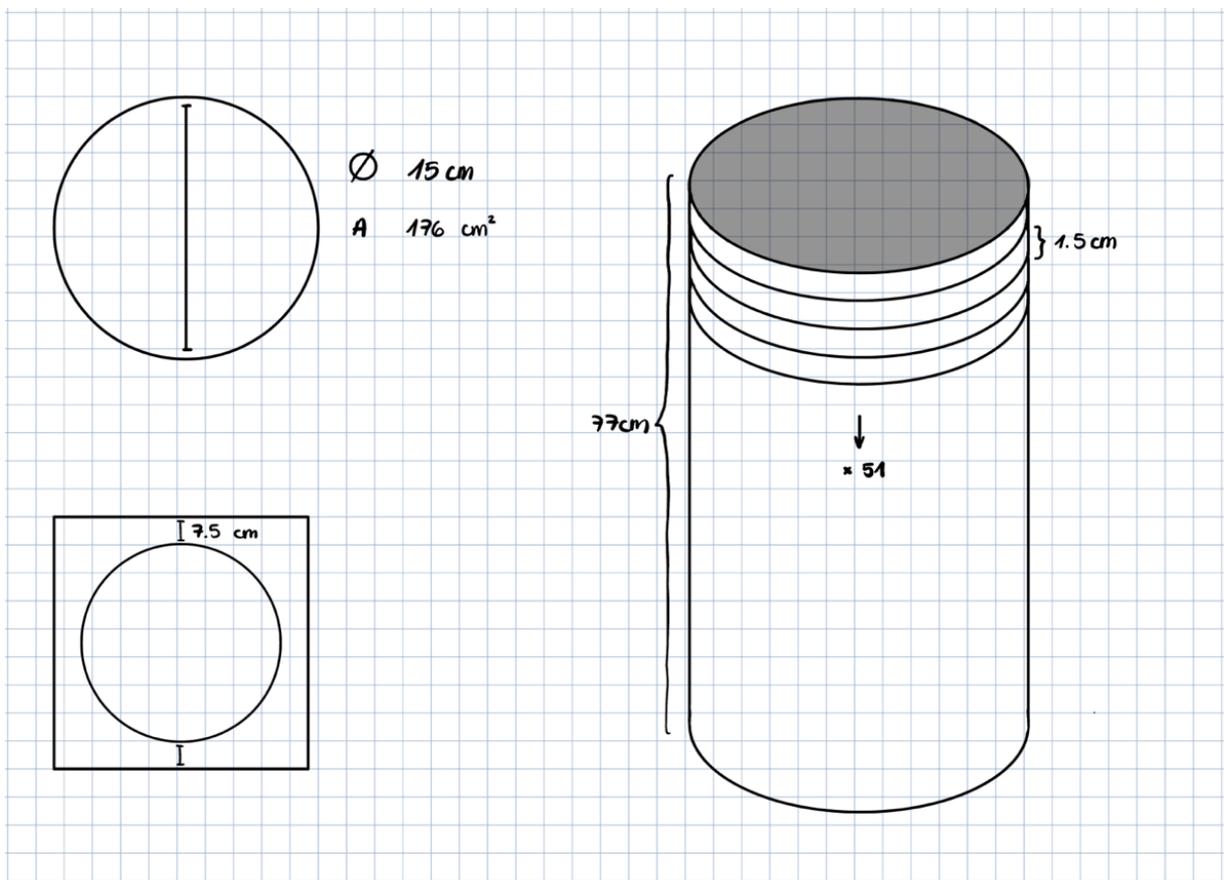


Illustration 29 : dessin et dimension en taille pour maquette (tour).

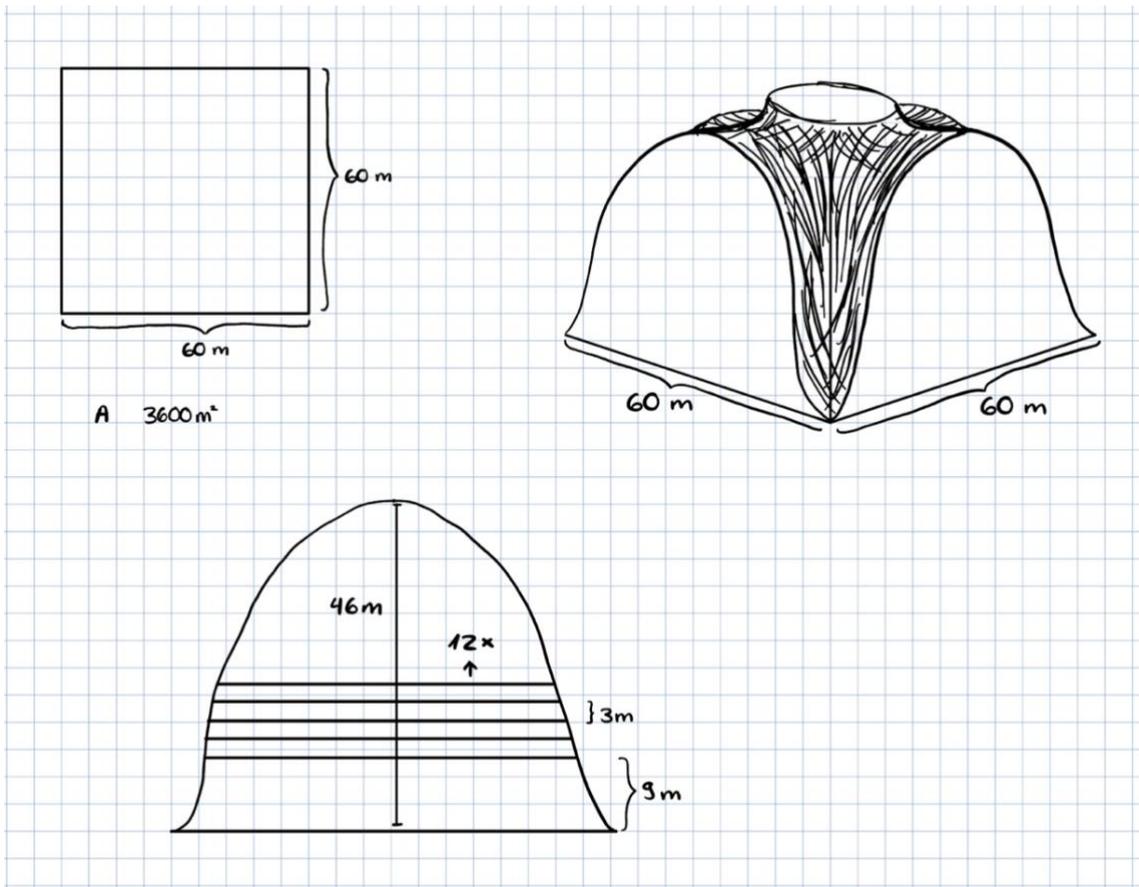


Illustration 3 : dessin et dimension en taille réelle (base).

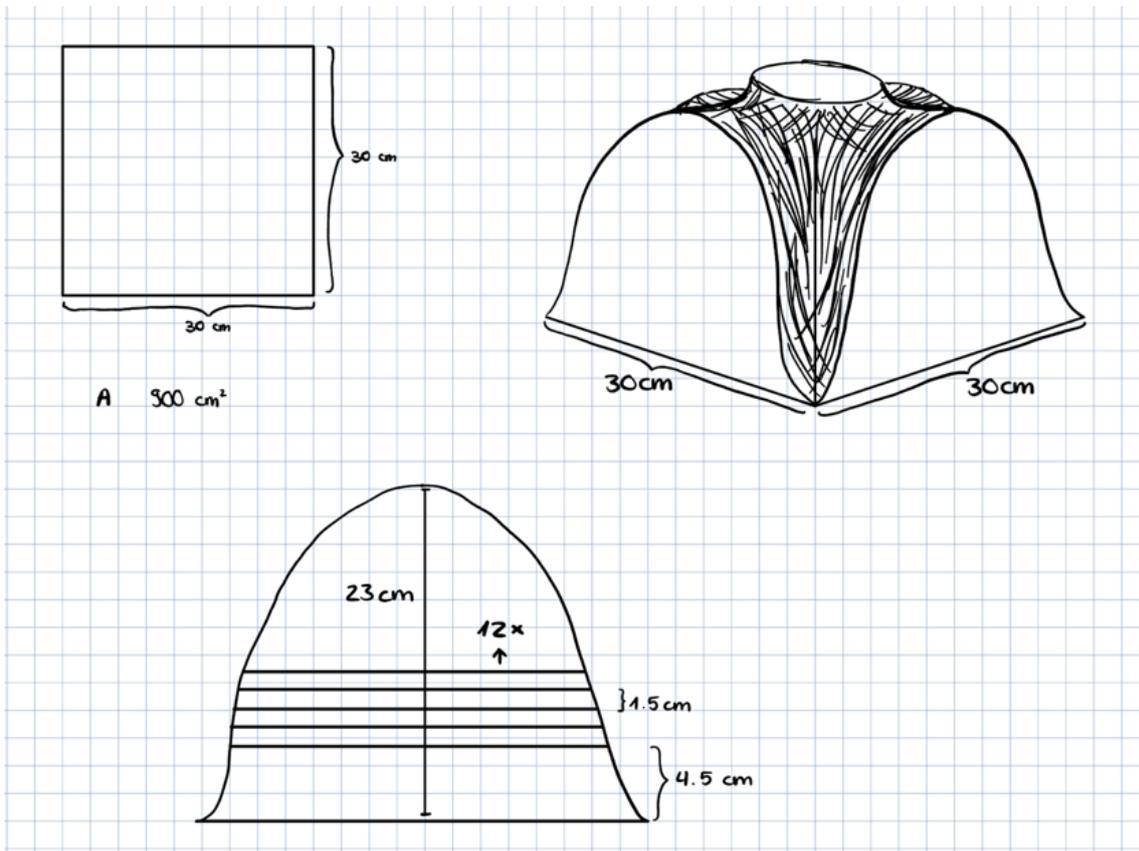


Illustration 31 : dessin et dimension en taille pour maquette (base).

5.2.2 Matériel

Ceci sont les matériaux que j'ai décidé d'utiliser

- 11 x cylindres en polystyrène (7 cm de hauteur et 15 cm de diamètre)
- 6 planches en polystyrène (100cm x 50cm x 1cm)
- Cartons minces
- Papier
- Papier maché
- Plexiglas
- Végétation en plastique
- 6 x colle universelle (250ml)
- Colle chaude et pistolet à colle chaude
- Couteau à découper

5.2.3 Processus

Cette documentation est censée montrer et expliquer comment j'ai procédé pour créer mon modèle. À l'aide de mes croquis, j'ai divisé le modèle en deux parties, que j'allais finalement coller ensemble, à savoir la base et la tour. J'ai décidé de modéliser d'abord la tour, puis la base, car cette dernière était plus complexe et nécessitait plus de temps de réflexion et de création.

- J'ai d'abord empilé les 11 cylindres et les ai collés ensemble pour créer la tour. Les cylindres en polystyrène avaient exactement 15 cm de diamètre, ce qui, à l'échelle, donne 30 mètres et une hauteur exacte de 77 cm. C'était également la hauteur exacte nécessaire pour que l'échelle 1:200 soit correcte. Pour ces raisons, j'ai choisi de les utiliser car elles s'adaptèrent parfaitement et ne nécessitaient que peu ou pas de retouches, tout en formant un grand cylindre symétrique. Pour les coller correctement, j'ai utilisé du papier entre les deux, car le polystyrène ne colle pas aussi bien s'il n'y a pas de papier. Cette astuce m'a été donnée par l'architecte Elodie Serrant.



Illustration 32 : Cylindres composant la tour.

- Après les avoir collés, j'ai découpé 51 bandes de carton fin d'une largeur de 1,5 cm pour entourer le grand cylindre. Leur but était de montrer les différents étages et leur nombre. Comme l'échelle 1:200 ne permet pas de faire beaucoup de détails, les bandes ont été laissées intactes et ne comportent aucun dessin. L'utilisation du carton blanc fin était l'option idéale car c'était un carton assez dur pour donner une belle finition, mais il n'était pas trop robuste pour qu'on ne puisse pas le plier autour du cylindre.
- Pour finir, j'ai ajouté un plexiglas pré-courbé autour de l'objet, d'une longueur de 50 cm. Cela représentait les fenêtres en verre, ce qui donnait une belle finition. Les 50cm se sont avérés un peu trop courts, ce qui n'était pas un problème car un morceau de carton était prévu pour recouvrir une partie du plexi (dans le cadre d'une application écologique). J'ai donc fini par couvrir le petit trou créé par la brièveté du verre.
- Après avoir terminé la tour, j'ai commencé à construire la base. A l'origine, j'ai découpé des plaques de polystyrène de 25 cm x 25 cm, car l'idée de départ était de faire 50 m x 50 m dans la réalité. Comme il n'y avait pas de carrés prédéfinis avec ces dimensions, j'ai dû découper 23 carrés et les superposer (chacun d'eux mesurant 1 cm de large). Mais une fois cela fait, par rapport à la tour, j'ai trouvé que c'était relativement petit et esthétiquement pas beau. C'est pourquoi j'ai ajouté 5 centimètres de planche de chaque côté pour en faire un carré de 30cm x 30cm. Les carrés ont été coupés à une hauteur de 23cm pour correspondre à l'échelle et lui permettre d'avoir une hauteur réelle de 46 mètres. Ils ont également été collés ensemble avec de la colle universelle et des morceaux de papier entre les deux.



Illustration 33 : Base et tour mise ensemble comme teste.

- Une fois le cuboïde de 30 cm x 30 cm x 23 cm obtenu, j'ai pu commencer à lui donner la forme souhaitée. J'ai utilisé un couteau à découper et j'ai commencé par les bords, puis j'ai pénétré plus profondément dans le cuboïde. Pour m'aider à me guider un peu, j'ai dessiné un arc sur tous les côtés, afin de montrer où je devais m'arrêter. Sur le dessus, j'ai également tracé quelques lignes pour me guider là où je devais couper et là où je ne devais pas couper. J'ai pensé que pour cette forme, le seul matériau facile à manipuler était le polystyrène, car il est facile de le couper et de le façonner. C'est pourquoi j'ai découpé des carrés dans les plaques de polystyrène.



Illustration 34 : Lignes tracées comme aide.



Illustration 35 : Forme finale de la base.

- Une fois la forme acquise, j'ai découpé des morceaux de carton fins en forme d'arcs afin d'avoir une couche à poser sur les côtés en polystyrène de la base. J'ai dessiné les différents étages et les portes sur le carton avec un marqueur noir, puis je l'ai collé sur les côtés avec de la colle universelle et du papier entre les deux. Cette touche a donné une belle finition à l'ensemble de la base.
- Comme le toit semblait très rugueux, en raison des morceaux de polystyrène découpés, j'ai décidé d'utiliser du papier mâché pour le recouvrir. Une fois sec, cela a donné au toit de la base l'illusion qu'il était fait de gypse. J'ai utilisé du papier blanc plutôt que du papier journal, comme c'est habituellement le cas, afin que le produit fini paraisse plus soigné. J'ai également découpé du plexiglas de la même forme et je l'ai fixé au carton avec de la colle chaude. Je l'ai fait pour représenter les fenêtres.



Illustration 36 : Forme de base avec papier mâché sur toit.

- Une fois le papier mâché sec, j'ai ajouté les fausses plantes vertes sur les deux toits de la base et de la tour. J'ai également ajouté un peu de couleur orange, car nous sommes actuellement dans la saison de l'automne et je voulais l'adapter à cette saison. Je voulais également ajouter quelques couleurs au vert, afin de le rendre plus vivant et plus attrayant. J'ai collé la tour et la base ensemble avec de la colle chaude et, une fois secs, j'ai ajouté les panneaux solaires. J'ai découpé des morceaux de carton noir et je les ai attachés à un morceau de verre droit. Je l'ai enroulé autour de la tour et je l'ai collé avec de la colle chaude aux endroits les plus vulnérables. J'ai fini par couvrir la zone qui n'était pas couverte de plexiglas autour de la tour, en raison de sa brièveté, avec un autre morceau de carton droit qui représentait une application écologique.



Illustration 37 : Maquette finale.

5.2.4 Réflexion

La création du modèle s'est bien déroulée. Je suis très satisfaite du résultat, en particulier de la base, dont la forme était assez complexe. Je pense que l'ensemble du modèle fonctionne bien et que le blanc lui donne un aspect futuriste agréable. Je suis également satisfait de la façon dont les appareils écologiques supplémentaires sont représentés et de la façon dont ils relient le modèle. Je n'avais pas de plan ni d'instructions qui auraient pu m'aider, donc avec le peu de conseils que j'ai reçus à ce sujet, je pense que j'ai fait du bon travail. Je pense que j'ai également choisi la plupart des matériaux appropriés pour un tel projet, mais le polystyrène a été un véritable casse-tête. Il y a eu beaucoup de dégâts et le nettoyage a pris beaucoup de temps. En outre, il a fallu faire un travail supplémentaire avec le papier mâché pour que le polystyrène découpé n'ait pas l'air aussi rugueux. Il aurait été difficile de trouver un autre matériau aussi facile à utiliser, de sorte que les options étaient assez limitées. J'aurais également aimé disposer d'un matériau un peu plus souple, afin d'obtenir des surfaces plus courbes, notamment à l'endroit où la tour rencontre la base.

6. Conclusion

6.1 Résumé

L'architecture est un art fascinant, qui combine une chronologie historique et des visions futuristes. Le gratte-ciel officiel a été inventé il y a plus d'un siècle et revêt aujourd'hui une grande importance pour de nombreuses nations. Avec la course au plus haut bâtiment du monde, le gratte-ciel a pris aujourd'hui un rôle symbolique important, représentant la richesse et le développement. Nous avons assisté à une augmentation massive de la construction de ces bâtiments pour diverses raisons. Comme nous l'avons mentionné, il y a un raisonnement symbolique et psychologique derrière cela, qui donne un sentiment d'accomplissement et d'étonnement. En outre, ils offrent de nombreuses solutions aux problèmes sociaux, économiques et démographiques, et répondent à de nombreux besoins futuristes. Leurs avantages sont reconnus dans le monde entier et ils ont une place certaine dans notre avenir. Cela étant dit, ils ont suscité de nombreuses controverses quant à leurs inconvénients pour l'environnement et la société. En prenant ce fait en considération et en essayant de résoudre ce débat controversé, je me suis posé la question suivante : "Existe-t-il un moyen de rendre les gratte-ciel plus durables du point de vue de l'environnement ? C'est là que j'ai commencé mes recherches en approfondissant ma compréhension de ce qu'est un gratte-ciel, de la manière dont il est construit et de ses principaux éléments. Comme il n'existe pas de définition officielle de ce qu'est un gratte-ciel, une définition a été élaborée à partir d'une multitude de points de vue. Dr. Kurt Teichert, Dr. Jacqueline Pauli et l'architecte Catia Da Silva, m'ont permis de mieux comprendre les problèmes environnementaux et leurs causes. Les principaux problèmes sont la production et l'émission de CO₂ pendant le cycle de vie du bâtiment et de ses matériaux, l'ombre qu'ils font aux autres bâtiments et la chaleur supplémentaire qu'ils dégagent, créant ainsi des îlots de chaleur urbains plus importants. Tous ces problèmes devaient être minimisés autant que possible grâce à des systèmes durables éprouvés. Bien qu'ils ne puissent pas couvrir la totalité des besoins en électricité de l'ensemble du bâtiment, les panneaux solaires GaAs se sont avérés très utiles pour générer partiellement de l'électricité durable pour le bâtiment. À cela s'ajoutent de nombreuses conceptions solaires passives telles que la double façade, la consommation de masse thermique et les dispositifs d'ombrage extérieurs. Bien que certains soupçons aient été émis au début, un toit vert s'est avéré très efficace, tout comme l'utilisation de matériaux recyclés ou bio-divers tels que le torchis, le

chanvre ou la cellulose. Une fois toutes les recherches effectuées et "prouvées", j'ai intégré ces appareils dans le gratte-ciel que j'avais conçu. J'ai bénéficié d'une créativité totale et j'ai pu m'exprimer à travers le modèle de la conception. La conception a suivi l'inspiration de Zaha Hadid, une architecte renommée pour ses formes et ses dimensions courbes. En suivant son esthétique, j'ai décidé d'avoir une tour circulaire, également en raison du fait que les formes circulaires affectent moins les vents et les circulations d'air, avec une base qui suit la forme des vagues. Lors de la création de la maquette, j'ai utilisé principalement de la mousse de polystyrène, ainsi que du carton fin pour les finitions. La maquette représente également tous les appareils écologiques qui doivent être visibles de l'extérieur, ce qui explique la présence de verdure et de panneaux solaires.

6.2 Conclusion de mon projet

Pour conclure ce travail, il est très difficile de combiner l'idée d'un environnement durable avec les gratte-ciel. Certains systèmes et appareils peuvent être utilisés pour réduire l'impact d'un gratte-ciel sur l'environnement, mais les technologies actuelles n'offrent pas la possibilité d'avoir un gratte-ciel entièrement autonome. Cela nous montre toutefois qu'avec un peu de développement, cet objectif n'est pas si loin d'être atteint et devrait encourager nos architectes et ingénieurs en environnement à poursuivre leurs recherches dans ce domaine autant que possible.

6.3 Réflexion personnelle

Dans l'ensemble, j'ai trouvé ce travail très intéressant. Il m'a permis d'acquérir beaucoup d'expérience, alors que je sais où sont mes points forts et où il y a matière à amélioration. Je suis très heureuse du sujet que j'ai choisi, car il me passionne et a rendu l'ensemble du processus plus intéressant et plus amusant. L'architecture est un thème magnifique et un excellent moyen d'exprimer sa créativité, ce que j'ai l'impression d'avoir vraiment réussi à faire. En incluant la problématique de la crise climatique, je pense que j'ai rendu le sujet plus pertinent dans le temps et que j'ai eu plus de raisons de le faire. Cependant, ces deux sujets, l'architecture des gratte-ciel et les questions écologiques, ont des horizons très larges, ce qui signifie qu'il y a beaucoup de choses à couvrir. Je pense que je n'ai pas réalisé à quel point le spectre était large et que j'aurais dû me limiter à une question plus spécifique. Il a fallu faire beaucoup de recherches détaillées pour déterminer ce qui était vrai et ce qui ne l'était pas, ce qui, ajouté au fait que les gratte-ciel ne sont pas officiellement définis, rend très

difficile de savoir ce qui s'applique à eux et ce qui peut s'appliquer et ce qui ne peut pas s'appliquer. Cela étant dit, les recherches effectuées ont été extrêmement intéressantes et ont permis de découvrir de nouvelles approches et de nouveaux points de vue. Il va sans dire que les entretiens ont été d'une grande aide et m'ont fait prendre conscience de l'importance qu'ils revêtent pour un tel projet. Rencontrer des experts à qui l'on peut poser des questions détaillées et demander toute sorte d'aide a été le plus grand atout de mon travail. Cela m'a permis de mieux comprendre mon sujet. La partie modèle et projet de mon travail a été la plus amusante de toutes. Je suis tellement heureuse de l'avoir inclu dans mon travail. Il a définitivement rendu l'ensemble du projet plus intéressant et m'a aidée à visualiser et à comprendre beaucoup mieux les informations recherchées. Cela a également donné à mon projet un but et un défi personnels. Certes, l'ajout d'un projet physique m'a soumise à une pression temporelle un peu plus forte, mais cela en valait la peine. Je pense également qu'avec le peu d'aide extérieure que j'ai reçue, la maquette s'est avérée assez bonne et montre une représentation réaliste des systèmes. Le stage a été une expérience très enrichissante qui m'a donné un excellent aperçu du travail d'un architecte et m'a aidée à concevoir mon propre projet. Rétrospectivement, la durée du stage était un peu courte et tout ce qui était attendu n'a pas pu être fait. J'ai également été soumise à une pression temporelle, car j'ai dû essayer de faire la plupart des choses pendant ces trois jours. Je trouve également que le stage n'était pas uniquement axé sur mon projet personnel, mais sur la présentation du travail réel d'un architecte. Je pense que le résultat de ce travail est très bon. Il contient les bonnes informations et les explique d'une manière claire et précise. Le fait d'écrire en français représentait également un défi supplémentaire, que je suis très heureuse de l'avoir relevé. Ce n'est pas ma langue de prédilection et la plupart des informations trouvées étaient rédigées en anglais, ce qui a nécessité de nombreuses traductions. Je trouve que le matériel de recherche est très bien fait et que l'ensemble de l'adaptation est bien expliqué. Les questions les plus importantes ont été couvertes de manière à donner au lecteur la compréhension nécessaire. Dans l'ensemble, je suis très satisfaite du résultat et je pense avoir fait du bon travail.

7. Annexes

7.1 Interviews

Vous trouverez ici les réponses complètes ainsi que les questions posées aux citations utilisées dans mon document. Les entretiens se sont déroulés dans différentes langues et ont été dictés dans leur forme originale. Toutes les traductions nécessaires pour le texte principal ci-dessus ont été faites par moi-même, afin que tout soit présenté agréablement en français.

7.1.1 Architecte Catia Da Silva

Qu'en pensez-vous des gratte-ciels ?

Sur le principe, le gratte-ciel répond à un besoin de densification qui est très présent dans les problématiques d'urbanisme actuelles, notamment lié à la croissance incessante de la population. Le paysage environnant y gagne car nous évitons ainsi l'étalement urbain et le mitage du territoire. À titre personnel, je ne suis pas favorable aux gratte-ciels car ils représentent la plupart du temps un besoin d'affirmation de pouvoir plutôt que de répondre à un réel besoin de densification. La technicité requise pour la construction d'un gratte-ciel est tellement pointue que, dans l'aire de la construction durable, je trouve qu'ils sont à contre-courant.

Comment puis-je intégrer des panneaux solaires et des plantes dans mon gratte-ciel ?

Des panneaux solaires peuvent facilement être intégrés en façade puisqu'il n'y a pas suffisamment de surface en toiture. Pour ce qui est des plantes, le principe est fantastique puisqu'il répond à une des grandes difficultés que nous rencontrons en ville, à savoir les îlots de chaleur. Néanmoins nous n'avons pas assez de recul pour affirmer si cette solution est durable, puisque les plantes risquent de ne pas survivre aux conditions atmosphériques plutôt rudes.

Où voyez-vous la plus grande possibilité de rendre les gratte-ciels durables ?

L'intégration de panneaux photovoltaïques en façade est clairement la solution qui pourrait rendre le gratte-ciel plus durable par l'autoconsommation sur énergétique. Néanmoins la technologie de pointe requise dans les techniques CVSE (chauffage-ventilation-sanitaire-électricité et domotique) et sur la structure, est tellement importante, qu'un gratte-ciel ne pourra jamais être vraiment « durable ». L'énergie grise consommée lors de sa construction est énorme et son empreinte carbone est également immense.

Quel impact négatif sur l'environnement les immeubles à grande hauteur ont-ils, selon vous ?

Les impacts négatifs les plus « visibles » sont l'impact visuel sur le skyline d'une ville et donc l'ombrage que le bâtiment porte sur les bâtiments et rues alentour. Il y a également un impact sur les vents et les oiseaux ont tendance à foncer sur les vitrages (et ils en meurent). Et puis il y a l'impact moins « visible », l'impact carbone, qui est plus important sur les gratte-ciels sur le long terme que sur des constructions

de faible hauteur. Si on considère le cycle de vie complet d'un gratte-ciel, la production de CO₂ est beaucoup plus significative: depuis l'extraction des matières premières, la fabrication des matériaux de construction qui le compose, la construction, l'entretien, l'exploitation, et jusqu'à sa démolition/rénovation.

Avez- vous d'autres solutions qui rendent un bâtiment plus durable et qui sont applicables sur les gratte-ciels ?

a. Le réemploi de matériaux de construction dans la conception d'un nouveau gratte-ciel

Le réemploi dans la construction consiste à récupérer des éléments de construction (par exemple : murs, dalles, fenêtres, portes, éviers, etc.) afin de les réutiliser dans la construction d'un autre bâtiment. Le réemploi a pour but de diminuer les déchets de chantier ainsi que les dépenses en énergie grise, qui est nécessaire lors de la fabrication de nouveaux produits (ce qui la diffère du recyclage).

b. Réversibilité de la construction (composants facilement démontables)

Lors de la conception le type de structure et les systèmes d'assemblage peuvent être pensés afin d'être facilement démontables plus tard, ce qui permettra de récupérer les matériaux sans les casser (ça rejoint le point « a » Réemploi). En évitant les colles, les soudures ou autres techniques d'assemblage difficilement réversible, les matériaux et éléments composants les bâtiments pourront être réutilisés ailleurs et/ou facilement remplacés. Donc il y aura moins de déchets de chantier.

c. Utilisation de matériaux biosourcés

Matériaux issus de la nature, il s'agit de matière organique renouvelable (biomasse) d'origine végétale ou animale, par exemple : bois, chanvre, paille, ouate de cellulose, textiles recyclés, balles de céréales, miscanthus, liège, lin, chaume, herbe de prairie. Ceux-ci stockent du CO₂ et sont en général issus de gisements locaux (à proximité du chantier) afin de limiter les émissions CO₂ dérivées du transport des matériaux. Certains peuvent être utilisés pour la structure (bois) d'autres pour l'isolation (chanvre, paille, etc).

7.1.2 Dr. Jaqueline Pauli

Wie kennzeichnet man die Struktur eines Wolkenkratzers?

In einem Hochhaus hat man in der Mitte meistens den Kern des Wolkenkratzers, welcher ungefähr ein Rechteck ist. Dort befinden sich oft die Lifte und die Fluchttreppenhäuser. Steigschachte machen auch einen Grossteil der Tragwerke aus. Dazu kommen die Büros und aussen am Gebäude findet man die Fassaden. Dies ist die Eigenheit eines Hochhauses gegenüber einem tieferen Gebäude, denn bei einem Hochhaus muss die die Mehrheit des Gewichtes in der Mitte sein, damit der Wolkenkratzer stabil bleibt und nicht auf eine Seite kippt. Wenn man den Wolkenkratzer von seinem Tragwerk betrachtet, bemerkt man, es hat viel mehr Gewicht als ein gewöhnliches Haus. Ein weiterer Punkt, welcher beachtet werden

muss, ist, dass ein Wolkenkratzer sehr affiniert zu stärkerem Wind und zu Erdbeben ist. Je höher das Haus ist, desto mehr kann es schwanken. Um dies in den Griff bekommen zu können, braucht man den inneren Kern, dieser hebt das ganze Haus horizontal. Weiter muss beachtet werden, dass je grösser das Gewicht ist, desto grösser muss auch das Fundament sein, auf welchem das Gebäude steht.

Welcher Standort wäre am besten?

Manhattan ist dafür super geeignet, denn die Stadt befindet sich auf einem Felsen, dies ist das beste Szenario, weil dort kann man das Haus mehr oder weniger direkt auf einem Fels platzieren. Dubai hingegen wäre schlecht geeignet, denn diese Stadt steht auf Wüstensand. Dort braucht man unter dem Haus noch ein fünfzig Meter grosses Fundament, damit es einigermaßen stabil ist. Je höher das Haus, desto grösser muss auch das Fundament sein. Ich glaube Manhattan gut, dort gibt es ja schon ganz viel Wolkenkratzer, dadurch kann sich dort an diesen gut orientieren.

Was sagen sie zur Einsetzung von Solarenergie in meinem Projekt?

Sonne und Solarenergie, macht immer Sinn. Dies wird immer mehr gebraucht, vor allem bei höheren Gebäuden, weil das Problem für Solarzellen ist nicht nur schlechtes Wetter, sondern auch die Schatten, die von anderen Hochhäusern kommen. Gleichzeitig bekommt man auch viel Fassadenfläche gegenüber kleineren Gebäuden. Man muss aber schauen wie viel Ertrag man generieren kann. Ausserdem muss auch beachtet werden, wie viele Schattentage, beziehungsweise wie viele Sonnenstunde, es gibt. Natürlich ist das bei uns anders als weiter südlich oder nördlich. Je nach Standort sind die Sonnenstunden anders. Man muss schauen, wie viel Kilowatt Stunden man pro Jahr kriegt und wie viel man eigentlich braucht.

Wie kann ich Pflanzen in meinem Wolkenkratzer einbauen?

Für Pflanzen gibt es ganz viele Systeme. Es ist aber eher aufwändig, da die Pflanzen enorm viel Licht brauchen. Sie müssen immer schön sein. Entweder muss sich jemand vom Dach abseilen oder mit dem grossen Skyworker zu den Pflanzen gelangen, um sie zu behandeln. Alles sehr aufwendig! Es gibt Pflanzen, die von unten nach oben klettern, diese kommen nur zu einer gewissen Höhe, normalerweise bis zum dritten Stock, denn diese müssen sich selbst „heben“ und Wasser/Nahrung bis nach oben bringen. Also hören sie mit dem Wachsen auf. Eigentlich würden sich Pflanzen eignen, die nicht mehr als Regenwasser brauchen. Es kostet eigentlich viel Geld und viel Energie. Auf dem Dach (Jacqueline Pauli zeigt auf die Fassadenbepflanzung am Hochhaus Aglaya in Rotkreuz, Zug) haben sie Pflanzen, aber auch ein automatisierten Wässerungssystem. Wenn man so etwas macht, muss man beachten, dass es eine Pflanze ist, die nicht viel Aufwand bringt und man sie eigentlich lassen kann und sie nicht fest behandelt werden muss. Bei 200m muss man auch bedenken, ob Balkone überhaupt Sinn machen. Es windet dann sehr fest und es ist dann unangenehm für die Pflanzen und für die Menschen. Es ist mehr Aufwand als es etwas bringt, weil man kriegt auch nicht so viel CO2 kompensiert.

Was sagen Sie zur Idee Solarzellen und Solarenergie zu benutzen?

Ich glaube Solarzellen kann man in der heutigen Zeit überall platzieren. Logischerweise sind Süden und Westen meistens die besseren orientierten Fassaden. Das mit der Sonnenenergie finde ich einen guten Punkt, denn es funktioniert. Die

Paneele ergeben, vor allem wenn man eine grössere Fassaden Fläche hat, einen Ertrag, der grösser ist als der Verbrauch der Menschen. Gegen Kälte ist Dämmung (Isolation) immer gut. Dies ist meistens mit der Fassade gut abzudecken. Ein bisschen Heizung braucht man trotzdem, aber man kann es natürlich möglichst minimieren, indem man gut isoliert. Eine Öl Heizung sollte dann vermieden werden, sodass man fast CO2 neutrale Energie gewinnt. Der Sommer ist meistens schwieriger in den Griff zu kriegen. Es sollte nicht zu heiss werden, dass man keine Klimaanlage braucht. Das ist die einfachste Lösung. Vielfach geht es darüber, dass man nicht zu grosse Fenster baut. Dass macht man, indem nicht die ganze Fassade voller Fenster ist, sondern nur so viel, wie man braucht, um genug Licht aufnehmen zu können. Es gibt ein paar Leute, die sagen „50% Fenster und 50% geschlossen“ oder auch „40% Fenster und 60% geschlossen“. Weniger als 40% Fensterbedeckung macht man dann nicht. Also zuerst reduziert man die Fenster und dann kommt draussen am Glass einen Sonnenschutz hin (Raflermälesystem – Lammele). Wenn die Sonne stark brennt, kriegt man Schatten. So kommt die Sonne nicht. Wenn sie trotzdem reinkommt, braucht man diese „thermische Masse“. Wenn man schonmal in einem Altbau gewesen ist, merkt man diese dicke Steinwände. Wenn man rein geht, ist es kalt, weil der Stein die ganze Wärme einsaugt. Er selbst wird von aussen warm, speicherte aber die Wärme in sich und gibt sie wieder nach draussen ab, wenn es kühl ist. So kriegt man den Sommer in den Griff, ohne viel Fenster, mit Sonnenschutz und genug Materialien, die die Wärme aufnehmen können.

7.1.3 Dr. Kurt Teichert

How does the sun affect a building?

A lot of the challenges of having solar orientation with the buildings in a mixed climate is you are going to have extremely hot months where that glass is a liability. And then you are going to have the colder months where it is an asset. And when it is a liability, then you want to have opportunities to shade it.

What is passive solar orientation/ design?

A key principle of passive design is, is that you can control the shade so that you do not have this solar gain when it is a liability. And in an Urban skyscraper construction, rarely is there much definition and overhang to those buildings, right. They tend to be monolithic facade with inoperable windows, much more emphasising on terracing access to the outside using vegetation for shade. Because as soon as you can introduce shade and operable windows or door openings, you have more opportunity to take advantage and having the benefits of the sun without dealing with the liability so much. Because if you try to have a passive solar, heated building and in the end, you must spend a significant amount of electricity and energy cooling the building, it defeats the needs, right. I am primarily talking about solar gain radiation from the sun coming into a space. Heating it up and taking advantage of natural convective exchange of hot air flowing to cold air. Another form of passive design is when taking advantage of natural ventilation and cooling as opposed to using mechanical systems. There is a standard in the US, that focus is very much on the airtightness of the building envelope. So, minimising the unnatural air exchanges it puts limits on the amount of energy that can be used to heat and cool the building. It has requirements for ventilation and I also encourage you to be aware of that because the envelope aspects of the passive House standard

are critical in meeting passive goals for building with paths with which the general goal of passive being minimising the requirement for some sort of mechanical system to provide conditioning and relying on more passive or natural message.

What are other ways to make it more sustainable?

A principle similar to passive house is a zero net energy building. Meaning a building that can create as much electricity as it uses. An example of a larger office building, that uses these advanced standards, is the Bullet foundation. One of the key things is, is that, as it is a zero net energy building, it produces as much electricity as it uses. The other key thing about it, is that it utilises the living building challenge and it is attaining the goal of 0 net water. Because one of the key forms of material flows in the building, is the zero net water building. This is one of the ways that you make a sustainable building.

What is important to keep in mind?

I concur with your advisor that it is important to focus on the details of one particular aspect. The challenge is, for a building to operate sustainably you must do everything right. You can't just build a skyscraper like these ridiculous needle projects that are going up in Manhattan and expect something like that to be sustainable. The most important part of meeting most of the needs of a building from the sun, is by making it as efficient and comfortable as possible without the use of mechanical systems. And that goes to all the details of the tightness of the envelope, specifying the windows correctly, having good installation levels, etc. I think here the goal is finding a way to best integrate both passive and active solar use.

How can I use photovoltaics to my advantage?

The challenge with active solar photovoltaics is the aspect ratio of the buildings where typically solar panels go on the roof of a building. However, if you have a building where the roof represents 10% of the overall surface area of the building, there is no conceivable way at current photovoltaic efficiency, you could come close to meeting its electrical needs. To build it on the facade of the building, you use full integrated photovoltaics. You will also find examples of projects that have incorporated PVs both on the roof as well as on the side wall of the building. One of the advantages of building integrated photovoltaics, is it can provide some of the shading, whilst absorbing the sun's rays and creating electricity.

What could I apply into my project to make it more sustainable?

I think one of the things that I would recommend, is that you think much more how to optimise between true passive solar orientation using the sun to thermally heat space or using the convection of air for a more naturally ventilated space, in addition to integrating photovoltaics on the roof and the facade, and then having electrified systems. The key thing is you're using the sun on the supply side of things. You're using it to meet the needs of heat and electricity. It's difficult to use the sun to make the building more thermally efficient. That's the envelope and the nature of the windows. But I think as long as you expand beyond passive solar and think much more in detail about terraces, vegetation much more of the Ken Yang type of design, so that you're also providing shading when you don't want that solar gain

and think of that as an integrated part of the solar design; then then you're covering solar in in more detail.

How can I build a skyscraper that does not take away from its surroundings?

The most important one is you don't make a tall building. I mean, you know, they cast shade. That's the most influence that they have. If you do have a tall building, then having vegetation, again inspired by Ken Yeang and others, it does not contribute to the urban heat island effect and stays relatively cool relative to its surroundings. It's still going to be casting a shadow, but at least it's not going to be heating up the neighbourhood, as much as if it didn't have vegetation on the facade and then overhangs.

What would the optimal shape structure be?

You cannot design a building with all sides facing the sun. But certain designs can lend themselves to better solar orientation than others. Having it long on the east-west access, if it is going to be something other than a square building, is one of the ways that you can provide more surface area for generation. Increasingly, research is showing that east facing and west facing solar panels can still generate a considerable amount of electricity if there is no shading.

7.2 Rapport de stage

Ce sont les documents officiels signés et rédigés par l'agence d'architecture « Ferrari Architectes », que j'ai fréquentée pendant une semaine, et qui évaluent mon travail et mon comportement. Ils expliquent également ce que j'ai fait là-bas et ce que ces expériences m'ont apporté.

Évaluation de l'engagement

L'étudiant / L'étudiante Céline Tagliani
a effectué du 12 au 14 juin 2023 un stage social
auprès de (entreprise avec adresse) Ferrari Architects Lausanne SA

			La stagiaire / le stagiaire			
			Tout à fait	Concerne partiellement	Moins vrai	Ne s'applique pas
Attitude de travail et intérêt	Disponibilité	... a exécuté de bonne volonté les tâches qui lui ont été confiées.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Rigueur / fiabilité	... s'est acquitté de ses tâches avec soin et fiabilité.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Engagement	... a cherché de son propre gré des possibilités de s'impliquer dans le processus de travail.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Capacité de charge	... était à la hauteur des contraintes physiques et psychologiques.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Ponctualité	... était ponctuel.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Faculté de compréhension	... a rapidement compris ce qui était important dans les travaux à effectuer.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Intérêt	... a montré de l'intérêt pour l'activité.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Ouverture d'esprit	... était ouvert aux problèmes et aux préoccupations des personnes prises en charge.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Esprit d'équipe	Respect des règles et accords	... a respecté les accords et les règles convenus.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Aptitude à la communication	... s'est bien entendu et concerté avec les autres lors de travaux à effectuer en commun.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Volonté de coopération	... a montré une volonté de collaborer avec les autres.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Prise de responsabilités	... a montré, en travaillant avec d'autres, sa volonté d'assumer des tâches et des obligations.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Remarques : _____

Lausanne, le 15 juin 2023
Lieu, date

Berrant
Signature
Responsable du stage

FERRARI ARCHITECTES
Av. Benjamin-Constant 1 | CP 6162
1002 Lausanne | T +41 21 311 72 72
Cachet

Veillez en remettre deux exemplaires à l'élève avec la signature originale.



EVALUATION FINALE STAGE

Réalisations

Acquisition de connaissances relatives au métier d'architecte et à la création d'un projet en architecture pour son travail de maturité.

Echanges avec des architectes et des spécialistes en développement durable.
Apprentissage des méthodes et logiciels relatif au métier.
Création d'un projet, mise sur papier les réflexion, réalisation de dessins et croquis.
Lecture de revue spécialisées.

Visite d'un chantier.
Pratique de la langue française.

Forces

Volonté/volontaire
Curiosité
Soif d'apprendre
Autonomie
Aisance dans un nouvel environnement

Axe d'amélioration

Développer l'analyse de l'ensemble des informations recueillies afin de les synthétiser et d'en ressortir l'essentiel concernant le sujet de son travail de maturité.

Commentaires

Malgré la courte durée du stage, Céline a pu avoir une vision d'ensemble du travail d'un architecte et du processus de création d'un projet.

Elle a démontré de la volonté et de la détermination tant dans la recherche du stage que lors de la semaine passée en notre compagnie.

Elle avait préparé sa semaine en amont afin de pouvoir en profiter au maximum de cette occasion (question envoyé au spécialiste et idée de projet déjà en tête).

Sérieuse, respectueuse et volontaire, les retours de toutes les personnes rencontrées ont été positifs. Sa curiosité et sa capacité à questionner sont des éléments clés pour la suite de ces études et sa future carrière.

Toutes les interactions sociales ont eu lieu en français et ce sur toute la durée du stage et de manière très fluide.

8. Remerciements

Je tiens à remercier tout particulièrement Elodie Serrant. En tant qu'architecte chez Ferrari Architectes, elle m'a énormément aidé et m'a guidée tout au long de ce projet. Elle m'a aidée à concevoir et à concrétiser mes visions, ce dont je lui suis très reconnaissante.

Je tiens également à remercier mes parents pour leur soutien et leur aide à tout moment.

Kurt, Pauli et l'architecte Catia Da Silva pour leur collaboration lors des entretiens et pour le partage de leurs connaissances. Ils ont patiemment répondu et m'ont aidée à trouver des solutions et ont pris sur leur temps pour m'aider.

Je remercie également Mme Douls pour sa patience et ses conseils.

9. Bibliographie

Internet – Littérature

Les plus utilisés:

<https://www.jstor.org/stable/212878?origin=crossref>

- Consulté le 03.05.2023

<http://www.madehow.com/Volume-6/Skyscraper.html>

- Consulté le 25.07.2023

<https://tpeconstructiontour.wordpress.com/2016/12/29/la-structure-et-le-disgn/>

- Consulté le 22.07.2023

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>

- Consulté le 09.06.2023

<https://www.yourhome.gov.au/materials/embodied-energy#:~:text=The%20embodied%20energy%20of%20a,economy%20that%20support%20these%20processes.>

- Consulté le 03.05.2023

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815020755>

- Consulté le 25.08.2023

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114003499?via%3Dihub>

- Consulté le 25.08.2023

<http://www.madehow.com/Volume-6/Skyscraper.html>

- Consulté le 15.06.2023

<https://www.ctbuh.org/resources/papers/download/4587-solar-glazing-for-tall-mixed-use-buildings-prospects-for-policy-and-performance.pdf>

- Consulté le 24.07.2023

<http://www.taccire.sua.ac.tz/bitstream/handle/123456789/153/tall%20buildings.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Consulté le 15.06.2023

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321007903#preview-section-introduction>

- Consulté le 26.08.2023

<https://www.build-green.fr/pourquoi-les-immeubles-de-faible-hauteur-sont-lavenir-mais-pas-les-gratte-ciel/>

- Consulté le 23.07.2023

http://ifa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2012/cilt29/sayi_1/95-106.pdf

- Consulté le 20.08.2023

[https://www.teachengineering.org/lessons/view/cub_housing_lesson05#:~:text=Working%20together%2C%20the%20five%20elements,and%20stores%20heat\)%2C%20distribution%20\(](https://www.teachengineering.org/lessons/view/cub_housing_lesson05#:~:text=Working%20together%2C%20the%20five%20elements,and%20stores%20heat)%2C%20distribution%20()

- Consulté le 08.09.2023

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9414585/>

- Consulté le 08.09.2023

<https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/thermal-mass/#1500552344002-ba9ef76c-c3a4>

- Consulté le 24.08.2023

<https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/gaas-solar-cells/#:~:text=Advantages%20of%20GaAs%20solar%20cells,ranges%20excess%20of%20250%20GHz.>

- Consulté le 27.08.2023

https://www.eia.gov/consumption/residential/reports/2009/state_briefs/pdf/NY.pdf

- Consulté le 15.06.2023

Dans les Fussnote:

(1) <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/gratte-ciel/37981>

- Consulté le 08.06.2023

(2) <https://www.ashrae.org>

- Consulté le 08.06.2023

(3) <https://www.ctbuh.org>

- Consulté le 08.06.2023

(4) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>

- Consulté le 09.06.2023

(5) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>

- Consulté le 09.06.2023

(6) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org

<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>

- Consulté le 09.06.2023

(7) <https://www.ctbuh.org/resource/height>

- Consulté le 09.06.2023

(8) <https://emporisorg.in>

- Consulté le 10.06.2023

- (9) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>
- Consulté le 09.06.2023
- (10)<https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/maison-beton-arme-10541/>
- Consulté le 07.06.2023
- (11) Définition déjà connu
- (12)<http://www.madehow.com/Volume-6/Vermiculite.html>
- Consulté le 15.06.2023
- (13) Définition déjà connu
- (14)<http://www.madehow.com/Volume-6/Skyscraper.html>
- Consulté le 15.06.2023
- (15)<http://www.madehow.com/Volume-6/Skyscraper.html>
- Consulté le 15.06.2023
- (16)<http://www.madehow.com/Volume-6/Skyscraper.html>
- Consulté le 15.06.2023
- (17)[https://www.seac-gf.fr/seac-infos-bati-infos-charges-permanentes.pdt30.p158.php#:~:text=Les%20charges%20permanentes%20\(notées%20G,définitive%20sur%20le%20plancher%20considéré.](https://www.seac-gf.fr/seac-infos-bati-infos-charges-permanentes.pdt30.p158.php#:~:text=Les%20charges%20permanentes%20(notées%20G,définitive%20sur%20le%20plancher%20considéré.)
- Consulté le 16.06.2023
- (18) Interview avec Dr. Pauli (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (19) Interview avec Dr. Pauli (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (20)<https://tpeconstructiontour.wordpress.com/2016/12/29/la-structure-et-le-disgn/>
- Consulté le 10.07.2023
- (21)<https://www.willistower.com>
- Consulté le 10.07.2023
- (22)<https://tpeconstructiontour.wordpress.com/2016/12/29/la-structure-et-le-disgn/>
- Consulté le 10.07.2023
- (23) Définition déjà connu
- (24) Définition déjà connu
- (25)<https://tpeconstructiontour.wordpress.com/2016/12/29/la-structure-et-le-disgn/>
- Consulté le 10.07.2023

- (26) <https://www.un.org/en/global-issues/population#:~:text=Our%20growing%20population&text=The%20global%20human%20population%20reached,and%202%20billion%20since%201998.>
- Consulté le 00.05.2023
- (27) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>
- Consulté le 09.06.2023
- (28) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>
- Consulté le 09.06.2023
- (29) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>
- Consulté le 09.06.2023
- (30) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>
- Consulté le 09.06.2023
- (31) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>
- Consulté le 09.06.2023
- (32) Kheir Al- Kodmany, KAK (2012, 2 Juin), The Logic do Vertical Density: Tall Buildings in the 21st Century City, global.ctbuh.org
<https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>
- Consulté le 09.06.2023
- (33) https://www.newyork-demographics.com/cities_by_population
- Consulté le 27.08.2023
- (34) <https://www.linkedin.com/pulse/new-york-truly-sustainable-city-global-compact-network-bulgaria#:~:text=Believe%20it%20or%20not%20New,by%20Berlin%2C%20London%2C%20Paris.>
- Consulté le 27.08.2023
- (35) <https://www.nyc.gov/site/planning/about/dcp-priorities/resiliency-sustainability.page>
- Consulté le 28.08.2023

- (36) Interview avec Dr. Pauli (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (37) Interview avec Mme Catia Da Silva (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (38) Cloe Logan (2021, 17 Novembre), The hidden carbon footprint of high rises, nationalobserver.com
<https://www.nationalobserver.com/2021/11/17/news/hidden-carbon-footprint-highrises#:~:text=The%20taller%20the%20building%2C%20the,%2D%20and%20mid%2Drise%20buildings.>
 - Consulté le 28.06.2023
- (39) Interview avec Mme Catia Da Silva (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (40) <https://www.onenineelms.co.uk>
 - Consulté le 09.09.2023
- (41) J. Burnett (2001, 4 Avril), Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong, sciencedirect.com
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544201000068>
 - Consulté le 24.07.2023
- (42) 2022, 8 Septembre, Longer, hotter and More Frequent Heat Waves in Swiss Cities, news.uzh.ch
<https://www.news.uzh.ch/en/articles/media/2022/Heat.html>
 - Consulté le 24.07.2023
- (43) Définition déjà connu
- (44) https://en.wikipedia.org/wiki/Urban_canyon
 - Consulté le 10.07.2023
- (45) <https://www.yourhome.gov.au/passive-design/thermal-mass#:~:text=In%20simple%20terms%2C%20thermal%20mass,to%20have%20low%20thermal%20mass.> 10.07.2023
 - Consulté le
- (46) Nancy Nugroho (2022, Janvier), Effect of high- rise buildings on the surrounding thermal environment, sciencedirect.com
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132321007903#preview-section-introduction>
 - Consulté le 24.07.2023
- (47) <http://www.wausauwindow.com/index.cfm?pid=73&pageTitle=Wind-Behavior>
 - Consulté le 25.07.2023
- (48) Interview avec Mme Catia Da Silva (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (49) Esra Sakiñç, ES (2011, 30 décembre), The Effect of tall Buildings on Solar Access of the Environment – Istanbul Lèvent as case, jfa.arch.m'étudia.edu.tr
http://jfa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2012/cilt29/sayi_1/95-106.pdf
 - Consulté le 26.07.2023

- (50) Interview avec Mme Catia Da Silva (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (51) Interview avec Dr. Kurt Teichert (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (52) Interview avec Dr. Jacqueline Pauli (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (53) <https://www.directenergy.com>
- Consulté le 26.07.2023
- (54) Définition déjà connu (Abréviation du mot)
- (55) Interview avec Dr. Kurt Teichert (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (56) Interview avec Dr. Kurt Teichert (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (57) Interview avec Dr. Jacqueline Pauli (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (58) Interview avec Mme Catia Da Silva (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (59) Interview avec Dr. Jacqueline Pauli (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (60) Interview avec Mme Catia Da Silva (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (61) Interview avec Mme Catia Da Silva (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (62) <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/gaas-solar-cells/#:~:text=Advantages%20of%20GaAs%20solar%20cells,ranges%20excess%20of%20250%20GHz.>
- Consulté le 27.08.2023
- (63) <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/gaas-solar-cells/#:~:text=Advantages%20of%20GaAs%20solar%20cells,ranges%20excess%20of%20250%20GHz.>
- Consulté le 27.08.2023
- (64) <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/gaas-solar-cells/#:~:text=Advantages%20of%20GaAs%20solar%20cells,ranges%20excess%20of%20250%20GHz.>
- Consulté le 27.08.2023
- (65) Définition déjà connu
- (66) Justyna Pastuszak et Pawel Wegierek (2022, 15 Août), Photovoltaic Cell generations and current Research Directions for their Development, ncbi.nlm.nih.gov
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9414585/>
- Consulté le 27.08.2023
- (67) <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/gaas-solar-cells/#:~:text=Advantages%20of%20GaAs%20solar%20cells,ranges%20excess%20of%20250%20GHz.>
- Consulté le 27.08.2023

- (68) <https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/gaas-solar-cells/#:~:text=Advantages%20of%20GaAs%20solar%20cells,ranges%20excess%20of%20250%20GHz.>
- Consulté le 27.08.2023
- (69) Interview avec Dr. Jaqueline Pauli (voir dans les Annex pour plus de detail)
- (70) <https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/thermal-mass/>
- Consulté le 30.08.2023
- (71) <https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/green-roofs/>
- Consulté le 30.08.2023
- (72) <https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/green-roofs/>
- Consulté le 30.08.2023
- (73) B. Howard et J. Thompson (2011, 31 Octobre), Spatial distribution of urban building energy consumption by end use, sciencedirect.com
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877881100524X>
- Consulté le 22.07.2023
- (74) Henry W. Bradhorst Jr., Technologies – Photovoltaic Technology, space.nss.org
<https://space.nss.org/settlement/nasa/spaceresvol2/technologies.html#:~:text=Gallium%20arsenide%20arrays%20are%20expected,25%2D40%20W%2Fkg.>
- Consulté le 23.07.2023

10. Photos, Graphiques, Tableaux

Illustration 1 : <https://tpeconstructiontour.wordpress.com/2016/12/29/la-structure-et-le-disgn/>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 2 : <https://www.willistower.com/about>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 3 : <https://www.pourlascience.fr/sd/demographie/combien-d-humains-demain-les-nouvelles-projections-de-l-onu-24055.php>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 4 : <https://global.ctbuh.org/resources/papers/download/2264-the-logic-of-vertical-density-tall-buildings-in-the-21st-century-city.pdf>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 5 : <https://www.linkedin.com/pulse/new-york-truly-sustainable-city-global-compact-network-bulgaria#:~:text=Believe%20it%20or%20not%20New,by%20Berlin%2C%20London%2C%20Paris.>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 6 (traduit par moi-même) :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815020755>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 7 : <https://coupdepousses.fr/mini-foret-ilots-de-chaaleur/>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 8 : http://ifa.arch.metu.edu.tr/archive/0258-5316/2012/cilt29/sayi_1/95-106.pdf

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 9 : <https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/window-shape-and-sizing/>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 10 : <https://theconstructor.org/building/thermal-mass-passive-solar-building/562355/>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 11 : <https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/shading/>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 12 : <https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/green-roofs/>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 13 : <https://fairconditioning.org/knowledge/passive-design/green-roofs/#1500296799628-e5546709-43d9>

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 14 : Dorian L., New Strategies for Sustainable Architecture. Editorial Office van Uffelen. Allemagne. 2021.

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 15 : image personnelle

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 16 : Image personnelle

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 17 : Image personnelle

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 18 : Image personnelle

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 19 : Image personnelle

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 20 : Image personnelle

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 21 : Image personnelle

- Consulté le 10.10.2023

Illustration 22 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 23 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.202

Illustration 24 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 25 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 26 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 27 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 28 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 29 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 30 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 31 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 32 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 33 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 34 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 35 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 36 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023

Illustration 37 : Image personnelle
- Consulté le 10.10.2023