

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme

El Moudjahid Hocine Ait Ahmed

epau



Laboratoire d'Architecture et Environnement

Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master

**Adaptation des toitures végétalisées aux
structures anciennes**

Cas de l'hôpital Lamine Debaghine BEO Alger

Soutenu publiquement le : 08 octobre 2017

Réalisé par :

TITOUAH Djihad

Encadré par :

Dr. N.K. DRIOUECHE DJAALALI

devant le jury :

Dr. KAHILA (président)

Dr. HIMEUR (examineur)

Mme. AKROUR (examineur)

2016/2017



... À ma mère

Remerciement :

Louange à Allah pour m'avoir donné force et courage afin de mener à bout ce travail.

On dit que celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Allah, de ce principe :

J'exprime ma plus sincère gratitude à Dr. Driouèche, pour ses précieuses orientations et son soutien durant cette longue année.

Je remercie aussi Dr. Siyoucef et Pr. Chemrouk pour leurs encouragements et leurs conseils pertinents.

Il m'est agréable de remercier la famille de l'hôpital Lamine Debaghine de Bab El Oued pour leur accueil chaleureux et leurs informations précieuses.

J'exprime mon entière gratitude à mes parents, mon frère et mes sœurs, pour leur soutien moral durant tout mon cursus.

Je remercie mes très chers amis pour avoir fait de mon parcours à l'EPAM, une expérience des plus agréables, merci pour les débats, merci pour les échanges. Merci à vous tous et toutes (sans citer de noms)

Merci à tous ceux qui ont contribué de près de de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

L'objectif de la présente recherche est de contribuer au développement durable. Cette politique vise à allier la prospérité économique à un équilibre écologique et socio-culturel ; d'où l'intérêt d'optimiser les conditions climatiques de la ville, de préconiser le respect de l'environnement en le conciliant avec l'espace urbain et le cadre bâti.

Les toitures végétalisées présentent une solution palpable contre le manque de végétation en milieu urbain. Ce modeste travail consiste en la maîtrise des concepts de végétalisation des toits dans le but d'évaluer la probabilité d'appliquer cette technique aux différents types de structures préexistantes.

Notre ambition est de participer, à travers de ce mémoire de master, à enrichir la théorie relative aux toitures végétalisées, à la possibilité de les introduire aux structures préexistantes, notamment dans les travaux de rénovation et de réhabilitation, et ce dans un contexte algérien. Nous espérons également fournir des recommandations à nos confrères chercheurs sur l'apport de la végétation des toitures à la protection et à la pérennisation de l'enveloppe du bâtiment.

Dans un premier temps, nous présenterons un état de l'art des connaissances sur les toitures végétalisées, leurs compositions, leurs caractéristiques techniques et leurs contraintes de conception. Ceci nous aidera à arrêter des paramètres permettant l'évaluation de la possibilité d'introduire cette technique dans des bâtiments existants.

Ensuite, nous étudierons cette possibilité sur la ville d'Alger, plus précisément sur l'hôpital Lamine Debaghine de Bab El Oued, cet établissement présentant une véritable synthèse des structures bâties présentes au sein de la ville. Nous évaluerons théoriquement les charges des toitures de quatre bâtiments, et les capacités portantes de leurs éléments de structures ; le croisement de ces résultats avec les caractéristiques des toits verts nous permettra d'en identifier la faisabilité. De ce fait, nous dégagerons des recommandations pour le choix du type de végétation favorable aux bâtiments existants.

Mots-clé : toiture végétalisée, bâtiment existant, capacité portante, adaptabilité.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII

introduction

I. Introduction	2
II. Constat :.....	2
III. Problématique.....	4
IV. Hypothèses	5
V. Objectif.....	5
VI. Méthodologie d’investigation	5
VII. Structure du mémoire	5
1. Partie théorique :	6
2. Partie investigation :.....	6

Chapitre 1 : les toitures végétalisées : concepts, composants et dispositifs spécifiques

I. Concepts :.....	9
1. Définition du toit végétalisé	10
a. Définition du toit	10
b. Classifications des toits en Algérie	10
c. Définition du toit végétalisé	11
2. Historique (apparition et développement).....	11
3. Procédés de végétalisation :	14
a. Végétalisation intensive :.....	14
b. Végétalisation extensive :	15
c. Végétalisation semi-intensive :.....	16
II. Composants types d’une toiture végétalisée :	17
1. Complexe étanchéité-isolation :.....	18
a. Isolation	18
b. Étanchéité :.....	18
2. Complexe de culture :	18

a.	Couche de drainage	19
b.	Couche filtrante :.....	20
c.	Substrat de culture :	20
3.	Complexe végétale :	22
a.	Critères de choix des végétaux	22
b.	Critères de choix des végétaux pour les systèmes de végétalisation extensifs :	23
c.	Modes de mise en œuvre de la végétation sur les toits.....	23
d.	Autres aspects :	24
III.	Dispositifs spécifiques :	25
1.	Zones stériles.....	25
2.	Dispositifs de séparation	26
3.	Chemin de circulation	26
4.	Evacuations des eaux pluviales	27
5.	Documents graphiques	27
6.	Textes législatifs.....	28
IV.	Conclusion.....	29

Chapitre 2 : les toitures végétalisées : avantages et contraintes de conception

I.	Avantages des toitures végétalisées :	33
1.	Ecologiques et environnementaux.....	34
2.	Urbanistiques et sociales	35
3.	Economiques	36
4.	Architecturaux	37
II.	Contraintes de conception :	38
1.	Contraintes climatiques	39
2.	Contraintes architecturales :	41
a.	Orientation	41
b.	Configuration (forme, dimensions, mitoyenneté...).....	42
3.	Contraintes techniques :	43
a.	Élément porteur :	43
b.	Charges sur la toiture :	44
c.	Pente de la toiture	45
4.	Contraintes d'entretien et arrosage :	46
5.	Les contraintes d'arrosage :	48

III.	Exemples d'adaptations de toitures végétalisées :	49
IV.	Conclusion.....	51

chapitre 3 : Présentation du cas d'étude

I.	Présentation du cas d'étude :	55
1.	Aperçu historique	56
2.	Raisons du choix	59
3.	Recensement des systèmes de recouvrement existants	59
a.	Typologies de bâti :	59
b.	Types de toitures :	60
II.	Présentation des entités d'étude :	61
1.	Choix des entités d'étude	61
2.	Caractéristiques des entités d'étude :	62
a.	Entité ottomane :	62
b.	Entité coloniale « a » :	63
c.	Entité coloniale « b » :	64
d.	Entité pose coloniale :	65

Chapitre 4 : présentation et interpretation des résultats

I.	Méthodologie de l'évaluation :	69
1.	Evaluation des planchers (poutre, poutrelle, solive) :	69
2.	Evaluation de la charpente en bois :	69
II.	Evaluation des systèmes porteurs :	69
1.	Caractéristiques des matériaux de construction des éléments porteurs :	69
a.	Bois :	69
b.	Métal ferreux :	71
c.	Béton armé :	73
2.	Calcul des charges et des surcharges :	73
a.	Méthode de calcul :	73
b.	Présentation des résultats :	78
3.	Calcul de la portance des éléments de structure	79
a.	Méthode de calcul :	79
b.	Présentation des résultats :	82
4.	Croisement des résultats :	87
III.	Evaluation de la possibilité d'introduction des toits végétaux :	88

1. Poids et surcharges (Wallonne, 1998) :.....	89
2. Autres aspects :.....	89
IV. Conclusion :.....	90
<u>Conclusion générale</u>	
I. Conclusion générale :.....	92
II. Recommandation :.....	94
III. Pistes de recherche :.....	94
IV. Bibliographie.....	95
ملخص.....	99
Abstract	100

Liste des figures

Figure 0- 1 : structure du mémoire.....	7
Figure I- 1 : jardins suspendus de Babylone	12
Figure I- 2 : exemple de chalet norvégien.....	12
Figure I- 3: végétation intensive.....	15
Figure I- 4 : végétation extensive.....	16
Figure I- 5 : végétation semi-intensive.....	17
Figure I- 6 : les principales composantes d'une toiture végétalisée.....	18
Figure I- 7 : A gauche : Soufflage du substrat à l'état meuble. A Droite : Répartition manuelle du substrat meuble.....	22
Figure I- 8 : Aménagement de la zone stérile recouverte de gravillons.....	26
Figure I- 9 : Exemple de plan de plantation d'une toiture végétalisée semi- intensive	28
Figure II- 1 : Différentes configurations d'un toit végétal.....	42
Figure II- 2 : Système de retenue GEORASTER d'Ecovegetal pour pente (jusqu'à 60%).....	46
Figure III- 1 : vue sur l'hôpital Militaire du Dey	56
Figure III- 2 : vue générale de l'hôpital Maillot (période coloniale) A droite la demeure du Dey (pavillon des officiers) A gauche les bâtiments de l'hôpital avec la chapelle.....	57
Figure III- 3 : vue générale de l'hôpital Debaghine 2009	58
Figure III- 4 : l'évolution de l'hôpital à travers l'histoire.	59
Figure III- 5 : la classification des bâtiments selon le type de toitures	60
Figure III- 6 : à gauche : délimitation de la zone d'étude. à droite : les entités d'étude	61
Figure III- 7 : Entité ottomane (restitutions en 3D)	62
Figure III- 8 : façade nord de l'administration	62
Figure III- 9 : plan de toiture de l'administration.....	63
Figure III- 10 : système porteur du plancher.....	63
Figure III- 11 : restitution en 3D du bâtiment	63
Figure III- 12 : les combles, vue d'intérieur.....	64
Figure III- 13 : système porteur de la ferme.....	64

Figure III- 14 : restitution du bâtiment en 3D	64
Figure III- 15 : vue d'intérieur et de la toiture	65
Figure III- 16 : système constructif du plancher	65
Figure III- 17 : façade Est du bâtiment	65
Figure III- 18 : vue d'intérieur montrant le plancher	66
Figure III- 19 : système porteur (restitution en 3D).	66
Figure IV- 1 : restitution en 3 D du plancher ottoman	74
Figure IV- 2 : restitution en 3 D de la ferme.	75
Figure IV- 3 : composants d'un plancher métallique	76
Figure IV- 4 : composants d'un plancher à corps-creux	76
Figure IV- 5 : schéma statique d'une ferme à deux pannes intermédiaires, faux entrait et contreflèches.....	80
Figure IV- 6 : décomposition de la résultante de l'effort normal appliqué sur l'entrait	81
Figure IV- 7 : diagrammes des moments de flexion des charges permanentes et d'exploitation	86

Liste des tableaux

Tableau I- 1 : Les plages d'épaisseur du substrat de culture	20
Tableau I- 2 : Période de mise en œuvre et taux de couverture de la végétation	25
Tableau II- 1 : Surcharges des différentes formes de végétalisation des toits	44
Tableau II- 2 : Entretien et arrosage des systèmes de végétalisation	46
Tableau II- 3 : exemples d'adaptations de toits végétaux aux structures existantes	51
Tableau IV- 1 : Valeurs du facteur "k" selon les classes de service	70
Tableau IV- 2 : valeurs du coefficient « γ » selon les classes de service.....	71
Tableau IV- 3 : caractéristiques mécaniques de l'acier.....	71
Tableau IV- 4 : le développement des Caractéristiques mécaniques admissibles du métal.....	72
Tableau IV- 5 : charges supportées par les éléments les plus sollicités de la toiture.....	78
Tableau IV- 6 : la capacité portante de la poutre en bois de thuya (cèdre).	83
Tableau IV- 7 : la capacité portante en traction de la poutre en bois de chêne.	84
Tableau IV- 8 : la capacité portante en flexion et en cisaillement de la poutre en bois de chêne.	84
Tableau IV- 9 : la capacité portante du profilé en IOA.....	85
Tableau IV- 10 : la capacité portante en flexion de la poutre en béton armé.....	85
Tableau IV- 11 : synthèse des résultats et détermination du nombre de barres	86
Tableau IV- 12 : synthèse des résultats	88
Tableau IV- 13 : comparaison des surcharges des types de végétation avec la portance des toitures.....	89
Tableau IV- 14 : comparaison des caractéristiques des types de végétation avec les spécificités des toitures.....	89

Introduction

I. Introduction

Le contexte urbain offre un environnement riche et varié qui influence, d'une part la manière d'utiliser les espaces urbains (mouvement, séquence et activité) et d'autre part, la perception des excitations thermiques (Steemers , 2004). Par ailleurs, Grimmond et Al affirment qu'une mauvaise adaptation climatique des environnements urbains a souvent pour conséquence l'utilisation d'une climatisation active et ainsi une augmentation de la consommation énergétique (Grimmond, 2002).

La ville se différencie des zones rurales par : la production d'énergie anthropique, la quantité d'énergie due au chauffage des habitations, le flux de circulation automobile, les industries, la réduction de la vitesse du vent dans les basses couches, la nette diminution de l'évapotranspiration -qui est due à la réduction de la végétation-, ainsi qu'au nombre croissant des surfaces non drainantes, et un important stockage de chaleur en journée engendré par les propriétés thermiques des matériaux des constructions.

Cette différence est due à la perturbation de l'équilibre radiatif, vu que l'échange de chaleur et entre la terre et les bâtiments est très réduit, l'air passe par le milieu urbain sans le rafraichir, d'où l'augmentation de chaleur dans la ville. Ces caractères du climat urbain ont donné naissance à un nombre de phénomènes tels que les vents urbains et les ilots de chaleur urbains.

II. Constat :

La ville de nos jours s'est créée un climat spécifique généré par de nombreuses perturbations locales de son microclimat notamment la surélévation des températures ou ce que l'on appelle l'îlot de chaleur urbain.

Bien que ses facteurs soient étroitement liés aux caractéristiques particulières de chaque ville, certains facteurs énumérés par Lopes C. (2006) portant sur la pauvre qualité environnementale des zones urbaines sont présents dans toutes les villes.

En Algérie, toutes les villes enregistrent un déficit flagrant d'espaces verts, la superficie qui y est consacrée est relativement faible. Cette dernière ne représente -selon la circulaire des espaces verts¹- que 1 m² par habitant, contre 10 à 12m² par habitant selon les normes de

¹ <http://www.mate.gov.dz/>

l'Organisation Mondiale de la Santé nécessaires pour un microclimat urbain équilibré (Larid M., 2003).

Les anciens Fahs de la ville d'Alger en témoignent, notamment le Fahs de Bab El Oued et plus précisément l'hôpital Lamine Debaghine (ex Maillot) qui représentait autrefois le jardin du Dey, mais qui est aujourd'hui rattrapé par l'urbanisme ; ainsi sa vocation fut complètement transformée en une zone fortement urbanisée avec un tissu dense et un trafic de plus en plus intense...

Il est évident que la présence des îlots de chaleur en milieu urbain est un phénomène de plus en plus préoccupant. D'un autre côté, l'étalement urbain n'est plus tolérable, ainsi on préconise la densification de la ville, ce qui rend l'évaluation des moyens de rafraîchissement passif la devise à adopter.

Plusieurs composants du milieu urbain sont paramétrés et utilisés comme solutions pour le rafraîchissement passif, les plus efficaces étant les matériaux de construction, la présence de l'eau, et le cadre végétal. Cependant on observe actuellement une perte importante des espaces verts. Il devient donc véritablement urgent de mettre en place des dispositifs pour réintroduire ces milieux naturels urbains.

La présence de la végétation dans l'environnement immédiat des constructions est plus efficace que sa concentration dans un parc éloigné des habitations. En effet, Givoni (1989) affirme que l'augmentation de la couverture végétale des quartiers résidentiels, ou des espaces proches des habitations réduit efficacement l'usage de la climatisation. Alors que Wong et al. (2006), recommandent la végétation de l'enveloppe même du bâtiment pour le gain dans la consommation d'énergie.

La végétation peut constituer une seconde enveloppe du bâtiment et peut se manifester dans les cours intérieures, les plafonds végétaux (tonnelle, pergola, auvent), les murs (verdissement des fenêtres), les plantations sur balcons et terrasses, et particulièrement les toitures végétalisées.

« Le toit reste de loin la partie la plus confrontée aux aléas climatiques, puisque l'incidence du rayonnement solaire par une claire journée d'été, la perte de chaleur par émission de grande longueur d'onde pendant la nuit d'hiver, la pluie et la neige sont autant de phénomènes qui affectent le toit plus que n'importe quelle autre partie du bâtiment » (Givoni, 1978, p. 163).

La végétalisation des toits constitue une substitution aux espaces verts au sol sacrifiés pour l'urbanisation, puisqu'elles permettent la restitution des surfaces végétales sur les toits, la création de microclimats et d'innombrables autres avantages ; d'ordre environnemental, écologique, économique, social et autres...

En effet, la végétalisation des toits (toits jardins) est une technique ancienne très répandue dans les pays nordiques ou les pays chauds comme régulateur thermique. Elle fût modernisée sous le volet du développement durable en système extensif peu coûteux et efficace, utilisé pour ce qu'il offre en matière de rafraîchissement passif des bâtiments et du confort thermique, mais aussi pour ses qualités d'isolation phonique très efficace.

III. Problématique

L'intérêt croissant à l'égard de la végétation (dans la ville et le bâtiment) est le facteur clé qui a motivé cette recherche, dans laquelle on s'intéresse particulièrement aux structures anciennes.

Les toitures végétalisées présentent une solution pour l'augmentation des surfaces vertes en ville, afin de contribuer à la biodiversité de notre environnement, elles constituent un moyen pour l'amélioration du cadre de vie en ville.

L'introduction des toitures végétalisées sur des toitures (contemporaines ou ancienne) nécessite une étude sur les structures porteuses évaluant la faisabilité et le type de toiture à introduire.

De ce fait, on veut poser les questions relatives aux toits végétaux, à leurs types et leurs caractéristiques, à leurs effets sur la régulation du microclimat urbain, dans un contexte local se rapportant à la ville d'Alger et particulièrement sur la périphérie de son centre historique.

A travers cette problématique on va essayer de répondre aux questions suivantes :

Peut-on adapter tout type de toitures végétalisées sur les différents types de toitures existants à l'hôpital Debaghine ?

Quels sont les critères de faisabilité ?

IV. Hypothèses

Les hypothèses suivantes sont émises :

- Il faut faire une étude (technique) sur les types de toitures végétales (pose et entretien) pour déterminer leurs caractéristiques et leurs adéquations.
- Il faut avoir recours à des méthodes de calculs théoriques des charges ainsi qu'à des simulations de structures pour évaluer la capacité portante de la toiture.

V. Objectif

Les objectifs visés par cette recherche consistent en la maîtrise des concepts de végétalisation des toits afin de vérifier l'adaptabilité de cette technique aux toits existants, et cela par rapport à :

- La volonté de réintroduire la nature et milieu urbain pour la lutte contre le phénomène de l'îlot de chaleur urbain.
- Déterminer de la capacité d'une structure existante de supporter des surcharges, notamment le poids d'une toiture végétalisée.
- Vérifier l'adaptabilités des types de toitures végétalisées aux structures préexistantes.

VI. Méthodologie d'investigation

Afin d'aboutir aux objectifs cités, et de vérifier les hypothèses émises, nous avons choisi d'analyser un exemple concret contenant plusieurs bâtiments.

En premier lieu, nous avons déterminé-en se basant sur nos connaissances acquises dans notre cursus- pour chaque bâtiment la charge de son toit et la capacité portante de sa structure. Ensuite nous avons comparé nos résultats aux caractéristiques des toits végétaux -recensés en amont- pour pouvoir finalement se prononcer sur la possibilité d'adapter cette technique au cas d'études.

VII. Structure du mémoire

La présente étude va être structurée autour de deux parties (figure 0-1) Une première partie théorique, et une deuxième partie pratique qui sera axée sur l'étude de cas :

1. Partie théorique :

Basée sur une recherche bibliographique et documentaire, cette partie va permettre une meilleure compréhension des éléments les plus importants se rapportant au sujet, à savoir les toits végétaux et les systèmes de recouvrement. Elle est composée de deux chapitres :

Le premier chapitre : a pour objectif la définition de tous les concepts se rapportant aux toits végétaux afin de mieux présenter les techniques de végétalisation des toits.

Le deuxième chapitre : il représente une synthèse des contraintes de conceptions et les avantages des toitures végétalisées, ainsi que des exemples d'adaptation de ces dernières.

2. Partie investigation :

Elle concerne la présentation de l'expérimentation effectuée dans le but de vérifier les hypothèses de cette étude. Trois chapitres sont consacrés à cette partie.

Le troisième chapitre a pour objet la présentation du cas d'étude, à savoir les différents types de structures existantes et le choix des entités.

Le quatrième chapitre concerne la présentation de l'expérimentation et l'interprétation des résultats.

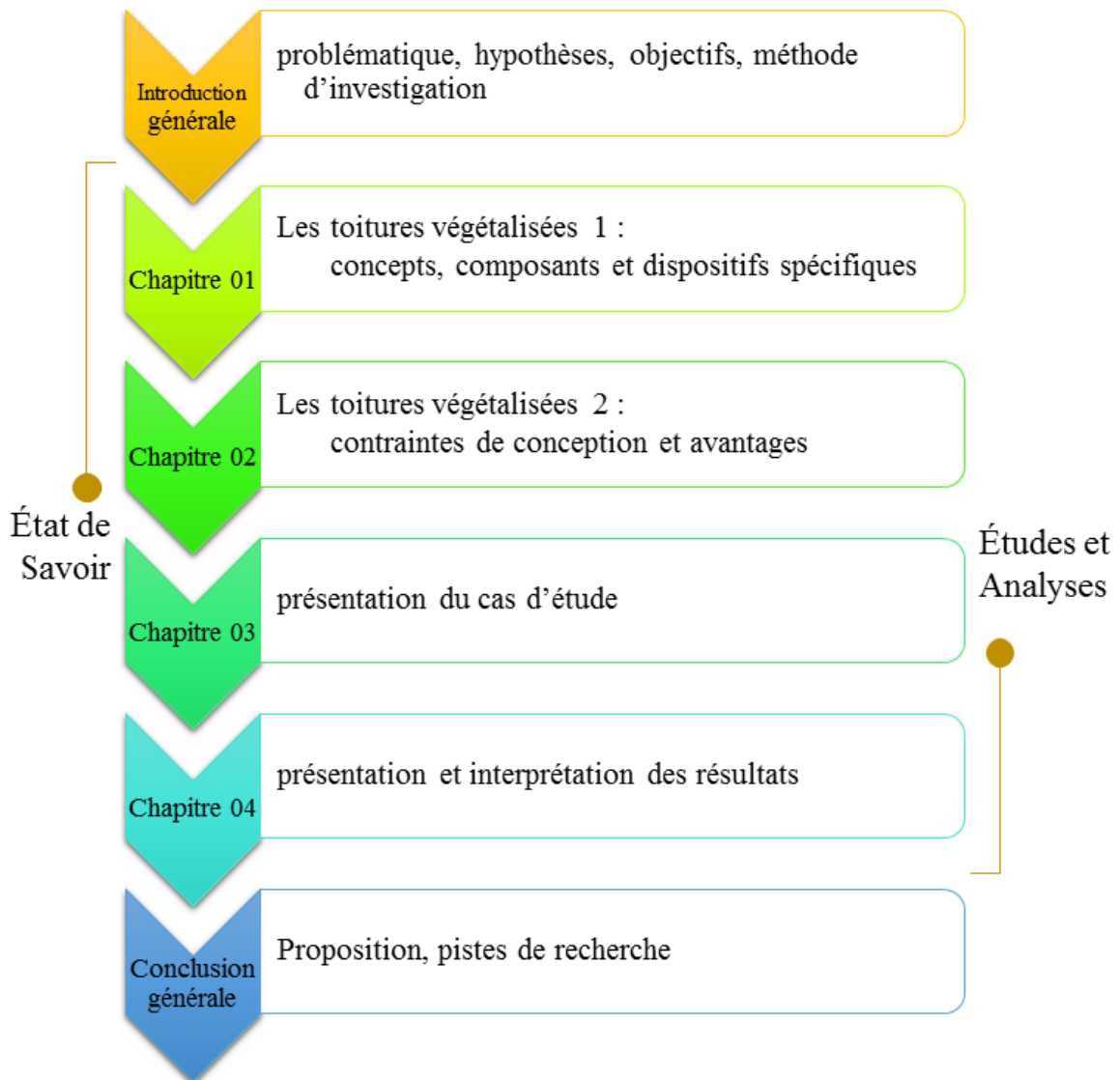


Figure 0- 1 : structure du mémoire (source : auteur 2017)

Chapitre 1 : les toitures végétalisées : concepts, composants et dispositifs spéciaux

Introduction

Dans les pays arabes, les terrasses -accueillant une gamme variée de fonctions domestiques et sociales- sont dotées de différentes plantes aromatiques, ornementales ou médicinales cultivées d'une manière assez simple dans des pots. Le but de ces aménagements est principalement de filtrer les radiations solaires, ombrer ces espaces en hauteur durant l'été et surtout procurer plus de confort la nuit.

Dans les pays nordiques, la végétalisation des toits à double pente est courante pour assurer une meilleure isolation des toits. Les procédés et techniques permettant l'intégration des végétaux sur les couvertures des bâtiments (toitures ou terrasses) variaient d'un pays à un autre.

Aujourd'hui, les techniques de réalisation sont modernisées et surtout uniformisées. Les toits horizontaux ou en pente, accessibles ou pas peuvent être directement recouverts de végétation. Ces derniers prennent différentes dénominations selon le type créé : terrasses jardins, toitures végétalisées, jardin sur dalle, toits verts... et sont considérés comme la solution de création de nouvelles surfaces de verdure dans les centres urbains.

Le présent chapitre retrace d'abord l'évolution des toits végétaux anciens, souvent contraignants à cause de leur poids, vers des systèmes plus légers et efficaces. Puis, les différents types et procédés de végétalisation des toits sont définis, ainsi que leurs composantes de base et leurs modes de mise en œuvre.

Par ailleurs, une attention particulière est portée aux caractéristiques requises pour les matériaux composant le système léger de végétalisation des toits (système extensif) concernant le complexe de culture et surtout le choix de la végétation et son adaptation à différents stress.

L'intérêt porté à la végétalisation extensive des toits à travers ce chapitre est dû à l'adaptabilité de ce système à différentes situations : toits en pente, toits plats, construction neuve ou existante.

I. Concepts :

Le toit est la partie du bâtiment la plus exposée aux conditions climatiques. Sachant que, la température au-dessus du toit affecte la température de la basse atmosphère, puisqu'il se trouve que certains toits d'immeubles (les tours) sont directement au niveau de celle-ci. La

réduction des températures sur les toits peut réduire les températures de l'air extérieur et par là, la consommation énergétique pour le conditionnement de l'air en été et en hiver.

C'est ce qui a rendu la végétalisation des couvertures horizontales ou inclinées des bâtiments une alternative au rafraîchissement des centres urbains et des bâtiments. Cette pratique devient de plus en plus recommandée et même exigée dans les centres urbains des villes développées vu le manque d'espaces verts au sol. La végétalisation des toits et son apport sur le Rafrâichissement intérieur seront l'intérêt de la présente recherche.

1. Définition du toit végétalisé

a. Définition du toit

Le toit est la partie supérieure d'un bâtiment. C'est une couverture qui met le bâtiment à l'abri des intempéries (pluie, neige, grêle, vent et soleil). Le toit doit être d'abord muni de membrane d'étanchéité afin d'éviter les infiltrations de l'eau à l'intérieur du bâtiment, puis doté de différents revêtements qui protègent celle-ci (dalle en bois, carrelage, tuiles, gravillons)

Le terme toiture-terrasse vient de ce que, dans l'antiquité, la toiture ainsi dénommée était recouverte de terre (Mouchel, 1978, p. 237), C'est une couverture dont la pente est inférieure à 15% (Mouchel, 1979). D'après Mouchel et Balayer, la toiture terrasse trouva d'abord son application en Grèce, en Egypte, en Perse et dans tout le bassin méditerranéen avant de s'étaler au Nord d'Europe et en Amérique.

Les toitures-terrasse peuvent dispenser sans frais supplémentaires des espaces utilisables pour divers usages (restaurants, jardins et solariums...). Elles augmentent l'espace utilisable et permettent de profiter de panoramas qu'on ne peut voir au niveau du sol.

b. Classifications des toits en Algérie

Les toitures sont classées en général selon leur accessibilité et selon leur pente. D'après le (CNERIB, 2005., p. 2), la classification en Algérie selon l'accessibilité regroupe :

- Les toitures terrasses inaccessibles
- Les toitures terrasses accessibles à la circulation piétonnière et au séjour
- Les toitures terrasses techniques (ou à zone technique)
- Les toitures terrasses accessibles à la circulation et au stationnement des véhicules légers

- Les toitures terrasses accessibles à la circulation et au stationnement des véhicules lourds
- Les toitures terrasses- jardins
- D'autres part, la classification selon les pentes comportent1 :
- Les toitures à pente nulle ($P < 2\%$)
- Les toitures plates ($2\% < P < 5\%$)
- Les toitures inclinées ($P > 5\%$)

c. Définition du toit végétalisé

La définition d'une toiture (dite) verte ou végétale est souvent liée à sa composition ou sa fonction :

Le principe de la toiture végétale (aussi : toit vert ou toit végétalisé) consiste à recouvrir de substrat, un toit plat ou à faible pente (jusqu'à 35° et rarement plus, au-delà, on parlera de mur végétalisé)².

La toiture végétalisée est une toiture recouverte d'un tapis végétal pour obtenir une meilleure intégration dans un site³.

« Le toit jardin est n'importe quel espace planté, prévu pour fournir le repos et le plaisir à l'homme ou l'agrément environnemental. Celui-ci est séparé du sol par un bâtiment ou toute autre structure » (Henderson, B., Miller, P. et al., 2003, p. 16).

2. Historique (apparition et développement)

L'idée d'introduire de la végétation sur les toitures remonte aux jardins suspendus de Sémiramis à Babylone sur le bord de l'Euphrate (actuelle Irak) en 605- 562 av. J.C (Jellicoe, 2000, p. 2). Ces jardins furent construits par Nabuchodonosor II afin de rappeler à son épouse Amytis de Mèdes les montagnes boisées de son pays natal. Ils furent longtemps considérés

²Encyclopédie Wikipédia, La toiture végétale, <http://fr.wikipedia.org>.

³ Encyclopédie Larousse, La toiture végétalisée, <http://www.larousse.fr>.

comme l'une des sept merveilles du monde. La figure (1-1) représente une gravure de ces jardins faite par Maarten van Heemskerck au XVI^e siècle.



Figure I- 1 : jardins suspendus de Babylone

(source : www.wikipedia.com, 2017)

Plus tard, dans l'Athènes antique et à Rome, on aménageait des jardins sur les toits traditionnellement plats à cause de la concentration urbaine. Cependant, c'est l'Islande qui est à l'origine de la construction type de ces toits. Leur utilisation sur des toitures à doubles pentes a gagné ensuite graduellement la Scandinavie puis le reste de l'Europe (Irlande, Norvège, Suède...) sous l'appellation de Chalet norvégien (Fig. 1-2). L'utilisation de ces toitures n'a atteint les prairies du Nord d'Amérique qu'au 19^e siècle (Do Nascimento, 2008).



Figure I- 2 : exemple de chalet norvégien

(source : www.studentsoftheworld.info, 2017)

Les toits verts ont été utilisés auparavant comme une enveloppe importante du bâtiment, essentiellement pour maintenir un climat confortable à l'intérieur des habitations, en

empêchant les déperditions thermiques et les infiltrations de l'eau à l'intérieur du bâtiment. On se protégeait donc des aléas climatiques, vent et froid mais aussi de la chaleur dans les pays tropicaux chauds (Guatemala et la Tanzanie), où l'on utilisait une végétalisation comparable à celle des pays nordiques (OFEFP, 1995, p. 12). Dans d'autres sociétés traditionnelles, que ce soit en Turquie, en Mongolie ou chez certains peuples amérindiens, la présence voulue ou acceptée de végétaux sur les toitures est courante puisqu'ils contribuent au rafraîchissement des volumes intérieurs en été.

Dès le XVIII^e siècle en Suède, le botaniste Linné a commencé à décrire des toits couverts de jubarbes à Stockholm (Anon., 2004). Par ailleurs, l'exposition universelle de Paris de 1867 a marqué un pas important dans l'histoire des terrasses-jardins pour les pays du nord, avec la présentation d'un modèle réduit du toit jardin d'une résidence située à Berlin.

D'après certains auteurs, l'utilisation des toitures végétales traditionnelles comme une partie de l'enveloppe du bâtiment a commencé à décroître dans un premier lieu au XIX^e siècle à cause de l'introduction des matériaux de toits conventionnels ; planches de bois, bardeaux de bois, tuiles et plus tard le bitume. Alors que, le développement moderne des toits végétaux a été stimulé en grande partie par le développement des techniques et matériaux de constructions modernes tels que le béton (Emilsson, 2005, p. 9). Ce qui est plus exact, puisque la généralisation du béton armé dans les constructions et l'apparition des toitures plates au XX^e siècle (dans les années 20) avec les cinq principes de l'architecture moderne a généralisé l'idée des toitures terrasses utilitaires notamment les terrasses plantées ou terrasses jardins. Le mouvement moderne en architecture a été décisif (avec l'idée de Le Corbusier en 1933 d'inclure une terrasse plantée à chaque bâtiment). Il formulait déjà l'idée de restituer sur les terrasses la parcelle de jardin ôtée au sol par la construction.

Les années 60 sont marquées par l'apparition des parcs publics, avec du gazon et des arbres, construits sur des stationnements souterrains dans un but d'exploitation pour les loisirs. Ces derniers sont réputés ; lourds et coûteux à la réalisation et surtout pour l'entretien. On les associe à la végétalisation intensive des toits.

Ce n'est qu'en 1970, que le Mouvement de l'environnement urbain est né en Allemagne permettant aux toits jardins d'occuper une importance primordiale dans la restitution de la verdure en ville en tant qu'amélioration écologique, créative et fonctionnelle de l'habitat et des lieux de travail (Do Nascimento, 2008). L'Allemagne est l'un des premiers pays qui s'est intéressé au développement des techniques de végétalisation, avec comme objectif, la

réduction des coûts de réalisation et d'entretien et la diminution des surcharges sur les structures des bâtiments. Ce qui a entraîné des recherches sur la simplification des procédés et techniques qui ont permis la fabrication de nouveaux matériaux de filtrage, de drainage et de substrats de culture artificiels, sur la phytosociologie, par l'observation de la végétation spontanée qui a envahie précédemment les toitures et les terrasses, ce qui a permis de distinguer les associations végétales naturelles possibles et de comprendre la capacité d'adaptation des végétaux aux aléas climatiques.

On s'intéressa aussi à la notion « d'entretien extensif » (par opposition à l'entretien intensif) qui consiste à restreindre au maximum les interventions d'entretien en privilégiant les essences indigènes et les plantes adventices (mauvaises herbes). Donc c'est une végétation proche de la nature qu'on recommande pour les nouveaux procédés légers.

3. Procédés de végétalisation :

La dénomination des toitures recouvertes de végétaux diffère selon les caractéristiques de la couche de culture (terre végétale, substrat de culture), l'espèce végétale ou le type d'entretien. Les Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées distinguent entre les toitures terrasses jardins (ressemblant à l'ancien procédé de végétalisation des toitures) et les terrasses ou les toitures végétalisées (nouveau procédé plus léger adaptable à différentes situations).

La végétalisation des toits représente l'action de créer des surfaces végétales sur les toits des bâtiments ou une autre structure. Il existe trois procédés de végétalisation des toits : la végétalisation intensive, la végétalisation extensive et la végétalisation semi intensive.

Le procédé de végétalisation est choisi par le propriétaire selon l'aspect final désiré et la possibilité de fréquentation de l'espace aménagé. Néanmoins, cela dépend de plusieurs paramètres et contraintes techniques puisque chaque procédé de végétalisation possède des avantages et des inconvénients qui le caractérisent.

a. Végétalisation intensive :

Les appellations correspondant à ce procédé sont « toiture/terrasse jardin », « terrasse à végétation intensive » ou « toit jardin ». Ce procédé consiste en la création de jardins

ressemblant à ceux aménagés sur le sol de par les différentes espèces végétales autorisées (plantes vivaces, arbres, arbustes, plantes grimpantes, gazon, etc.)

La terrasse à végétation intensive est caractérisée par un complexe de culture composé de terre végétale et d'un drainage. D'après les Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées de 2007, la pente du toit ne peut dépasser 5%, la profondeur de la terre végétale est supérieure à 30cm (jusqu'à 1m) pour un poids supérieur à 600 daN/m² (Déca Newton). Celui-ci peut varier selon les sociétés de 290 kg/m² à 1500 kg/m². Les toits jardins ne sont réalisables que sur dalle en béton. Ils entraînent des charges permanentes et des charges d'exploitations très importantes, qui doivent être prises en compte dès la conception.

Par ailleurs, ces jardins sur les toits peuvent être fréquentés et piétinés tout en nécessitant un entretien et un arrosage réguliers. Leur coût de réalisation et d'entretien est donc assez élevé.



Figure I- 3: végétation intensive

(source : Furlani, 1996)

b. Végétalisation extensive :

La végétalisation extensive¹ représente une végétalisation moderne basée sur le développement naturel d'une végétation rustique proche de la nature. Les espèces choisies ne nécessitent pas d'intervention (mousses, succulentes, vivaces et graminées), et l'apparition des

¹ Extensive : se rapporte à l'entretien extensif par opposition à l'entretien intensif (selon les concepts allemands) alors qu'en français, « extensive » fait référence au principe de colonisation naturelle, qui produit en quelque sorte une extension naturelle de la végétation.

espèces voisines fait partie de la dynamique naturelle du monde végétal (Lassalle, 2006, p. 27).

Ce type de toit végétal (Fig. 1-4) utilise au lieu de la terre un compost léger dont la composition diffère selon les sociétés spécialisées dans ce domaine. Son épaisseur varie entre 4 et 12 cm et son poids est compris entre 60 et 180 daN/m², ce qui le rend adaptable aussi bien pour les constructions neuves que pour les aménagements sur terrasses existantes. L'épaisseur est suffisante pour le développement d'un couvert végétal permanent de différentes espèces (plantation basse et serrée). L'arrosage autre que celui naturel n'est pas nécessaire (sauf en régions extrêmement sèches ou arides), favorisant les situations de stress qui provoquent des signes d'adaptation de la végétation, recherchés par les concepteurs puisqu'ils procurent différents aspects saisonniers.

La végétalisation extensive est adaptable à tous les types de toitures, plate ou en pente (acier, bois ou béton), cependant elle ne tolère qu'un piétinement occasionnel pour l'entretien (annuel) et donc, ce système est adaptable pour les toitures ou les terrasses inaccessibles.



Figure I- 4 : végétation extensive

(source : www.siplat.fr)

c. Végétalisation semi-intensive :

Appelée aussi dans certaines sociétés « jardin léger », c'est un type qui se situe entre les deux catégories précédentes. Le complexe de culture est plus important que celui de la végétalisation extensive, épaisseur du substrat entre 12 et 30 cm pour un poids compris entre 50 et 350 daN/m² et une pente ne dépassant pas 20% (ADIVET, 2007, p. 10). Ce qui permet le développement d'une végétation plus importante (lavande, romarin, gazon) dont l'entretien

et la fréquence d'arrosage sont plus réguliers mais restent modérés par rapport à la végétalisation intensive.

Ce système peut être appliqué en rénovation en raison de la quantité assez faible de substrat utilisé.



Figure I- 5 : végétation semi-intensive

(source : www.maisonentravaux.fr)

II. Composants types d'une toiture végétalisée :

Aujourd'hui, les toits verts se réfèrent à la même configuration de base pour tous types de végétalisation (intensif, semi-intensif ou extensif) et ils se composent essentiellement de deux complexes. Le complexe « étanchéité- isolation » mis en place sur un système pare vapeur qui protège l'élément porteur de l'humidité et des infiltrations de l'eau, et le « complexe de culture » qui comprend la couche de drainage¹, la couche filtrante et le substrat de culture. La végétation est ensuite installée selon différents modes de mise en œuvre. La figure (1-6) montre la disposition type des principales composantes de la toiture végétalisée.

La constitution du toit végétal dépend de nombreux paramètres : la localisation, la pente, les charges admissibles par l'élément porteur, les exigences esthétiques, le niveau d'entretien accepté par le maître d'ouvrage, etc.

¹ La couche de drainage fait partie du complexe de culture seulement si celle-ci permet le développement des racines (matériaux en agrégats minéraux poreux tels que pouzzolane, pierre ponce... et non pour les matériaux synthétiques)

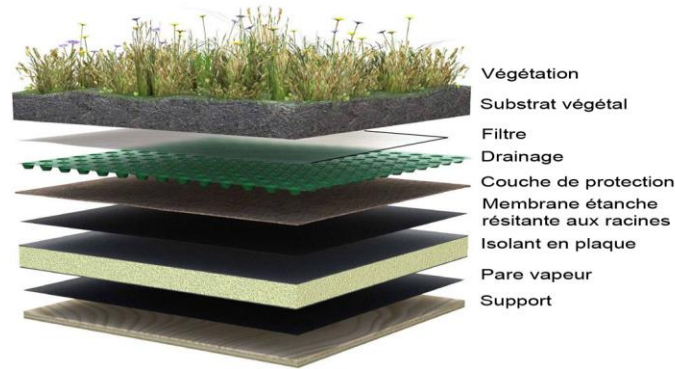


Figure I- 6 : les principales composantes d'une toiture végétalisée

(source : www.ma-maison-container.fr)

1. Complexe étanchéité-isolation :

a. Isolation

Les isolants choisis pour les toitures végétalisées doivent avoir une résistance à la compression compatible avec les charges prévues. Les panneaux isolants sont mis avant l'étanchéité anti- racine. Ils sont d'abord collés sur l'élément porteur, après que ce dernier soit préparé par une couche d'imprégnation et protégé par un pare-vapeur, afin d'éviter la formation de condensation sous l'isolant. Pour les pentes 5 %, l'utilisation de panneaux isolants en isolation inversée est également admise selon leur Avis Technique ou Document Technique d'Application (ADIVET, 2007, p. 14).

b. Étanchéité :

L'étanchéité est une protection qui rend le support imperméable aux infiltrations de l'eau à l'intérieur des bâtiments. Pour une toiture ou terrasse recouverte de végétation celle-ci devient plus importante. Depuis 1970, on rajoute des étanchéités anti-racines dont le principe est d'empêcher la pénétration des racines dans la membrane d'étanchéité (Lassalle, 2006, pp. 86-87). Celle-ci est appliquée sur toute la surface de la terrasse (parties courantes, zones stériles et les relevés).

La membrane d'étanchéité peut être en bitume, caoutchouc ou PVC, en bâche ou film plastique empêchant la pénétration des racines, en asphalte ou en membranes synthétiques.

2. Complexe de culture :

Le complexe de culture représente l'ensemble des couches explorées par les racines. Il peut être composé de substrat seul lorsque la couche de drainage ne permet pas aux racines de se développer (plaques de polystyrène alvéolé). Comme il peut être composé de substrat et de la

couche de drainage si celle-ci est constituée d'agrégats minéraux (argile expansée, pouzzolane...) pouvant être considérés comme un support de culture (Lassalle, 2006, p. 102).

Il se trouve que pour les toitures à végétalisation extensive, certaines couches peuvent être regroupées selon le choix, en système monocouche, bicouche ou multicouche (tri-couches selon certaines sociétés). Les épaisseurs des composantes sont précisées selon l'étude technique préalable. On distingue les configurations suivantes :

Configuration monocouche : dont un seul matériau assure les fonctions de drainage et de couche de culture, la végétation est directement plantée dans une couche de substrat.

Configuration bi-couche : avec mise en place d'un substrat et d'une couche de drainage. La couche filtrante est supprimée et la couche de drainage est renforcée.

Configuration multicouche : caractérisée par la mise en place des différentes couches (drainage, filtre, substrat) que ce soit pour la plantation, pour les rouleaux ou pour les plaques préculтивées. Parfois les systèmes préculтивés possèdent des réservoirs d'eau, séparés ou intégrés dans la couche de drainage, dans lesquels les plantes peuvent trouver l'eau nécessaire en période de sécheresse.

a. Couche de drainage

La couche de drainage doit assurer l'écoulement rapide des eaux de gravité vers les dispositifs d'évacuation des eaux pluviales, dans le but d'éviter l'asphyxie des racines. Les caractéristiques de cette couche (épaisseur, matériaux...) sont en fonction des charges admissibles du toit, de sa pente, des exigences de la végétation en eau (qui détermine la capacité maximale de rétention de l'eau de cette couche). Les drainages utilisés pour les toitures végétalisées sont :

Le drainage en agrégats minéraux poreux : tel que la roche volcanique, pouzzolane, la pierre ponce, les granulats issus de recyclage (brique ou tuile concassées et calibrées), billes d'argiles...

Le drainage en agrégats minéraux non poreux : tels que les gravillons roulés.

Les matelas de drainage synthétiques : ce sont des éléments alvéolaires et poreux tels que les panneaux en mousses plastiques, les plaques de polystyrène moulées et alvéolées, les éléments synthétiques prémoulés.

Les éléments drainant à réserve d'eau : tels que les bacs de drainage et de rétention d'eau (ADIVET, 2007, pp. 11-16).

b. Couche filtrante :

La couche filtrante est liée à la fonction du drainage. C'est un géotextile¹ en non-tissé qui ne constitue pas une barrière aux racines mais qui s'interpose entre les particules fines du substrat et la couche drainante (agrégats minéraux ou matériaux synthétiques) pour éviter son colmatage et faciliter son bon fonctionnement. Par ailleurs, le filtre offre un support mécanique à la fixation des racines. La couche filtrante est généralement réalisée par des nappes de fibres synthétiques (polypropylène ou polyester non- tissé) imputrescibles.

La mise en œuvre de la couche filtrante est coordonnée avec celle de la couche de culture. La couche filtrante n'est obligatoire que lorsque l'épaisseur de la couche de culture représente plus de la moitié de celle de la couche de drainage. En général, la couche filtrante est simplement déroulée sur la surface courante et relevée contre les reliefs ou dispositifs de séparation jusqu'au niveau supérieur de la couche de culture.

c. Substrat de culture :

En agriculture, un substrat est un mélange (terre, sable, compost, etc.) sur lequel on fait des semis. C'est le constituant principal des complexes de culture des terrasses et toitures végétalisées, il se substitue à la terre végétale des toitures terrasses jardins. Il doit être léger et résistant au compactage tout en retenant l'eau.

L'épaisseur totale du substrat peut ainsi être réduite à seulement 10 cm d'épaisseur, voire moins pour les rouleaux prévégétalisés de sédums. En zone tempérée l'épaisseur minimale convenant aux plantes très résistantes au gel est de 10 cm, sachant que 15 cm sont nécessaires pour bénéficier d'une plus grande variété de plantes. Le tableau (1-1) montre les plages d'épaisseur du substrat pour différents types de végétalisation et leurs épaisseurs moyennes.

Forme de végétalisation	Plage d'épaisseur du complexe de culture (cm)	Epaisseur du complexe de culture (cm)
Végétalisation intensives	de 30 à 100	50
Végétalisation semi- intensives	de 15 à 40	25
Végétalisation extensives	de 5 à 25	10

Tableau I- 1 : Les plages d'épaisseur du substrat de culture

(Source. François Lassalle, 2006)

¹ Textile non-tissée de fibres synthétiques entremêlées par aiguilletage ou thermo-liage, imputrescible. Est utilisé en génie civil pour la séparation et le renforcement des sols pour les routes, barrages, aéroports, toitures, etc.
Source : https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/

1. Les propriétés physiques de la couche de culture (substrat) :

Le rôle principal du substrat est d'être un support physique pour la végétation (permettant l'ancrage des racines) en plus de son approvisionnement en nutriments, en eau et en oxygène. Le choix du substrat et de son épaisseur est fonction dans un premier lieu de la capacité portante de la structure et d'autre part, du choix de l'espèce végétale et ses besoins.

Pour cela, la texture des substrats est très importante pour les toitures à végétalisation extensive puisque l'intervention post- installation est très réduite.

Par ailleurs, la structure conditionne l'ensemble des phénomènes physiques et biochimiques du sol nécessaires pour le développement des végétaux et pour l'aspect général qu'ils auront. De ces phénomènes on distingue l'aération et la possibilité de respiration des racines; les phénomènes thermiques dans le sol et la rétention par les forces capillaires d'une réserve d'eau.

Le poids à (CME) est considéré comme la valeur maximale atteignable sur le toit, et il est pris en compte dans le calcul des charges sur le toit.

2. Procédés de mise en œuvre des substrats

Le substrat des végétalisations extensives et semi- intensives peut être :

Soit incorporé à un rouleau de végétation ou à une caissette.

Soit disposé à l'état meuble ; son épaisseur doit tenir compte d'un tassement ultérieur de 10 à 20% (ADIVET, 2007, pp. 11-16). Celui-ci est réparti manuellement puis nivelé au râteau. La répartition doit être régulière et le nivellement de surface correct en contrôlant en plusieurs points l'épaisseur. Par ailleurs, le substrat peut aussi être soufflé directement sur le toit (Fig. 1-7).



Figure I- 7 : A gauche : Soufflage du substrat à l'état meuble. A Droite : Répartition manuelle du substrat meuble

(source. Sopranature, Soprema, Brochure, 2008)

3. Complexe végétale :

a. Critères de choix des végétaux

Larcher et Gelgon (Larcher, 2000, p. 127) considèrent que la sélection des végétaux pour un aménagement doit prendre en considération l'analyse de certains paramètres. On retrouve :

- Les paramètres édaphiques (structure, texture, pH, profondeur du sol...)
- Les paramètres climatiques (températures, pluviométrie, ensoleillement, luminosité...)
- La disponibilité spatiale (pour le développement optimal du végétal)
- Les critères propres à la végétation (dimensions, époque de floraison, feuillage, adaptations ...)
- Le facteur phytosociologique (association des végétaux, et leur comportement en groupe, ainsi que les ambiances qu'ils génèrent).

Aux paramètres précédents, la végétation accompagnant un bâtiment doit s'accorder avec le style architectural. La végétation doit s'adapter progressivement à son milieu en étant résistante à différents types de stress (thermique, hydrique et lumineux) pour pouvoir accomplir son rôle esthétique, environnementale ou autres. Sachant qu'il est normal que certaines espèces disparaissent partiellement ou totalement au profit d'autres espèces.

La végétalisation intensive des toitures terrasses tolère des espèces végétales aussi vaste que pour une plantation au sol, suivant l'aménagement désiré (herbes, gazon, fleurs, arbrisseaux, arbustes, arbres, plantes grimpantes...) vu l'épaisseur de la terre végétale mise à leur disposition, celles-ci nécessitent par contre plus d'entretien. Pour des épaisseurs de substrat

plus faibles (végétalisation semi- intensive et extensive), le choix diminue et surtout devient plus exigeant et contraignant.

b. Critères de choix des végétaux pour les systèmes de végétalisation extensifs :

Les espèces recommandées pour les végétalisations extensives doivent répondre à certaines exigences telles que :

- L'aptitude des végétaux à couvrir le sol.
- La capacité d'auto- régénération.
- La résistance et l'adaptation aux conditions climatiques les plus stressantes
- La capacité de la végétation à se développer dans des épaisseurs de substrat très faibles.

De faibles exigences sur le plan de la nutrition et d'arrosage.

La résistance à la pollution, aux parasites et à la concurrence grâce à la sociabilité des végétaux.

Le paramètre esthétique dépend de l'aspect souhaité (texture, couleur, changement d'aspect, persistance du feuillage...).

Les plantes choisies doivent être répandues dans la région pour que leur adaptation au climat soit rapide avec un minimum de maintenance.

D'après Lassalle (2006), seule l'expérimentation du terrain réalisée sur trois années au minimum permet de s'assurer de la bonne adaptation des plantes, à partir d'un travail livresque et d'observation prenant en compte les critères précédents.

c. Modes de mise en œuvre de la végétation sur les toits

Le mode de mise en œuvre pour la végétalisation extensive et semi intensive (jardins léger) est fait selon différents procédés dont chacun possède des avantages et des inconvénients. Ces procédés sont :

Le semis et le bouturage :

Le bouturage représente la mise en terre de fragments de tiges qui racinent rapidement dès l'instant que le sol n'est pas totalement sec. Ce mode de mise en œuvre correspond aux espèces à feuilles larges (*Sedum spurium*, *Sedum floriferum*...). Le semis représente la manière de semer, c'est-à-dire de propager une espèce, une variété ou un cultivar à partir de semences (Côme, 2006, p. 182).

La plantation :

Consiste à répartir sur le substrat des plantes précultivées dans des contenants (plaques, godets, micromottes ...) suivant l'épaisseur correspondante et le Plan de plantation. La plantation de micromottes s'effectue à raison de 15 à 25 unités/m² et les godets par 12 à 15 unités/m².

Les éléments prévégétalisés :

Utilisées pour les végétalisations extensives, ils présentent l'avantage de procurer un effet immédiat, une mise en œuvre facile, un entretien initial presque nul. En plus c'est une façon sûre de traiter les risques d'érosions dus aux pentes ou aux vents. On distingue : les plaques, les tapis, les rouleaux et les bacs prévégétalisés.

Les rouleaux précultivés : Les végétaux prennent racines dans un substrat de type extensif, sur un support en fibre de coco (5cm d'épaisseur) ou sur une trame tridimensionnelle en fil de nylon rigide (20 mm d'épaisseur) associée à un filtre en polyester non tissée (Lassalle, 2006, p. 123).

Les plaques et tapis précultivés : Plantées de sedums sur de très faibles épaisseurs, ces plaques constituent le système de végétalisation des toitures extensives le plus léger existant, dont l'épaisseur du substrat de culture peut être de seulement 25 mm, et dont le poids varie de 40 à 60 Kg/m².

d. Autres aspects :

En fonction du mode de mise en œuvre retenu, l'aspect final de la végétation est obtenu après une durée variable : immédiate ou différée. Celle-ci peut s'étaler jusqu'à deux ans pour les systèmes semés, alors qu'un gazon installé dans la saison appropriée, prend dans le mois qui suit. La durée moyenne nécessaire pour que se réalise l'état d'équilibre souhaité, quel que soit le mode de mise en œuvre choisi, est de deux ans. Le tableau (II-4) montre les taux de couvertures et la période de mise en œuvre des végétaux.

Mode de mise en oeuvre	Période de mise en œuvre	Taux initial après mise en oeuvre	Taux de couverture à 1 an	Taux de couverture à 3 ans
Eléments Précultivés (bacs et tapis bacs...)	Toutes saisons ^a	70 %	80 %	80 %
Plantation de micro mottes ou Godets	Printemps ou automne ^b	5 %	60 %	80 %
Semis de fragments ou de Graines	Printemps ou automne ^c	0%	40 %	80 %
^a Sauf période de sécheresse ou de gel ^b A moduler en fonction des zones climatiques (sur conseil du tenant du procédé) ^c Milieu de printemps et début d'automne				

Tableau I- 2 : Période de mise en œuvre et taux de couverture de la végétation

(Source : F. Lassalle, 2006)

III. Dispositifs spécifiques :

1. Zones stériles

Les zones subissant des contraintes particulières (absence de pluie, couloir de vent, réflexion solaire intense, zone ombragée, ...) sont à considérer comme des zones singulières et sont aménagées comme des zones stériles par des protection minérales. Elles n'entrent pas en considération dans l'appréciation du taux de couverture global.

En général, ce sont les périphéries des ouvrages construits et des ouvrages émergents (lanterneaux, cheminées...) qui reçoivent ce traitement périphérique par une bande non végétalisée d'une largeur minimale de 0.40m de préférence (Fig. 1-8). Cette bande stérile est

pourvue de graviers ou dalles pour permettre l'accessibilité aux zones les plus sensibles du système d'étanchéité, elle offre la possibilité de dégagement des eaux pluviales en direction des évacuations fréquemment placées dans les angles et à la périphérie. Le but de ce dispositif est de faciliter l'entretien des évacuations pluviales et des relevés d'étanchéité.

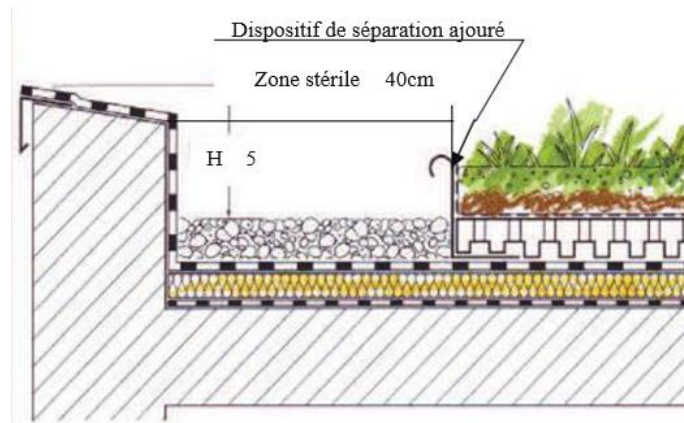


Figure I- 8 : Aménagement de la zone stérile recouverte de gravillons

(Source : Verdura, Eternit, Brochure 2008)

La zone stérile et la zone végétalisée sont délimitées par un dispositif de séparation.

2. Dispositifs de séparation

Le dispositif de séparation est une barrière qui marque la séparation entre la zone stérile et la zone végétalisée. Cette dernière est en général, une bande ou une équerre ajourée maintenue en place sur l'étanchéité à l'aide de pattes en membrane d'étanchéité collée ou soudée. Sa fonction est de retenir la couche de culture (drainage, substrat) et de permettre le passage de l'eau vers les dispositifs d'évacuation (Fig.1-8).

Cette séparation peut être constituée de bandes métalliques d'épaisseur adaptée à la poussée qu'elles vont recevoir (alliage d'aluminium ou en acier inoxydable), ou des bordures en béton ou en brique.

3. Chemin de circulation

Pour accéder aux équipements techniques, des chemins de circulation doivent être aménagés ; leur protection étant posée sur la couche de drainage, sur la couche filtrante, sur la couche de culture ou éventuellement sur le revêtement d'étanchéité.

La zone stérile ne constitue pas un chemin de circulation, mais si les concepteurs lui confèrent cette fonction, alors ils doivent prévoir l'installation d'un garde-corps en rive et autour des

ouvrages présentant des risques de chute. La largeur de ces zones de passage est alors portée à environ 0,80 m.

4. Evacuations des eaux pluviales

Les évacuations doivent être assurées selon la réglementation des bâtiments qui précise le nombre et le diamètre des canalisations de sortie en fonction des surfaces de la toiture.

Elles sont équipées d'un garde- grève visitable et sont soit bordées par une zone stérile sur 40 cm minimum, soit protégées par une forme de regard.

Un contrôle annuel et un nettoyage de ces évacuations pluviales sont obligatoires, ceci afin de protéger la toiture des risques de mise en charge surtout pour les pentes nulles.

5. Documents graphiques

La toiture végétale doit être conforme aux normes ou règlements, en ce qui concerne les caractéristiques du complexe de culture ou de la végétation ; les plans d'aménagement, les dispositifs particuliers à prévoir sur les toits... Et le plus important, c'est l'adaptation du procédé de végétalisation aux diverses contraintes selon le projet.

Avant toute conception de toiture végétale, on doit prendre en considération les contraintes techniques générales (architecturales, surcharges sur le toit...) et les contraintes techniques particulières (exigences en matière de rétention en eau, accessibilité à la terrasse pour la mise en œuvre comme pour l'entretien, l'arrosage...), mais aussi les contraintes esthétiques et l'aspect général de la toiture après végétalisation.

Tous les matériaux doivent être sélectionnés dès le départ selon les critères cités plus haut. Par ailleurs, des plans, des coupes et des détails de construction de la toiture végétale doivent accompagner le projet. Ceci, afin de déterminer la disposition de la toiture végétale par rapport à la surface totale de la toiture; l'accessibilité usuelle de la toiture ou occasionnelle (terrasse inaccessible); les aménagements particuliers (espace de repos ou autres) pour la toiture- terrasse jardin, ou les cheminements pour celles à accessibilité modérée.

Par ailleurs, les concepteurs des toits végétaux doivent fournir le maximum de détails sur les zones particulières, les emplacements des évacuations des eaux pluviales et leurs protections. Ainsi que toutes techniques utilisées pour la végétalisation du toit (dispositif de séparation, zones stériles, chemin de circulation et son revêtement ...).

Un plan de plantation doit être fourni lorsque le choix se porte sur une répartition non homogène des espèces végétales retenues, de même en cas d'utilisation de configurations

différentes sur un même projet. Le plan de plantation doit être accompagné de coupes afin de donner une idée plus claire sur la plantation prévue (Fig.1-9).

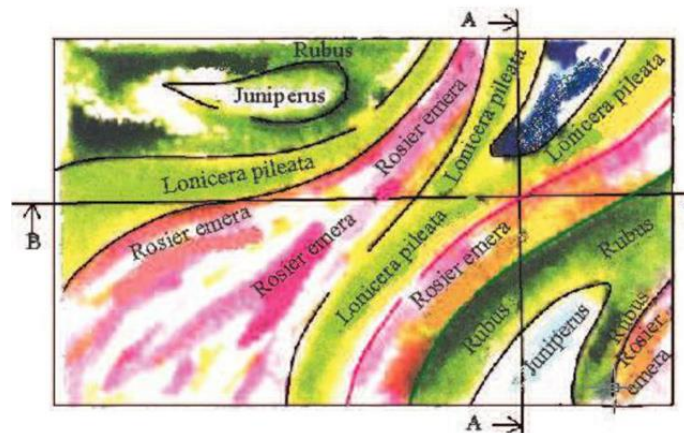


Figure I- 9 : Exemple de plan de plantation d'une toiture végétalisée semi- intensive

(Source. SOPRANATURE, Soprema, brochure, 2008)

6. Textes législatifs

Les toitures végétalisées telles que présentées en amont, ne font pas objet d'un règlement, d'une norme ou d'un document technique réglementaire en Algérie. Que ce soit pour spécifier les types de végétalisation, les procédés de mise en œuvre ou les caractéristiques des matériaux utilisés. Seulement deux documents techniques citent le système de végétalisation intensive, sans mentionner cette appellation récente. On les distingue par «toiture- terrasse jardin», ou «dalle- jardin» sans donner non plus de détail sur la conception, la réalisation ou les matériaux utilisés pour ces toitures.

Le document technique réglementaire (DTR. E4-1) édité en 2005 par le CNERIB, traite de l'étanchéité des toitures- terrasses jardins. Les informations y figurant restent générales et sans le moindre détail permettant la réalisation d'une toiture- terrasse jardin dans les normes. Par ailleurs, jusqu'en 2005 aucune mention n'a fait référence à la végétalisation extensive ou semi-intensive.

Quant au DTR. (B.C.2.2), il mentionne une seule fois les «Dalles- jardins» en spécifiant la valeur de la charge d'exploitation de celle-ci (évaluée à 1 kN/m²). Aucun autre détail sur la procédure de calcul des charges permanentes à prendre en considération avant la conception de ces toits jardins n'est mentionné.

De ce fait, l'Algérie reste très en retard dans ce domaine. Elle n'a pas encore de règlement spécifique à ces aménagements, que ce soit pour la végétalisation intensive ou extensive. Et

même les règlements qui ont traité d'une manière anodine ces jardins sur le toit, sont très brefs sur la description des caractéristiques des matériaux et pas assez clairs sur la conception ou la réalisation de ces terrasses- jardins, mais aussi sur les espèces végétales à choisir, les épaisseurs admises, ou leurs poids à capacité maximale en eau.

IV. Conclusion

Le concept de végétalisation des toits n'est pas nouveau, les peuples anciens maîtrisaient des techniques leurs permettant de faire pousser des végétaux sur les toits. Les contraintes de forte charge et d'entretien des systèmes intensifs ont poussé les chercheurs à développer de nouveaux systèmes de végétalisation des toits, plus légers et efficaces, appelés toitures à végétation extensive.

La végétalisation extensive s'est développée grâce à la création d'étanchéité anti- racines, de substrats et systèmes de drainages à grande capacité de rétention de l'eau. Ces derniers sont nécessaires pour la survie des plantes. Malgré cela, les espèces choisies pour la végétalisation extensive doivent être, des plus résistantes possible aux aléas climatiques et au manque d'entretien. Les plantes succulentes de type CAM (crassulacées) sont vraisemblablement les seules adaptables pour les végétalisations extensives.

Ceci n'entrave en rien leur rôle esthétique, puisque les plantes succulentes peuvent engendrer, grâce à des adaptations anatomiques et physiologiques, des aspects changeants et originaux recherchés au fil des saisons dans l'environnement neutre et inerte des centres urbains.

Le développement des matériaux composants les systèmes de végétalisation extensive des toits a comblé les lacunes des systèmes de végétalisation intensive. Cependant l'analyse de certaines contraintes régissant la conception de ces toits ne peut être écartée, et ce, afin d'assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages. Ce qui constitue l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 2 : les toitures végétalisées : avantages et contraintes de conception

Introduction

Longtemps spécifiés comme poumons de la ville, les jardins sur le sol avec leurs multiples avantages deviennent de plus en plus rares. L'urbanisation intense a fait que les toits des bâtiments, souvent considérés comme espaces perdus, inutiles, inutilisables et repoussants, ont une surface plus importante que celle végétale. Ils deviennent les seuls espaces dont on dispose pour récupérer la surface végétale dans les centres urbains.

Henri Sauvage préconisait d'ailleurs, des bâtiments à gradins dans lesquels chaque logement bénéficierait d'une terrasse, balcon ou loggia devant être plantés. Il recommandait pour cela, l'intégration dès la construction de bacs à plantes bien étudiés du point de vue de l'étanchéité et de l'écoulement des eaux (Blumenthal, 1977, p. 27).

Par ailleurs, l'aménagement d'un jardin sur balcon ou terrasse relève de son utilisation rationnelle et fonctionnelle avant tout (Faustine, 1989, pp. 4-5). En effet, depuis leur conception, les terrasses et balcons doivent être agrémentés de végétation selon la fonction qu'ils reçoivent pour le bien être de chacun. Lorsqu'on dispose d'une grande surface, on devra planter des végétaux de manière à recréer le cadre typique du jardin avec : espace de repos, espace de détente, zone ombragée... Dans le cas contraire, mis à part l'agrément visuel, la terrasse végétalisée inaccessible présentera autant d'avantages d'utilité publique ou privé qu'un jardin sur le sol.

Cependant, la conception d'un toit végétal mérite plus d'effort. David Stevens pense que les jardins sur les toits doivent répondre à des exigences très particulières, puisqu'ils se trouvent le plus souvent dans un environnement hostile balayé par le vent (Stevens, 1988, p. 25). En effet, les contraintes régissant la conception de ces toits écologiques sont aussi variées et importantes à examiner.

Le présent chapitre a pour objet de déterminer d'une part, les contraintes et les avantages de la conception d'une toiture végétalisée. Et d'autre part, de définir les caractéristiques techniques de ces toits.

I. Avantages des toitures végétalisées :

Aujourd'hui, on arrive à admettre que l'intégration des processus naturels dans la conception urbaine est souvent plus attrayante, plus efficace, plus rentable et plus durable que des infrastructures construites. De ce fait, la mise en place des terrasses et toitures végétalisées est

aussi susceptible d'apporter un certain nombre d'avantages d'utilité publique ou privée. On compte de avantages :

1. Ecologiques et environnementaux

Amélioration de la biodiversité :

Comme tout espace vert au sol, les toits végétaux améliorent la biodiversité et sont considérés comme des réservoirs biologiques sur les toits en pleins centres urbains. Ces installations écologiques sont propices au développement de biodiversité végétale intéressante, en faisant appel en partie à des espèces non cultivées et même à des plantes adventices que parfois les constructeurs les souhaitent nombreuses et aussi diverses que possible (Hough, 1995).

Contribution à la purification de l'air et à la création de microclimats :

Les toits végétaux permettent l'amélioration de la qualité de l'air, en agissant comme filtre. Puisque d'une part, la végétation produit une grande quantité d'oxygène grâce à la photosynthèse. Et d'autres part, selon les travaux de (Nowak, 1998) et de (Banting, 2005) la surface des feuilles, l'évapotranspiration et la rosée engendrées, participent à la séquestration des polluants atmosphériques et des poussières. Ceci réduit l'effet du smog et rafraîchit l'atmosphère. Sachant par exemple, qu'un mètre carré de toit vert (gazon) capture environ 0,2 kg de particules en suspension dans l'air par jour (Laroche.D, 2004, p. 3).

La gestion et la régulation des eaux pluviales :

Les toitures représentent jusqu'à 20% des surfaces de nos villes, elles accueillent les eaux de pluies, qui sont directement acheminées vers les réseaux d'évacuations. Ceci surcharge les égouts ou les stations d'épuration d'eau, en causant parfois des inondations et des dégradations environnementales. Ces problèmes peuvent être évités par les toitures végétalisées grâce au substrat et à la strate végétale qui, retiennent une grande partie de l'eau de pluie. D'après Lassalle (2006), même les végétalisations extensives des toitures sont efficaces et ont un effet sur la gestion des eaux pluviales, en agissant selon deux effets :

Effet de rétention de l'eau : À l'image d'une éponge, ces surfaces perméables retiennent un certain temps, une partie de l'eau pour éviter l'engorgement des réseaux d'évacuations et les inondations. L'eau retenue dans le substrat, le drainage et les plantes est recyclée et restituée par la suite à l'atmosphère grâce au phénomène de l'évapotranspiration.

La rétention de l'eau dans le complexe de végétalisation des toits a une répercussion intéressante sur l'économie d'énergie pour la climatisation. Une expérimentation effectuée à Rio de Janeiro (Brésil) en 2004, a révélé que sur un total de précipitation de 556mm (durant neuf mois), la rétention des eaux pluviales par une toiture à végétation extensive a atteint 60.3%. Ce qui permet de réduire le besoin de climatisation de 228 kW/h par m² de toiture végétalisée grâce à l'évapotranspiration de l'eau retenue (335mm). (Laar, 2006).

Effet retard à l'évacuation : après saturation du substrat, une partie de l'eau absorbée est évacuée dans les canalisations avec un retard favorisant un bon écoulement de l'eau et l'alimentation des nappes phréatiques en cas de sol perméable. Sachant que, pour l'ensemble des séquences de pluies d'orages décennales, le coefficient moyen d'imperméabilisation¹ de la terrasse est de l'ordre de 98 % pour une terrasse nue, 80 à 95 % pour une terrasse gravillonnée et 45 à 80 % pour une terrasse végétalisée selon les systèmes et les zones climatiques. Par ailleurs, une partie de l'eau résiduelle issue d'une toiture végétalisée peut être réutilisée pour usage d'eau non potable (arrosage, chasses d'eau...).

2. Urbanistiques et sociales

Insertion paysagère du bâtiment dans son environnement : Josef Hoffmann fait partie des précurseurs des toitures végétalisées. Il prévoyait l'aménagement de grands espaces plantés sur les terrasses des immeubles d'habitation à plusieurs étages, comme solution pour alléger l'aspect brutal des grands ensembles locatifs des villes en les rendant plus nuancés, plus attrayants (Rainer, 1972, pp. 75-83).

Les toitures végétalisées permettent aux bâtiments en hauteur de bénéficier d'une plus belle percée visuelle sur des bâtiments moins élevés. En général, la végétalisation de cette cinquième façade par un choix vaste d'espèces, permet d'adapter les couleurs et les formes de ces dernières aux caractéristiques du bâtiment et du site. Au lieu de voir les systèmes de ventilation, de climatisation et les différents matériaux composant les toitures qui sont parfois tristes à regarder, il serait beaucoup plus intéressant d'y observer une toiture verte qui offre une excellente solution d'agrémenter ces espaces, d'intégrer le bâtiment dans son

¹ Le coefficient d'imperméabilisation moyen correspond à la proportion d'eau de pluie renvoyée au réseau après environ 3 heures.

environnement et de créer un cadre de vie aux répercussions positives sur l'équilibre psychologique des habitants.

Offrir des surfaces végétales supplémentaires : Les toits végétaux offrent l'unique possibilité - à part les cours- d'aménager de nouveaux espaces verts à l'intérieur des villes densément bâties. Ils sont déjà considérés en Allemagne, en Suisse et aux Pays- Bas, comme un élément structurant des projets d'urbanisme et comme un nouveau type d'espaces verts participant à la satisfaction de besoins psychologiques et sociaux des citoyens en cas d'une végétalisation intensive. D'autre part, les toitures inaccessibles à végétation extensive, atténuent l'aspect artificiel des constructions, offrent au regard d'avantage de nature, ce qui influe sur la perception et l'appropriation de l'espace.

La végétalisation des toits peut aussi avoir des répercussions sur la santé physique des citoyens. Mis à part, la purification de l'air, une étude effectuée en 1986 par les professeurs Ulrich et Simmons a permis de démontrer que les plantes permettent d'atténuer le stress, de diminuer l'hypertension, de contribuer au relâchement musculaire et de doper les émotions et sentiments positifs (Leroux, 2005, p. 8).

Par ailleurs, les travaux de R.Kaplan et S.Kaplan en 1989 et de S.Kaplan en 1992, ont démontré que les aires naturalisées ont une incidence sur l'état mental, l'humeur et le sentiment de sécurité des gens, ce qui contribue à la sociabilité (Hudson, 2000). L'expérience canadienne, a démontré qu'on peut profiter de ces espaces perdus pour une nouvelle activité écologique à savoir ; l'agriculture urbaine, qui est bénéfique aussi bien pour le bien- être psychologique des habitants, pour les relations sociales, que pour l'économie des villes.

3. Economiques

Economie sur le coût d'exploitation des bâtiments : Mis à part, l'économie d'énergie pour le chauffage et la climatisation, les toits végétaux peuvent doubler la durée de vie des toits traditionnels, selon l'expérience européenne. Celle-ci est estimée à une moyenne de 60 ans par Denis Gingras. La fonction de protection des étanchéités a été vérifiée en 1983 par Darius et Drepper, pour des toitures à colonisation spontanée. Où les toits après plusieurs années de colonisation ne présentaient aucun signe de détérioration due à la végétation spontanée (Lassalle, 2006, pp. 34-35).

La végétalisation des toits constitue donc une couche supplémentaire protectrice de la membrane d'étanchéité par la réduction de l'amplitude thermique journalière et annuelle qui évite les chocs thermiques (pluie froide sur les toitures chaudes) et réduit ainsi les

sollicitations mécaniques de la toiture (dilatation, rétraction). D'autre part, le substrat permet de bloquer les rayons ultraviolets (UV) qui sont responsables d'environ 5% du vieillissement des membranes (Crégut, 2004), en plus de la protection contre le poinçonnement, les gaz et les agents atmosphériques.

La protection et la prolongation de la durée de vie du toit procurée par les toits végétaux permettent de réduire les travaux de réfection des couvertures et d'économiser sur le coût d'exploitation des immeubles à long terme.

Economie d'intérêt public : Les expériences déjà réalisées dans divers pays européens montrent que les toits végétaux contribuent aussi à la réduction des dépenses dans d'autres domaines. Tels que : les dépenses de santé ; de nettoyage des poussières dans la rue, les dépenses d'entretien et de réparation dues aux inondations, aux dysfonctionnements des réseaux d'eaux pluviales, des égouts ou des stations d'épuration... En plus de la réduction du coût de revient à long terme, même si le coût de réalisation reste plus important pour les toits végétaux.

4. Architecturaux

Confort acoustique des bâtiments : L'un des avantages de l'installation d'une toiture végétalisée est l'augmentation du confort et de l'isolation acoustique par le substrat, les plantes et l'air, qui isolent le bâtiment du son par absorption, réflexion et déflexion. Le substrat de culture bloque les basses fréquences et les plantes, les hautes fréquences. Selon les essais menés à ce jour, un substrat de 12 cm à lui seul peut atténuer les bruits de 40dB (Peck, 2013, p. 7). L'isolation aux bruits aériens sera d'autant améliorée que la toiture verte est épaisse (loi des masses), alors que l'isolation aux bruits d'impacts (pluie, grêle) sera améliorée même pour de faibles épaisseurs, de même la réflexion des sons sera également limitée.

Le confort thermique des bâtiments : La toiture végétalisée participe à l'amélioration du confort thermique intérieur et donc permet d'importantes économies d'énergie surtout pour la climatisation, puisque les températures dans les villes, peuvent être régulées grâce au tapis végétal, qui va à l'encontre de l'effet de serre et de l'îlot de chaleur urbain.

En effet, l'amélioration du microclimat urbain par la baisse des températures de l'air, l'ombrage et l'évapotranspiration au-dessus des toits, permettent de réduire sensiblement les températures surfaciques des toits. De telle manière qu'une membrane de toiture exposée au soleil peut atteindre une température de surface de 65°C alors que, la même membrane recouverte de végétaux demeure à une température de 15 à 20°C (Crégut, 2004).

En hiver, l'isolation supplémentaire fournie par le substrat contribue à réduire les besoins énergétiques pour le chauffage. L'ampleur des économies d'énergie dépend de la taille de l'immeuble ; de son emplacement; de la profondeur du substrat de croissance; du type de plantes et d'autres variables. Cependant c'est en été que les économies d'énergie sont importantes.

II. Contraintes de conception :

Instaurer un paradis de verdure sur une terrasse est un vrai défi puisque les contraintes sont variées : pollution de l'air, paramètres climatiques, contraintes techniques... Il est primordial de concilier à la fois l'esthétique à la fonction de la plante et ses besoins. Pour cela, plusieurs facteurs doivent être pris en considération avant la conception afin d'obtenir le confort souhaité.

En France, les Règles Professionnelles pour les toitures végétalisées spécifient les contraintes suivantes :

Les exigences techniques regroupent : la localisation climatique de la toiture végétalisée (régime pluviométrique, intensité solaire, vent, gel, ...) ; la disposition de la toiture végétalisée dans la construction et l'environnement (zones d'ombre, surplomb) ; la visibilité de la toiture végétalisée (éloignement, angle de vue) ; l'accessibilité aux zones techniques par la création de chemins de circulation ; les dispositifs de sécurité et de protection des personnes ; la forme géométrique et hauteur de la toiture végétalisée par rapport au sol ; la pente et l'incidence du poids du complexe de végétalisation à CME (capacité maximale en eau) sur la structure portante.

Les exigences esthétiques : varient selon les attentes du maître d'ouvrage par un effet immédiat ou différé selon le mode de mise en œuvre choisis (semis de fragments, de semences, micro-mottes, godets, éléments précultivés). En plus du choix des plantes et du type d'agencement (caduques, persistantes, floraison, variation des couleurs des feuillages, volume, port, texture...) Les exigences particulières : concernent le niveau d'entretien, fréquence d'arrosage et la rétention temporaire des eaux pluviales.

Voici quelques détails sur les contraintes les plus importantes relevant de la conception des toits végétaux :

1. Contraintes climatiques

Effets des paramètres climatiques :

Le véritable climat sur les terrasses et balcons est déterminé par la somme de plusieurs facteurs : la latitude, l'exposition (au soleil et au vent), la température, ainsi que les caractéristiques architecturales de la terrasse (Furlani Pedoja, 1996, pp. 6-14). Ces paramètres influent directement sur la conception des toitures végétalisées.

L'influence des paramètres climatiques peut être réduite par les caractéristiques particulières du substrat et plus largement celles du complexe de culture, spécialement du point de vue de retenue en eau, du choix des végétaux eux-mêmes et dans certains cas du mode de mise en œuvre des végétaux.

L'exposition aux radiations solaires :

L'effet de l'orientation de la terrasse végétalisée par rapport aux autres bâtiments : murs, édifices ou accessoires divers présents sur la toiture, définit des zones d'ombre plus ou moins fortes, ainsi qu'une circulation d'air plus ou moins importante.

La durée et la période d'ensoleillement suivant les saisons, le tracé des ombres sur la surface à planter, la luminosité... constituent des paramètres importants qui conditionnent le choix des espèces (espèces d'ombre ou celles préférant le plein soleil). Sachant que les plantes d'ombre par exemple préfèrent les expositions Est et Ouest, et qu'elles grilleraient dans un endroit inondé de soleil même si, elles tolèrent un peu de lumière le matin ou le soir (Courtat, 2007, p. 6).

Le premier critère de sélection des plantes étant la résistance à la sécheresse, cette caractéristique permet de faire le choix entre les plantes de lumière et les plantes d'ombre. Les situations de végétalisation des toitures ou terrasses ombrées peuvent être très fréquentes dans un milieu urbain. Il existe une gamme très restreinte de plantes résistant à une ombre forte et à une sécheresse relative. Par ailleurs, l'évaporation réduite sur les zones d'ombre doit conduire à limiter les épaisseurs de substrat et à assurer un drainage efficace pour éviter de créer des conditions favorables aux adventices de milieu humide. L'approche préalable du facteur de la luminosité est donc, une donnée importante de la conception de ces toitures (Lassalle, 2006, p. 79).

Au cas par cas, selon l'ensoleillement ou les tracés d'ombre de la terrasse, les sociétés spécialisées peuvent définir les espèces végétales pouvant survivre sur cette dernière. En

général, une exposition minimale au soleil est recommandée. La société «Toit vert» préconise pour un bon fonctionnement de la toiture végétalisée, des expositions au soleil d'au moins trois heures par jour en été¹.

L'exposition aux vents dominants :

Les façades des immeubles alignées le long des avenues créent des couloirs où le vent s'engouffre et forme des turbulences surtout lorsque les bâtiments sont hauts et les rues étroites et que l'orientation principale est face aux vents dominants. L'acrotère périphérique, est susceptible de générer des effets de turbulence en périphérie, et plus encore dans les angles de la terrasse. Localement, la pression du vent qui peut atteindre 300 kg/m² dans les cas extrêmes, est capable de déplacer un lit de graviers de 5cm d'épaisseur. Cependant, on peut s'opposer à la force de dépression due au vent par l'alourdissement du complexe de végétalisation dans les angles et périphéries ou par des zones dites « stériles » (Lassalle, 2006, p. 76).

D'autre par, l'effet du vent peut parfois être fatal pour la végétation. En été, il assèche les plantations et augmente leur évapotranspiration et en hiver il augmente sensiblement l'effet du froid. Selon Furlani (1996), un vent soufflant à 10Km/h fait baisser de 1°C la température...à 20Km/h elle baisse de 2°C. Donc, les vents doivent être bloqués pour que certaines espèces puissent se développer sur les terrasses. Pour cela, on peut installer des brises- vents végétaux adéquats.

Les températures :

En hiver, la température sur une terrasse dépend du matériau constituant sa structure et de son exposition (totalement fermée sur les côtés, orientée plein sud...).

Les terrasses jouissent de climat moins rigoureux au cours des mois froids que les espaces à découverts (jardins ou parcs) parce qu'ils sont abrités des rigueurs hivernales, et que la ville engendre une masse calorifique qui diminue les amplitudes thermiques. Donc, il y gèle moins fort, ce qui permet d'envisager des plantations plus exotiques qu'en pleine terre. Par contre en été, ces espaces entre ciel et terre, subissent fortement les vents et hautes températures estivales, phénomène accentué par les surfaces des murs qui réfléchissent les radiations

¹ Toit vert, Toitures inclinées, <http://www.toitvert.fr>.

solaires et la chaleur emmagasinée. Il faut donc, prendre en considération les températures les plus défavorables pour toutes les saisons et opter pour des plantes résistantes à la sécheresse.

2. Contraintes architecturales :

a. Orientation

Exposition au sud :

Un balcon ou terrasse orientés plein sud possèdent un microclimat doux de type presque méditerranéen, ne manquant jamais de soleil. En hiver, l'espace est protégé des vents froids et les plantes peuvent bénéficier la nuit de la chaleur emmagasinée par les murs (Lassalle, 2006, p. 6). Cependant, les amplitudes thermiques brusques entre le jour et la nuit sont pire pour la végétation qu'un froid continu et un réchauffement progressif (chute brutale des températures la nuit et élévation rapide de celle-ci, dès l'apparition du soleil sur la terrasse orientée plein sud) (Risser, 2006, p. 19).

D'après (Furlani Pedoja, 1996)l'exposition au sud en été est délicate pour les plantes, parce que les rayons solaires sont fort en juillet et août, surtout quand ils sont accompagnés de vent chaud qui balaye les étages supérieurs, dessèche les plantes et brûle leurs tissus (entraînant une forte évapotranspiration et un besoin accru en eau). On recommande souvent des plantes robustes que ce soit pour les végétalisations extensives, semi- intensives ou intensives, mais aussi pour la plantation dans des pots ou des jardinières.

Exposition à l'est :

(Furlani Pedoja, 1996)La considère comme la meilleure exposition puisque les plantes sur balcons ou terrasses tirent un grand bénéfice du soleil des premières heures de la journée. Alors que Bonduel (2005), la considère comme difficile puisque les plantes sont soumises aux vents de l'Est et du Nord-Est, ainsi qu'aux premiers rayons du soleil juste après le moment le plus froid de la nuit, provoquant un choc thermique brutal aux plantes. Il faut donc opter pour les plantes rustiques, armées contre les coups durs (annuelles, sureaux, tulipes...).

Exposition à l'ouest :

(Furlani Pedoja, 1996), Bonduel (2005) et (Risser, 2006) s'accordent à dire que l'exposition Ouest et Sud- Ouest sont meilleures que celle du sud. Cette exposition bénéficie d'une luminosité plus que suffisante, ensoleillée mais pas trop brûlante et chaude sans excès. Elle est souvent située face aux pluies et abritée des vents les plus froids, ce qui permet la prolifération d'une large gamme d'espèces qui tolèrent cette exposition.

Exposition au nord :

La terrasse ou balcon exposés au nord bénéficient d'une lumière moyenne élevée. En été, ces espaces bénéficient des rayons latéraux du soleil levant, puis du soleil couchant. Les plantes les plus adaptées à cette exposition en général sont celles de sous bois (Camélias, Hortensias de tous types, Bégonias, Jacinthes...). Cette exposition est plutôt fraîche en été et très froide en hiver mais reste très venteuse sur les terrasses ou balcons ouverts de tout côté, les plantes doivent donc faire face aux plus basses températures avec des vents violents. Cependant, les températures y remontent lentement ce qui évite des alternances brutales du gel et dégel, plus néfastes que le froid lui-même. Donc, le choix des plantes pour l'exposition au Nord est réduit à des espèces robustes qui se cassent rarement.

b. Configuration (forme, dimensions, mitoyenneté...)

La configuration de la toiture, ses caractéristiques architecturales, son affectation, ses dimensions et son volume peuvent être des éléments déterminants dans le choix du type de végétalisation et des caractéristiques de chaque matériau.

On peut retrouver plusieurs configurations pour une toiture végétalisée. La toiture peut être délimitée par un ou plusieurs murs latéraux, ou avec un ou plusieurs volumes adjacents ; elle peut être complètement à découvert profitant de l'humidité et de la luminosité tout en étant exposée aux intempéries (cas d'une toiture sommitale sans obstacle en surélévation ou bâtiment isolé) ; elle peut être dominée à distance par un ou plusieurs bâtiments, d'un ou plusieurs niveaux ; comme elle peut être un patio intérieur (Fig.2-1).



Figure II- 1 : Différentes configurations d'un toit végétal

(Source : SOPRANATURE, Soprema, Brochure, 2008)

Les caractéristiques ainsi que les matériaux de construction de la toiture influent sensiblement sur le microclimat des lieux. D'une part, les terrasses fermées sur les côtés procurent des

expositions abritées du vent et offrent des températures moins froides en hiver. D'autre part, les radiations réfléchies sont néfastes pour les plantes et l'accumulation de la chaleur dans les murs du bâtiment prolonge la canicule en été.

3. Contraintes techniques :

a. Élément porteur :

L'élément porteur représente la partie la plus importante du bâtiment qui détermine le type de végétalisation admis (extensif, intensif, semi-intensif) selon le matériau le constituant (béton, bois, acier...), la charge admissible par cet élément porteur et sa pente. L'élément porteur pour une végétalisation intensive doit être pensé pendant la conception vue la charge importante qu'il doit supporter. Alors que la végétalisation extensive et semi-intensive sont adaptables à n'importe quel type d'élément porteur avec certaines réserves pour les végétalisations semi-intensives.

D'après Lassalle (2006), la norme française (DTU 43.1) exige que le support d'une toiture-terrasse jardin (toiture à végétation intensive) soit en béton armé avec une pente nulle ou une pente inférieure ou égale à 5%.

Par ailleurs, la réglementation algérienne tolère les toitures terrasses jardins sur des éléments porteurs en maçonnerie, sur dalle flottante ou sous forme adhérente en béton. Elle ne tolère l'aménagement de ces jardins que sur des toitures terrasses plates ($2\% \leq \text{Pente} \leq 5\%$) ou en pente nulle ($\text{Pente} \leq 2\%$) dans les zones en dehors du climat de montagne ; et seulement des toitures plates sous un climat de montagne (CNERIB, 2005.).

Pour la végétalisation extensive, les règles professionnelles françaises de 2007, déterminent les types d'éléments porteurs suivants (admis pour une pente maximale de 20%) :

Élément en maçonnerie.

Élément en béton cellulaire autoclave¹ avec pente minimale de 1 %.

Élément en tôles d'acier nervuré avec pente minimale de 3 %, fixées à l'ossature comme si elles recevaient un revêtement auto-protégé.

¹ Le béton cellulaire durci en autoclave ou béton gaz ou béton autoclavé est un béton léger ayant une masse volumique faible grâce aux bulles de gaz qu'il contient ; ce gaz provient d'une réaction chimique qui a lieu lors de sa fabrication.

Source : Georges Dreux, Jean Festa, Nouveaux guide du béton et de ses constituants, Eyrolles, 1998 (8^e édition)

Chapitre 2 : les toitures végétalisées : avantages et contraintes de conception

Elément en bois ou panneaux dérivés du bois, ou panneaux bénéficiant d'un Avis Technique visant favorablement son emploi en élément porteur pour toiture avec revêtement d'étanchéité sous protection lourde, dont la pente minimale est de 3 %.

b. Charges sur la toiture :

La surcharge due au complexe de végétalisation est déterminée obligatoirement à l'avance pour les végétalisations intensives, mais ne l'est pas nécessairement dans le cas des végétalisations extensives puisque l'adaptation peut se faire en sens inverse. C'est-à-dire que l'on peut définir la surcharge du complexe de végétalisation à installer en fonction de la charge admissible par l'élément porteur (cas d'installation d'une végétation sur toiture existante).

D'après Lassalle (2006), les toitures- terrasses accessibles disposant d'une surcharge admissible de l'ordre de 350 Kg/m², peuvent recevoir une végétalisation semi- intensive ou une forme plus lourde de végétalisation extensive, à condition que les zones végétalisées ne soient plus autorisées à la circulation. Le tableau (2-1) montre les plages de surcharges et les surcharges moyennes indicatives (Kg/m²) pour les différentes formes de végétalisation.

Forme de végétalisation	Plage de surcharge (kg/m²)	Surcharge indicative (kg/m²) moyenne
Végétalisation intensives	De 600 à 2 000	1000
Végétalisation semi- intensives	De 150 à 400	300
Végétalisation extensives	De 40 à 300	100

Tableau II- 1 : Surcharges des différentes formes de végétalisation des toits

(Source. François Lassalle, 2006))

Selon les règles françaises pour la végétalisation des toits de 2007, les charges à prendre en compte pour n'importe quel élément porteur sont (ADIVET, 2007, p. 07) :

Les charges permanentes et les charges d'exploitations.

Les charges permanentes correspondent à la somme du :

Poids du complexe isolation- étanchéité (pare- vapeur, isolant, revêtement d'étanchéité).

Du poids du complexe de végétalisation à capacité maximale en eau (la couche drainante, la couche filtrante, le substrat et les végétaux).

Une charge de sécurité est fixée forfaitairement à 15 daN/m² (déca- Newton) ; en plus d'une charge complémentaire forfaitaire de 85 daN/m² (soit 100 daN/m² au total) sera ajoutée pour le dimensionnement des seuls éléments porteurs à base de bois (bois massif et panneaux dérivés).

Les charges d'exploitation : regroupent les charges d'exploitation en plus des charges climatiques. On retient la valeur la plus élevée des deux charges (charge d'entretien ou la charge climatique). Sachant que la charge d'entretien est estimée à 100 daN/m² au sens de la norme NF P 06001 (ADIVET, 2007, p. 07).

La surcharge due au complexe de végétalisation comprend la somme du poids propre de la végétation et du complexe de culture (couche de drainage et le substrat) calculé à capacité maximale en eau.

c. Pente de la toiture

La pente est un facteur déterminant dans la conception des systèmes de végétalisation des toits, que ce soit du point de vue de la structure (élément porteur en bois, béton...), de la sécurité contre l'érosion ou du point de vue de la croissance des plantes.

D'abord, une adaptation du système de végétalisation à la pente est indispensable de telle manière que ; les toitures- terrasses jardins ne sont tolérées que pour une pente 5 %, alors que la végétalisation extensive tolère de fortes pentes.

Pente entre 0 à 5% : adaptable pour tout type de végétalisation (intensif ou extensif), la société « Toit vert » recommande que le toit ne soit pas complètement plat, mais qu'il ait une pente minimale afin de simplifier l'écoulement de l'eau. Sachant que pour les pentes très faibles ou nulles (0 à 5%) le risque de stagnation de l'eau est évident. Dans ce cas, la mise en œuvre d'un système de drainage performant est exigée.

Pente intermédiaire à moyenne : ces pentes peuvent aller jusqu'à 60%. Pour les végétalisations extensives, les pentes de 5 à 20% rendent le drainage naturel (Il s'effectue à travers le substrat sous l'effet de la gravité). Cependant, à partir de 5% de pente, l'écoulement rapide de l'eau doit être compensé par une augmentation de la capacité de rétention du substrat pour que la végétation soit suffisamment pourvue en eau. A partir d'une pente de 20%, une étude approfondie est obligatoire puisque le risque d'érosion du substrat sous l'effet

des pluies est nettement accru. Il convient donc de mettre en place des systèmes de retenue du substrat, en bois ou en autre matériau (Fig. 2-2).



Figure II- 2 : Système de retenue GEORASTER d'Ecovegetal pour pente (jusqu'à 60%)

(Source. Ecosedum, www.ecovegetal.fr)

Fortes pentes : La pente maximale tolérée par la société «Toit vert» est de l'ordre de 30° (pente de 60 %), puisque au-delà de celle-ci, l'eau contenue dans la structure rétentricrice migrerait dans les parties basses du complexe et provoquerait l'assèchement de la partie haute de la toiture végétalisée. La figure (2-2) montre le système de retenue très développé pour une végétalisation sur une forte pente proposé par la société Ecovegetal.

4. Contraintes d'entretien et arrosage :

L'entretien de l'étanchéité ou de la végétation des toitures est obligatoire, sa fréquence par contre diffère selon le type de végétalisation (Tableau 2-2).

Forme de végétalisation	Arrosage	Fréquence et durée des prestations d'entretien
Végétalisation intensives	Indispensable	Importante
Végétalisation semi-intensives	Indispensable	Modérée
Végétalisation extensives	Non nécessaire (sauf en région sèche)	Faible

Tableau II- 2 : Entretien et arrosage des systèmes de végétalisation

(Source : François Lassalle, 2006)

L'entretien des toiture- terrasses jardins : les besoins d'entretien sont élevés à très élevée, suivant le choix des plantes. L'élimination de la végétation adventice dans les plantations doit être réalisée de façon soignée et régulière. Des opérations de taille et d'éclaircissage, voire d'arrachage des plantes devenues gênantes avec le temps, sont nécessaires. Par ailleurs, il faut prévoir sur ces toits le montage du matériel, évacuation de gros volumes de déchets, la fertilisation du substrat ..., qui rendent ce système très coûteux.

L'entretien des toitures ou terrasses à végétation extensive est réduit mais reste indispensable au minimum à une fois par an. Il peut être couplé avec la visite de contrôle de l'ouvrage d'étanchéité, afin de s'assurer du bon fonctionnement du système de drainage et du bon état de la végétation. L'entretien est limité pour la végétalisation extensive et donc son coût aussi, ce qui justifie leur emploi pour les terrasses inaccessibles, grâce au :

Choix des espèces végétales qui se multiplient naturellement sans intervention.

La résistance des végétaux aux aléas climatiques (sécheresse) diminue la quantité d'eau nécessaire pour l'arrosage et donc, la présence d'un système d'arrosage n'est pas requise (sauf pour les régions a été chaud et sec, telle que la méditerranée).

La fertilisation devient non dispensable, le substrat est volontairement pauvre afin de générer une croissance modérée des plantes. D'autre part, l'épaisseur du complexe de culture est réduite ce qui ne favorise pas le développement d'une végétation adventice et élimine par conséquent ou réduit fortement : l'arrosage, le désherbage, la tonte et la fertilisation...

Les Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées déterminent trois périodes d'entretiens pour les toitures à végétation extensive et semi- intensives depuis l'installation jusqu'à l'entretien courant. On distingue : la période de parachèvement, la période de confortement et l'entretien courant.

La période de confortement est comprise entre la réception de l'ouvrage jusqu'au démarrage de l'entretien courant qui ne commencera que lorsque le taux de couverture sera supérieur ou égal à 80%. D'après Lassale (2006), cet entretien technique initial pour les végétalisations extensives, doit comprendre au moins une saison végétative complète où un certain entretien devient obligatoire. A savoir : l'arrosage pendant quelques semaines (semis ou plantation), le fauchage (graminées), des semis complémentaires (si le taux de couverture ne progresse pas rapidement), des plantations de remplacement et une fertilisation (si nécessaire). La durée de confortement est fonction de la mise en œuvre de la végétation.

L'entretien courant, démarre après une couverture végétale 80%, son but est de maintenir et/ou d'augmenter le taux de couverture végétale et de maîtriser le développement des espèces adventices. La fréquence minimale d'entretien pour la végétalisation extensive est de deux passages/an, quelque soit le mode d'installation de la végétation (ADIVET, 2007, p. 09).

Entretien des terrasses à végétation semi- intensive : comporte les mêmes contraintes d'entretien lors des périodes de parachèvement et de confortement que les végétalisations extensives sauf que l'arrosage est indispensable de même que la maintenance des systèmes d'irrigation, la tonte des gazons, évacuations des déchets, taille des plantes semi- ligneuses et ligneuses.

Lors de la période d'entretien courant, les préconisations d'entretien restent les mêmes, avec en général une fréquence de quatre interventions par an. La fréquence peut être accrue lors de la période de parachèvement ou de confortement (quatre à six fois par an suivant les systèmes) (Ecovegetal, 2014).

5. Les contraintes d'arrosage :

Les besoins en eaux sont variables selon la localisation géographique, la configuration du toit et le système de végétalisation de toiture installé (Tableau 2-2). Si la fréquence d'arrosage pour la végétalisation intensive reste la même que pour un jardin au sol, elle est fonction de l'espèce végétale pour la végétalisation semi- intensive et moindre à rare pour la végétalisation extensive. Pour cette dernière, on distingue trois phases selon le système Ecovegetal.


L'arrosage à la mise en œuvre : doit être abondant de sorte à saturer en eau le substrat. A répéter en période estivale ou, sèche au minimum les deux premières semaines. En région méditerranéenne, l'arrosage automatique par aspersion doit obligatoirement être posé avant la mise en place des végétaux.

L'arrosage au démarrage de la végétation : arrosage quotidien trois fois par jour à raison de 7mm d'eau pour chaque opération d'arrosage, ceci afin de maintenir une humidité permanente sur les végétaux qui viennent d'être plantés. Ces trois arrosages doivent se faire aux heures les plus fraîches. Généralement la durée est de trois à quatre semaines. Dans le sud de la France, il sera maintenu tout l'été de juin à septembre l'année de la mise en œuvre et la suivante afin d'accélérer l'enracinement des végétaux dans le substrat.


L'arrosage courant : en méditerranée, en période de canicule et de sécheresse un arrosage de début juin à la fin septembre est nécessaire. Une fois par semaine à raison de 14 à 20 mm d'eau selon les températures. Il sera fait en deux fois, 7 à 10 mm à l'aube et 7 à 8 mm le soir. En été l'arrosage ne sera mis en fonctionnement qu'après le premier épisode de forte chaleur afin que ce dernier puisse agir en tant que désherbant naturel sur les éventuels adventices qui pourraient s'installer sur la toiture.

III. Exemples d'adaptations de toitures végétalisées :

Les exemples présentés ci-après sont des exemples de réalisation de toitures végétalisées dans le cadre de travaux de rénovation ou de construction. Ces projets ont été menés par des collectivités françaises ou européennes. Même si le territoire d'Alger a des spécificités bien précises jouant un rôle important dans la définition de projets de toits végétaux, ces projets peuvent être intéressants de par leurs particularités :

Projet	Contexte et critères de choix	Caractéristiques de la réalisation	Images
<p>Localisation : Zurich</p> <p>Milieu : Industriel</p> <p>Types : Végétalisation extensive</p>	<p>Le projet de végétalisation de la toiture de l'usine date de 1914. Le bâtiment est une usine de filtration des eaux du lac de Zürich.</p> <p>La surface totale végétalisée est de 3 ha, la toiture est plane, et composée de béton de toits plats en béton de cette usine de filtration.</p> <p>Le critère principal retenu est la meilleure régulation thermique de l'intérieur du bâtiment</p>	<p>Couche drainante de sable et de graviers de 5 cm,</p> <ul style="list-style-type: none"> - Substrat de 15 à 20 cm de terres arables provenant des terres agricoles alentours, - Développement de 175 espèces végétales différentes <p>Ce projet, de part son ancienneté permet de confirmer certains atouts de la végétalisation des toitures :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biodiversité : colonisation spontanée par des espèces locales - Augmentation de la durée de vie du système d'étanchéité : <p>plus de 5 fois supérieure à la</p>	

Chapitre 2 : les toitures végétalisées : avantages et contraintes de conception

		garantie de 15 ans définie par les professionnels.	
<p>Localisation : Bale</p> <p>Milieu : Urbain</p> <p>Types : Végétalisation extensive + panneaux photovoltaïques</p>	<p>Les travaux de rénovation du hall d'exposition de la ville de Bâle réalisés en 1999 sont à l'origine de la végétalisation de la toiture. La surface concernée a une superficie de 16 000 m², c'est une toiture plane.</p> <p>La particularité de ce projet est la cohabitation de la végétation avec les panneaux photovoltaïques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Sédums puis développement naturel des plantes tel que le thym. - Substrat: léger composé de roche volcanique une épaisseur de 7cm. - les panneaux photovoltaïques créent des zones d'ombre favorables au développement d'autres espèces végétales. - la végétation limite la réverbération du soleil sur le toit, et, en y réduisant la température, augmente le rendement des panneaux photovoltaïques. 	


<p>Localisation : Boulogne- Billancourt</p> <p>Milieu : Urbain</p> <p>Types : Végétalisation extensive – tapis pré-cultivé</p>	<p>Ce projet de végétalisation date de 2005. Le critère "confort visuel" a été un critère important dans la réalisation de ce projet, du fait de la présence d'immeubles d'habitations plus hauts autour du bâtiment concerné.</p> <p>L'aménagement en toiture végétalisée offre une perspective verte aux usagers des immeubles voisins</p>	<p>Chaque toiture est végétalisée au moyen de tapis pré-cultivés de sedums.</p> <p>L'ensemble du complexe est posé en moins d'une journée par l'entreprise ayant par ailleurs réalisé l'étanchéité.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Support : Dalle béton - Drainage : Bacs de Polystyrène recouverts d'un filtre. - Substrat : 5 cm de substrat - Végétation : Tapis pré-cultivés de sédums 	
---	--	---	---

Tableau II- 3 : exemples d'adaptations de toits végétaux aux structures existantes

(Source : Etude sur les toitures végétalisées, Ernst & Young et Associés, 2009)

IV. Conclusion

Le végétal devient de plus en plus précieux en ville à cause de l'évolution de nos sociétés vers plus de technologies. Cet élément vivant intégré à l'enveloppe du bâtiment est très prisée par les pays développés puisqu'il présente autant d'avantages qu'un aménagement sur le sol. Cependant, la végétalisation des toits est soumise à plusieurs contraintes, et elle est régit par des normes et des réglementations strictes, qui assurent la sécurité et la pérennité des toits.

Les contraintes qui conditionnent la conception des toits végétaux concernent : les paramètres climatiques, les caractéristiques du bâtiment, le type d'entretien et la fréquence d'arrosage admis par le propriétaire. L'analyse de ces contraintes permet d'adapter au mieux le choix du système de végétalisation (extensif, intensif...), le choix des espèces végétales et leur mise en œuvre pour que l'installation soit durable.

La toiture végétalisée présente l'avantage d'être un système constructif écologique, efficace et durable. En plus des avantages environnementaux, écologiques, sociaux, urbanistiques qu'elle procure en rajoutant des espaces verts dans les centres urbains pour le bien-être de chacun. Ces surfaces végétales supplémentaires sur les toits sont un excellent moyen pour créer des

Chapitre 2 : les toitures végétalisées : avantages et contraintes de conception

microclimats et diminuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ce qui se répercute sur le confort thermique intérieur et permet d'effectuer des économies sur la consommation énergétique.

Chapitre 3 : présentation du cas d'étude

Introduction

L'objectif de cette recherche est de vérifier l'adaptabilité des types de toitures végétalisées présentées dans les chapitres précédents aux structures préexistantes, et ce en déterminant la capacité d'une structure existante de supporter le poids d'une couverture végétale. Nous avons ainsi choisi d'enquêter sur le terrain, une approche pratique qui va nous rapprocher vers nos objectifs.

Dans ce chapitre nous allons présenter l'hôpital à travers son histoire, afin d'arriver à énumérer les différents types de toitures existants, nous présentons par la suite la méthode retenue pour conduire notre investigation.

I. Présentation du cas d'étude :

Le CHU Lamine Debaghine se situe sur le boulevard Saïd Touati, (Bab El Oued, Alger) avec une capacité hospitalière de 840 lits, il dessert un bassin de population de près de 1,5 millions d'habitants.

L'établissement présente un intérêt très particulier de point de vue de son statut historique c'est l'ancien palais d'été du dey Hassan Pacha. En 1917, l'hôpital du dey est rebaptisé François Clément Maillot -du nom du médecin qui codifia l'usage de la quinine contre le paludisme en 1834-. C'est le plus ancien des établissements hospitaliers d'Afrique du nord. Après l'indépendance, il continue à être l'hôpital militaire d'instruction des armées.

En 1988, l'hôpital est cédé aux services du Ministère de la Santé. Plus récemment, il est rebaptisé du nom du Chahid Lamine Debaghine. Il s'étend sur une superficie de 18 960 m², dont 10630 m² de surface utile.

Les missions du Centre Hospitalo-universitaire se résument en quatre tâches essentielles :

- Les Soins (Généraux et Hautement Spécialisés).
- La Formation Médicale et Paramédicale
- La Recherche Scientifique
- Explorations Spécialisées (Centre Nationale de Radiologie, Médecine Nucléaire et un Centre de Référence Toxicologique)¹

¹ www.chubabeloued.com (2017)

1. Aperçu historique

L'hôpital Mohamed Lamine Debaghine renferme la résidence du Dey de la Régence. Avant d'être baptisé du nom de Maillot, la résidence fut désignée durant presque toute la présence française sous le nom de l'hôpital du Dey.

Il est en effet un des vestiges des propriétés deylicales. Il est le doyen de tous les établissements hospitaliers de l'Afrique Française du Nord. Il porte le nom d'un grand honnête homme et médecin militaire, dont la carrière connut ses plus belles pages à Alger.

Il aurait beaucoup à écrire sur ce bel hôpital intimement lié à l'histoire d'Alger ; il est difficile malgré les recherches de suivre avec exactitude à travers son premier siècle d'existence les transformations qu'il a subit.

1791 - 1799, les jardins du Dey et quelques bâtiments furent créés par Hassan -Pacha, Dey d'Alger. Vers 1805 cette propriété passera à Ahmed Pacha.

1805 - 1808 à Ali Khodja puis deviennent la propriété d'Hussein Dey.

1820 il édifia un bâtiment dans le grand jardin pour contenir les écuries et autres silos.

L'entrée principale fut réalisée par son khesnadj (trésorier) du nom de Braham, auteur de toutes les installations. Ce que d'aucuns ne soupçonnent guère, c'est la présence d'un jardin entourant cette résidence. Celui-ci couvrait l'ensemble des terres de Bab-El-Oued.

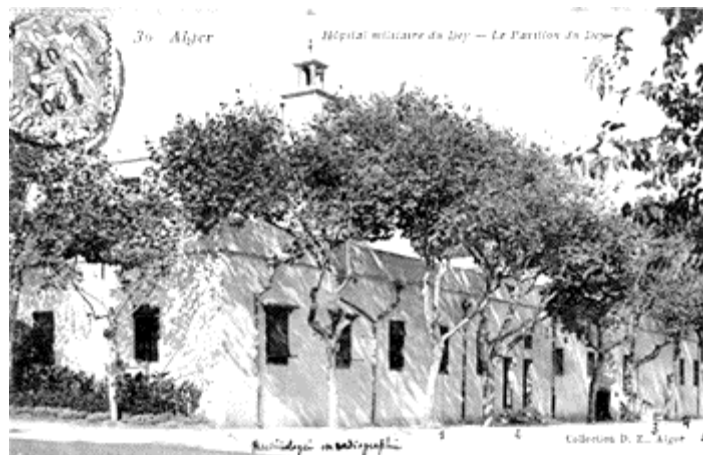


Figure III- 1 : vue sur l'hôpital Militaire du Dey

(Source : www.alger-roi.net, 2017)

L'administration française des domaines pris possession de la propriété en 1830, comme bien du beylik et la céda au corps d'occupation à la charge par celui-ci de l'affecter uniquement à un hôpital militaire.

1832, le général Rovigo occupa la résidence et y installa le premier hôpital militaire français. Neuf barques seront construites dans le jardin, autour de deux pavillons du Dey qui seront remplacés par des constructions en dur et 1500 malades purent être accueillis. La jolie villa du centre fût réservée aux officiers en traitement et au médecin major directeur. L'édification des pavillons définitifs de l'hôpital du Dey ne date que de 1853 et les derniers bâtiments ne furent achevés que vers 1890.



Figure III- 2 : vue générale de l'hôpital Maillot (période coloniale) A droite la demeure du Dey (pavillon des officiers) A gauche les bâtiments de l'hôpital avec la chapelle

(Source : (Assari, 2011))

En 1836, sur ordre du général Clausel l'hôpital fut transformé de telle sorte à l'adapter aux besoins de l'armée ainsi que des civils.

Le maréchal Randon confia en 1852 au médecin Bertrand, la mise sur pied d'une école de médecine et de pharmacie dans cet hôpital, achevées en 1857. L'un des pavillons du jardin fut aménagé en salle de conférences avec quelques tables et bancs, devant une assistance d'une trentaine de futurs praticiens pour le premier cours de physiologie.

En 1891, il fut fondé encore dans cet hôpital le premier laboratoire de bactériologie de l'armée.

En 1917 L'hôpital du Dey devenu par la suite Hôpital Maillot, du nom du chirurgien militaire qui y exerça.

A l'indépendance, l'hôpital Maillot demeura un hôpital militaire, sous la tutelle du ministère de la défense nationale jusqu'en 1987 puis au ministère de la santé.

Le Centre Hospitalo-universitaire Mohamed Lamine Debaghine est de nos jours administré par un conseil d'administration et dirigé par un Directeur Général. Il est doté d'un organe consultatif dénommé " Conseil Scientifique "123.



Figure III- 3 : vue générale de l'hôpital Debaghine 2009

(Source : www.chubabeloued.com)

1 Alger, un passé à la carte, Nadir ASSARI, éd DALIMEN.

2 Alger d'antan (à travers la carte postale ancienne), Philippe LAMARQUE, éd HC.

3 www.chubabeloued.com (2017)

2. Raisons du choix

Nous avons choisi de conduire cette recherche dans le centre-ville d'Alger et plus précisément dans le CHU Mohamed Lamine Debaghine à Bab El Oued dont l'importance se conjugue sur une échelle territoriale, d'où sa grandeur en termes de surface mais aussi en nombre d'utilisateurs. Nous avons choisi cet établissement en raison de ses caractéristiques favorisant notre centre d'intérêt :

- Situation dans le centre-ville
- Les différentes mutations qu'a connu le site et qui retracent l'histoire de la ville d'Alger
- L'hôpital est une véritable synthèse des types de structures existants dans la ville d'Alger.

3. Recensement des systèmes de recouvrement existants

a. Typologies de bâti :

La variété de typologie dans l'hôpital relève des différentes opérations d'extension menées. On recense essentiellement trois périodes : ottomane, coloniale et post coloniale.



Figure III- 4 : l'évolution de l'hôpital à travers l'histoire.

(Source : auteur 2017)

b. Types de toitures :

Les toitures peuvent être classées selon leurs morphologies (toitures plates ou en pente), leurs techniques (rondins de bois, charpente en bois, voutains en brique, poutrelles et hourdis) mais aussi leurs systèmes porteurs à savoir la maçonnerie ou le système de portique (poteau/poutre).



Figure III- 5 : la classification des bâtiments selon le type de toitures

(Source : auteur 2017)

II. Présentation des entités d'étude :

1. Choix des entités d'étude

Nous avons retenu la partie sud de l'hôpital, et nous avons choisi quatre bâtiments représentant de manière exhaustive, les types de bâtiments et donc de toitures existant dans le site, à l'exception des bâtiments préfabriqués qui sont recouverts en tuile (considérée comme système de recouvrement léger et qui ne permet aucune surcharge).

Nous avons choisi (dans la mesure du possible) des entités qui font l'objet d'une réhabilitation ou de travaux de réfection de faux plafond notamment l'entité deux « 2 » et l'entité « 4 ».

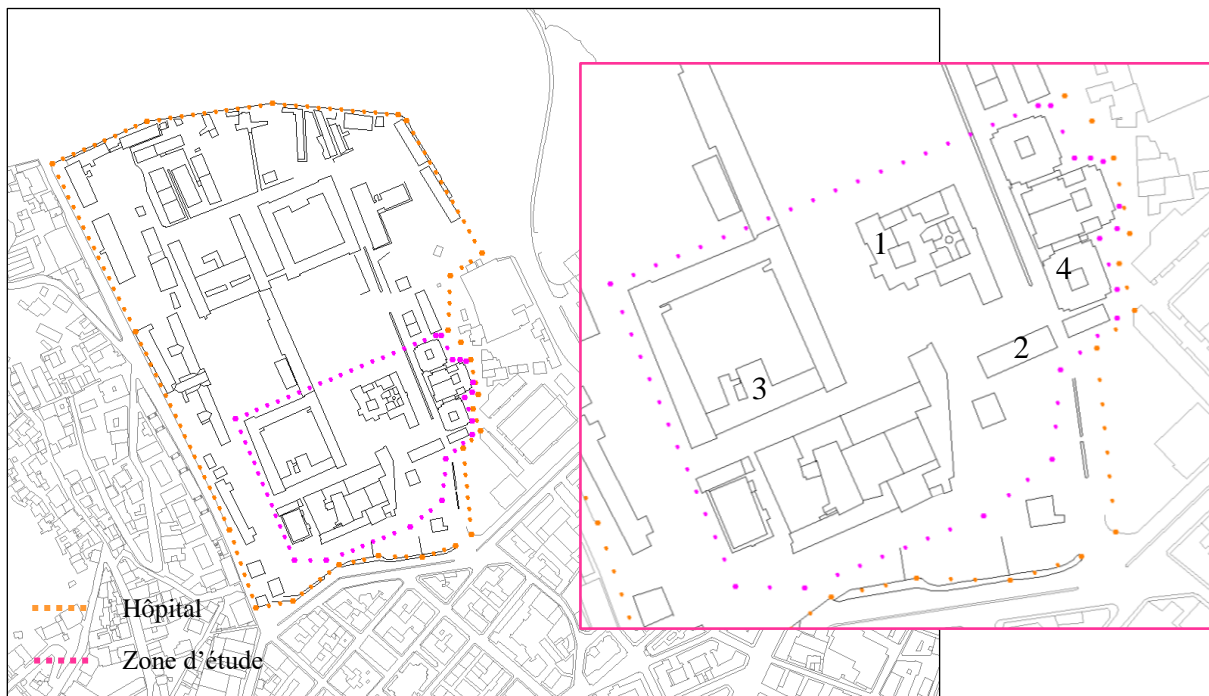


Figure III- 6 : à gauche : délimitation de la zone d'étude. à droite : les entités d'étude

(Source : auteur 2017)

2. Caractéristiques des entités d'étude :

a. Entité ottomane :

C'est le bloc administratif, le bâtiment a connu une extension dans la période ottomane et une deuxième dans la période coloniale, nous nous intéressons à la construction d'origine.

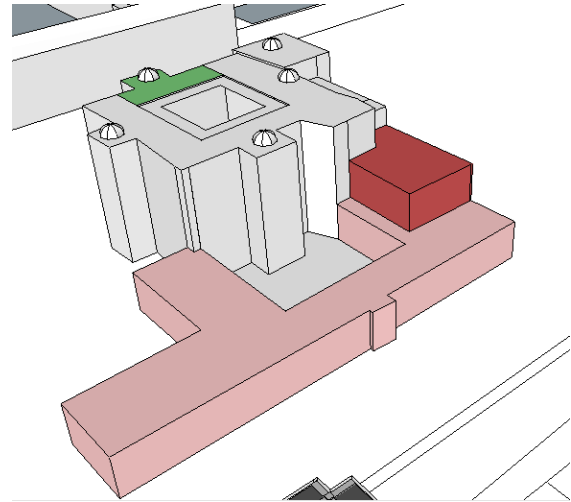
Le bâtiment se développe sur trois niveaux.

Surface totale : 1270 m²

Surface bâtiment principal : 730 m²

Figure III- 7 : Entité ottomane (restitutions en 3D)

(Source : auteur 2017)



Etat de conservation :

Le bâtiment est dans un bon état de conservation global, cependant in présente quelques pathologies ponctuelles relatives au manque d'entretien et/ou à l'abandon notamment le squattage des niches et des conduites des eaux pluviales par les pigeons.

L'édifice est sujet d'une étude pour une éventuelle classification en tant que monument patrimonial de la ville d'Alger.

Figure III- 8 : façade nord de l'administration

(Source : auteur 2017)



Système porteur des planchers :

Les trois premiers planchers sont recouverts avec un système de voute croisée (figure X) et le dernier niveau est composé d'une dalle en solives de bois (espacés de 30cm) et des sous-espaces en « Qbou » recouverts de coupoles octogonales. La décente des charges est assurée avec des murs de maçonnerie traditionnelle.

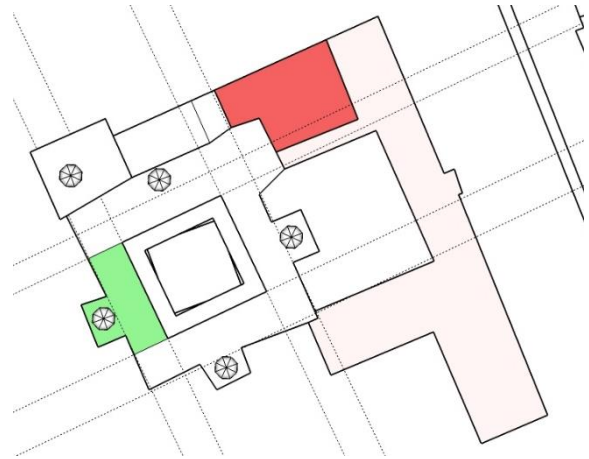


Figure III- 9 : plan de toiture de l'administration
(Source : auteur 2017)

Le dernier niveau est constitué de quatre « 4 » pièces identiques, le sens porteur étant dans la largeur des pièces (figure 3-10) de trois mètres et demi « 3.5m » et d'une galerie interne de deux mètres « 2m », nous avons choisi une pièce typique pour cette recherche.

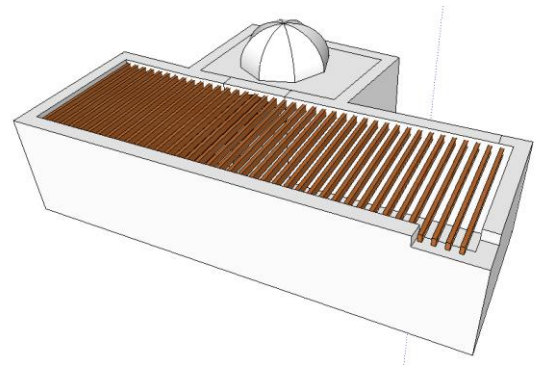


Figure III- 10 : système porteur du plancher
(Source : auteur 2017)

b. Entité coloniale « a » :

C'est le bloc de gestion financière, il fait partie de la première grande extension de l'époque coloniale avec huit « 8 » autres bâtiments. De ce fait, cette entité est la plus signifiante de notre recherche. Le bâtiment s'étale sur deux niveaux.

Surface (au sol) : 315 m²

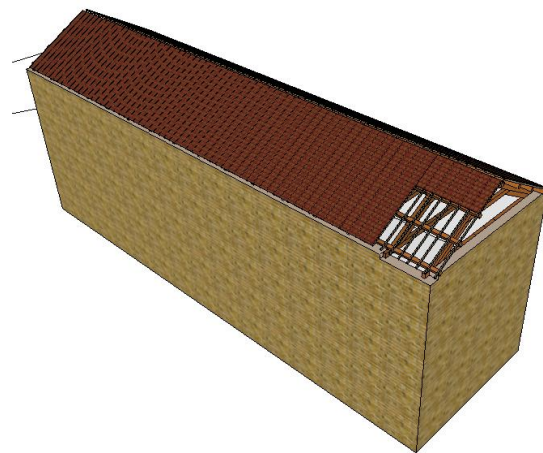


Figure III- 11 : restitution en 3D du bâtiment
(Source : auteur 2017)

Etat de conservation :

Le bâtiment fait l'objet d'une opération de réhabilitation légère (corps d'état secondaire) sans toucher à sa structure ou son organisation interne.

Figure III- 12 : les combles, vue d'intérieur

(Source : auteur 2017)



Système porteur de la toiture :

La toiture présente une pente de 30°, avec une charpente en bois de huit mètres de large « 8m » sur un intervalle de deux mètres « 2m ». La transition des charges est assurée avec des murs porteurs en maçonnerie de pierre bleu.

Figure III- 13 : système porteur de la ferme

(Source : auteur 2017)



c. Entité coloniale « b » :

Le bloc de radiologie interne est un bâtiment qui se développe en longueur (50m*9m) sur deux niveaux (un rez-de-chaussée et un entresol). Il est composé de deux entités spatiales (servant/servi).

Surface (au sol) : 650 m²

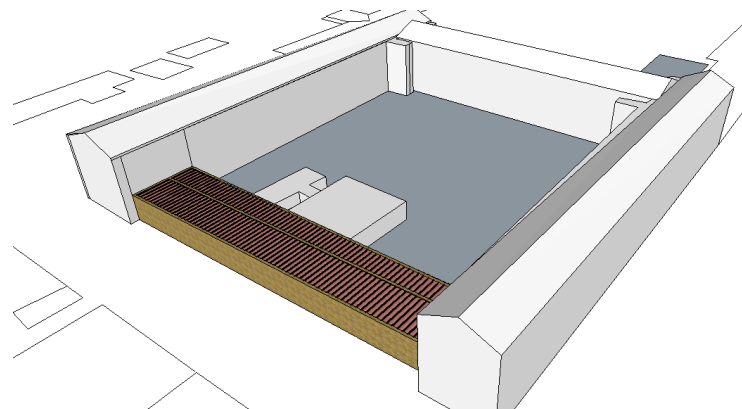


Figure III- 14 : restitution du bâtiment en 3D

(Source : auteur 2017)

Etat de conservation :

La bâtisse est en moyen état, l'étanchéité de la toiture ne profite pas de couche de drainage (en gravier) ce qui déminue de son cycle de vie.

Figure III- 15 : vue d'intérieur et de la toiture

(Source : auteur 2017)



Système porteur de la toiture :

Une toiture plate composée d'une dalle en voutains de brique (en entrevous) et des poutrelles en profil métallique « IPE » espacés de 60 cm, la transition des charges est assurée par un système porteur de mur de maçonnerie.

Figure III- 16 : système constructif du plancher

(Source : auteur 2017)



d. Entité pose coloniale :

C'est le bloc de gastrologie, il fait partie de la dernière intervention militaire dans l'hôpital en début des années quatre-vingt « 1980 ».

Surface : 500 m²

Figure III- 17 : façade Est du bâtiment

(Source : auteur 2017)



Etat de conservation :

Le bâtiment est en travaux de réhabilitation (lourde) impliquant tous corps d'état secondaire (séparations, menuiserie, revêtements, équipements sanitaires...).

Figure III- 18 : vue d'intérieur montrant le plancher



(source : auteur 2017)

Système porteur :

Les planchers des étages courants ainsi que la toiture sont constitués d'une dalle de compression en béton armé (corps creux) et un système porteur en portique (poteau/poutre). Le béton étant dosé à 350 MPa, suivent les normes du RPA de l'époque concernant les constructions des ouvrages spéciaux notamment les structures hospitalières.

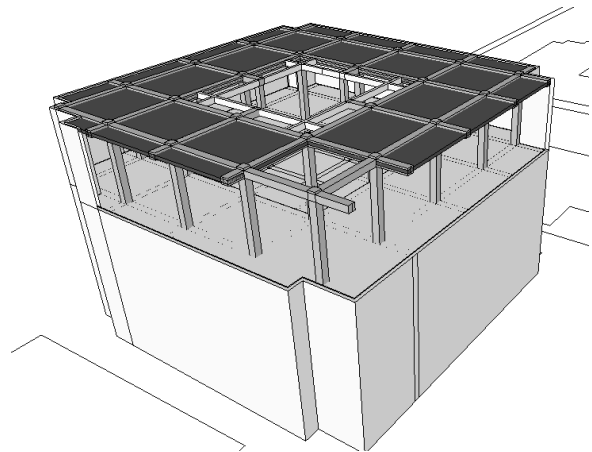


Figure III- 19 : système porteur (restitution en 3D).

(Source : auteur 2017)

Chapitre 04 : présentation et interprétation des résultats

I. Méthodologie de l'évaluation :

Dans cette recherche nous allons essayer de déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux de construction (sans avoir recours à des essais pétrochimiques d'écrasement ou d'autres) pour les différents éléments porteurs en tenant compte de leurs états de conservation, d'obsolescence (ou de vieillissement) et aux facteurs environnementaux (notamment les structures en bois).

Comme nous avons deux types de toiture, nous procéderons par deux méthodes différentes :

1. Evaluation des planchers (poutre, poutrelle, solive) :

Pour les entités « 1, 3 et 4 » nous allons calculer la surface d'influence pour l'élément porteur horizontal le plus sollicité ce qui nous permet de trouver les charges permanentes et les surcharges d'exploitations, ainsi que sa flèche admissible (tout en appliquant les coefficients de majorations nécessaires) c'est-à-dire la limite de la capacité portante de cet élément.

Remarque : La différence entre la capacité portante et les charges va être décisive pour se prononcer sur la possibilité d'alourdir les toitures encore plus en introduisant des substrats de végétations.

2. Evaluation de la charpente en bois :

La démarche à suivre dans le calcul de la toiture en pente est identique à celle de la toiture plate à l'exception des charges permanentes (une simple tuile au lieu d'un plancher complexe) et des calculs de la flèche admissible de l'élément porteur.

II. Evaluation des systèmes porteurs :

1. Caractéristiques des matériaux de construction des éléments porteurs :

a. Bois :

(bas lat. boscus, allem. Busch) est hétérogène, anisotrope, de structure réglée par celle de ses fibres ; il est d'hygroscopie variable et possède un assez grand module d'élasticité ($E = 16,6$ GPa parallèlement aux fibres, et 1 GPa perpendiculairement aux fibres ; ou respectivement : 12, 5 GPa et 0,6 GPa selon d'autres auteurs : voir la variation en fonction des essences) (Fredet, 2003).

La résistance du bois et des produits dérivés est liée à leur humidité moyenne, à la durée d'application des charges (k_{mod}) et à la grande dispersion des caractéristiques mécaniques (γ_m) (Normalisation, 1993).

Facteur k_{mod} (modificatif)

En effet, un bois sec supportant une charge de courte durée sera plus résistant qu'un bois humide supportant une charge sur une longue période. Ces deux caractères permettent de définir le facteur k_{mod} (modificatif).

Le facteur k_{mod} doit être sélectionné en fonction de la charge la plus courte. Si une combinaison de charge comprend des charges de structure et des charges d'exploitation, le facteur k_{mod} sera sélectionné en fonction des charges d'exploitation.

Le tableau suivant mentionne la valeur du k_{mod} en fonction de la durée de la charge et de la classe de service.

Durée de chargement		Classe de service		
Classe de durée	Exemple	1 Hbois < 13 % (Local chauffé)	2 13 % < Hbois < 20 % (sous abri)	3 Hbois > 20 % (extérieur)
Permanente (> 10 ans)	Charge de structure	0,6	0,6	0,5
Long terme (6 mois à 10 ans)	Stockage	0,7	0,7	0,55
Moyen terme (1 semaine à 6 mois)	Charges d'exploitation Neige Altitude > 1 000 m	0,8	0,8	0,65
Court terme (< 1 semaine)	Neige Altitude < 1 000 m	0,9	0,9	0,7
Instantanée	Vent, neige exceptionnelle	1,1	1,1	0,9

Tableau IV- 1 : Valeurs du facteur "k" selon les classes de service

(Source : Eurocode 5 : calcul des structures en bois)

Coefficient γ_m :

La dispersion des caractéristiques mécaniques du métal est plus faible que la dispersion des produits dérivés du bois, qui elle-même est plus faible que la dispersion du bois massif. Le coefficient γ_M (matériau) diminue la résistance des matériaux. Le tableau suivant indique la valeur du γ_M pour les principaux matériaux de structure en bois.

États limites ultimes		
Combinaisons fondamentales		
Matériaux	Bois	1,3
	Lamellé-collé	1,25
	Lami bois (LVL), OSB	1,2
Assemblages (par contacte directe ou à entailles)		1,3
Combinaisons accidentelles		1,0
États limites de service		1,0

Tableau IV- 2 : valeurs du coefficient « γ » selon les classes de service

(Source : Eurocode 5 : calcul des structures en bois)

b. Métal ferreux :

Le fer :

L'acier : est un matériau à base de fer qui contient moins de 2% de carbone, l'acier de construction contient environ 0.2% de carbone (Hegger, 2009, p. 80).

Caractéristiques mécaniques (Couasnet, 2005, p. 31):

Contrainte de traction		Module d'élasticité longitudinal	Module de poisson	Dureté		
				Brinell	Rockwell	Vickers
σ (MPa)		E (MPa)	ν (sd)	HB (sd)	HRC (sd)	HV (sd)
360	240	210000	0.28	160	20	170

Tableau IV- 3 : caractéristiques mécaniques de l'acier

(Source : Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction, 2005)

De nos jours la contrainte de traction admissible de l'acier de construction est à plus de 300 MPa, cette augmentation considérable et croissante est corrélée à l'amélioration constante des conditions de fabrication de l'acier. Cette hypothèse étant acceptée, il semble donc logique de déterminer la capacité portante théorique d'un élément métallique à partir de la contrainte maximale admissible à l'époque de la construction. La date de construction est donc un élément clé dans cette analyse théorique (Fredes. J, 2013, p. 379).

Fer et acier des années 1877-1915 :

Les valeurs des contraintes mentionnées font référence à des résultats d'essais sur des échantillons d'anciennes charpentes métalliques et des valeurs préconisées par l'office technique pour l'utilisation de l'acier (OTUA). Il s'agit de recommandations à défaut de document officiel. Seul existes d'anciennes circulaires des Ponts et Chaussées (citées dans le tableau ci-dessous) (Couasnet, 2005, pp. 32-33).

Texte (circulation)	Matériaux	Caractéristiques mécaniques admissibles	σ (kg/mm²)	σ (MPa)
Ponts et chaussées 09/07/1877	Fer	Traction	6	60
		Compression	6	60
Ponts et chaussées 29/08/1891	Fer	Traction	6.5	65
		Compression	6.5	65
		Flexion	6.5	65
		Cisaillement	5.2	52
	Acier	Traction	8.5	85
		Compression	8.5	85
		Flexion	8.5	85
		Cisaillement	6.8	68
08/01/1915	Acier	Traction	12	120
		Compression	12	120

Tableau IV- 4 : le développement des Caractéristiques mécaniques admissibles du métal

(Source : Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction, 2005.)

La dernière circulaire proscrit définitivement l'usage du fer. Par suite, on retiendra :

Avant 1890 : c'est du fer

Après 1915 : c'est de l'acier

Entre ces deux dates, il est fait usage du fer et de l'acier. Seul l'examen métallurgique sur échantillon permettra de déterminer la nature du métal (Fredes. J, 2013, p. 389).

Les poutres et poutrelles moyennement chargée dont la portée ne dépasse pas 7 à 8 m sont constituées par des profilés de commerce. Le profil le plus usité est le profilé à double « T » ou « IAO » (I à ailes ordinaires) qui répartit le mieux le métal pour la résistance à la flexion (Fredes. J, 2013, p. 379).

c. Béton armé :

Le béton armé est un matériau composite constitué de béton et de barres d'acier qui allie les résistances à la compression du béton et à la traction de l'acier. Il est utilisé comme matériau de construction, en particulier pour le bâtiment et le génie civil.

Le béton est connu pour sa résistance de compression très élevée et sa résistance de traction très faible, ce qui est rend l'alliance avec l'acier très efficace en vue de sa résistance très importante en flexion notamment les barres d'acier en haute adhérence (Fe 400 et Fe 500).

Pour les éléments qui travaillent en flexion (les poutres), il revient de calculer la section des armatures.

2. Calcul des charges et des surcharges :

a. Méthode de calcul :

Si l'on désire déterminer l'effort normal agissant sur une poutre encadrée par deux trames, il faudra calculer la surface d'influence affectée à cette poutre (la poutre présentant la surface d'influence S_i la plus importante est la poutre la plus sollicitée) :

Charges permanentes : $N_{G_i} = G (m^2) * S_i$

Charges d'exploitation : $N_{Q_i} = Q (m^2) * S_i$

Les données G et Q sont fonction des composantes du plancher et de la nature de l'activité respectivement.

L'effort normal ultime agissant sur la poutre est calculé comme suit : $N_i = 1.35 N_G + 1.5 N_Q$

i. Entité ottomane :

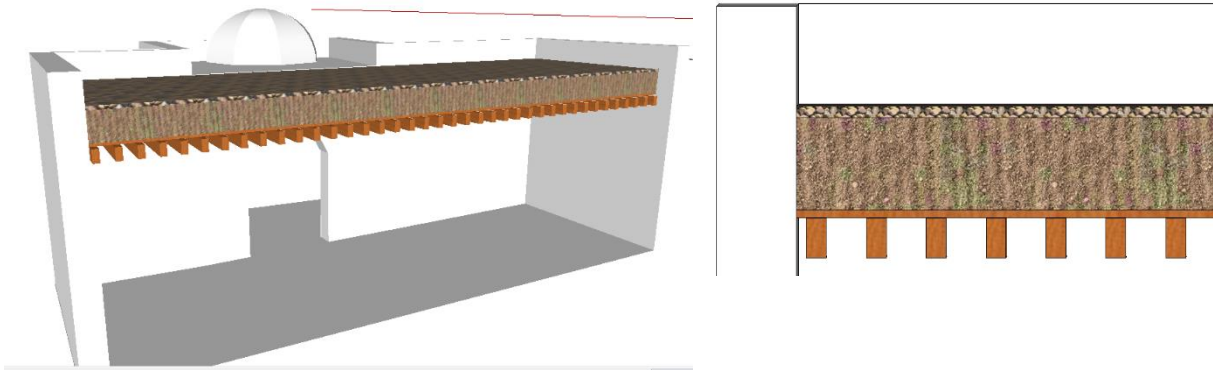


Figure IV- 1 : restitution en 3 D du plancher ottoman

(Source : auteur 2017)

« La Structure portante des planchers est constituée de rondins de bois de thuya... Au-dessus de ces rondins qui s'appuient Sur toute la largeur du mur sont disposées des planches de bois qui supportent un agglomérat de pierres et de terre damé et régularisé en surface par un mortier sur lequel est fixé le carrelage. L'épaisseur des planchers varie entre 30 et 40 cm et celui de la terrasse, beaucoup plus épais, peut dépasser les 50 cm » (Hubert, 2000, p. 252)

✓ Poids propre de la structure portante :

Volume des solives : $0.08 \text{ m}^3 * 39 = 3.12 \text{ m}^3$

Masse volumique de bois de thuya : 400 kg/m^3 (humidité à 20%)

Volume des planches : 1.68 m^3

Masse volumique de bois : 700 kg/m^3 (humidité à 20%)

Poids propre de la structure portante : $(11.76+12.48) / 42 = 0.58 \text{ KN} / \text{m}^2$

✓ Agglomérat de pierre et de terre :

On considère la composition de l'agglomérat comme suit : 30 % pierre et 70 % terre.

$(1900 * 0.30) + (1250*0.70) = 1445 \text{ KG} / \text{m}^3$ (ep = 0.46m) : $6.64 \text{ KN} / \text{m}^2$

✓ Carreaux de TC léger à bain de mortier : $0.65 \text{ KN} / \text{m}^2$

✓ Etanchéité multicouche (ép=2cm ; $\rho=6\text{KN/m}^3$) : $0.12 \text{ KN} / \text{m}^2$

✓ Papier kraft (poids négligeable)

✓ Protection gravillon (ép=5cm ; $\rho=17\text{KN/m}^3$) : $0.85 \text{ KN} / \text{m}^2$

Charge permanente totale :

$G_t = 8.84 \text{ KN} / \text{m}^2$

ii. Entité coloniale « a » :

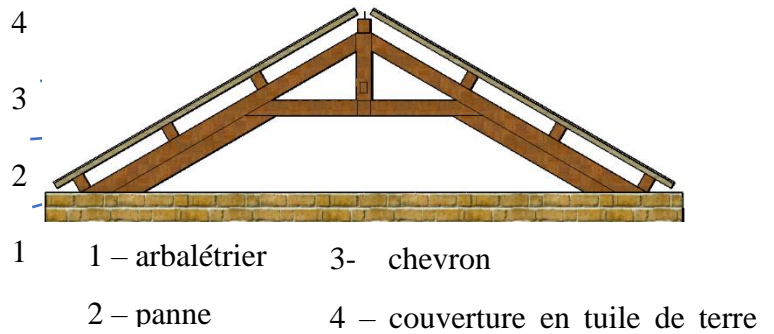


Figure IV- 2 : restitution en 3 D de la ferme.

(Source : auteur 2017)

✓ Calcul du poids propre de la structure :

Volume des entrants : $0.90 \text{ m}^3 * 16 = 14.40 \text{ m}^3$

Volumes des pannes : $(0.16 * 0.22 * 31) \text{ m} * 7 = 7.63 \text{ m}^3$

Volumes des cheverons : $(0.05 * 0.08 * 4.90) \text{ m} * 136 = 2.66 \text{ m}^3$

Masse volumique du bois (de Chêne ou de Sapin) = entre 500 et 700 kg/m³

Poids total : $(14.40 + 7.63 + 2.66) * 700 = 17283 \text{ kg}$

Masse surfacique de la structure : $17238 / (31.35 * 9.60) = 57.43 \text{ kg} / \text{m}^2$

✓ Calcul du poids de la couverture (en tuile de terre cuite) :

Masse surfacique de la tuile : 50 kg / m²

✓ Etanchéité multicouche (ép=2cm ; $\rho=6\text{KN}/\text{m}^3$) ----- 0.12 KN / m²

✓ Papier kraft (poids négligeable)

Charge permanente totale :

$G_t = 1.19 \text{ KN} / \text{m}^2$

✓ Calcul des charges d'exploitation :

Les charges d'exploitation sur les toitures inclinées est de l'ordre de 0.15 KN / m², néanmoins les charges sur une surface rectangulaire projetée sont négligeables (Normalisation, 1993, p.

4)

iii. Entité coloniale « b » :

Les planchers en solives métallique et en voutain de brique pleines comme coffrage (figure) sont une pratique de la construction française du 19eme et 20eme siècles notamment dans la capitale (Fredet, 2003)

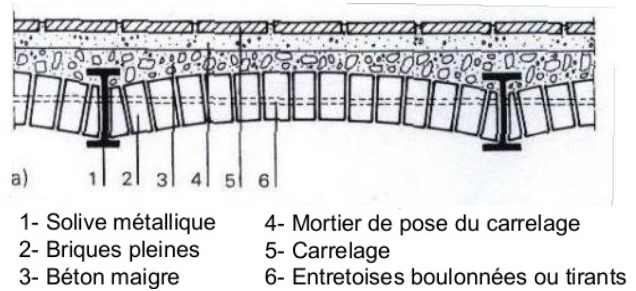


Figure IV- 3 : composants d'un plancher métallique

(Source : maisons de Paris, 2003)

a) Charges permanentes :

✓ Plancher terrasse inaccessible (solives de fer) :

- Etanchéité multicouche ($\epsilon_p=2\text{cm}; \rho=6\text{KN/m}^3$) ----- 0.12 KN / m²
- Papier kraft (poids négligeable)
- chape flottante en béton : 0.22 KN / m² et par 5 cm d'épaisseur 1.1 KN / m²
- poids propre d'un plancher fer (Fredes. J, 2013, p. 379) : 2 KN / m²

$$G_t = 3.22 \text{ KN / m}^2$$

b) Surcharges d'exploitations :

Plancher terrasse (inaccessible) ----- $Q_t = 1,00\text{KN/m}^2$.

iv. Entité post-coloniale :

Pour déterminer les charges permanentes G et les surcharges d'exploitation Q, nous nous référons au DTR B-C2-2.

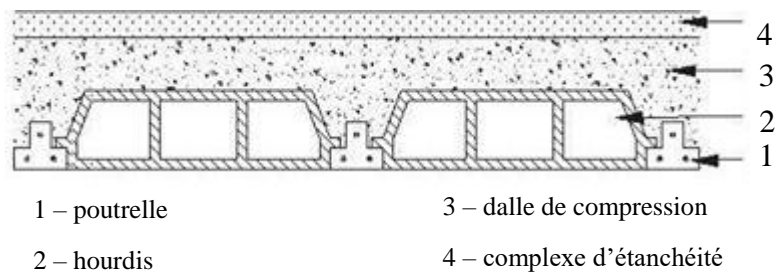


Figure IV- 4 : composants d'un plancher à corps-creux

(Source :4geniecivil.com 2017)

b) Charges permanentes :

✓ Plancher terrasse inaccessible (corps creux) :

- Protection gravillon ($\epsilon_p=5\text{cm}$; $\rho=17\text{KN/m}^3$) ----- 0,85 KN / m²
- Etanchéité multicouche ($\epsilon_p=2\text{cm}$; $\rho=6\text{KN/m}^3$) ----- 0,12 KN / m²
- Papier kraft (poids négligeable) ----- 0,50 KN / m²
- Forme de pente en béton maigre ($\epsilon_p=10\text{ cm}$; $\rho=22\text{KN/m}^3$) ----- 2,20 KN / m²
- Plancher en corps creux¹ (16 + 4) cm----- 2,80 KN / m²
- Enduit en plâtre ($\epsilon_p=2\text{cm}$; $\rho=4\text{KN/m}^3$) ----- 0,20 KN / m²
- Isolation thermique en liège ($\epsilon_p=2\text{ cm}$; $\rho=4\text{KN/m}^3$) ----- 0,20KN / m²

$G_t = 6,87 \text{ KN / m}^2$

b) Surcharges d'exploitations :

1-Plancher terrasse (inaccessible) ----- $Q_t = 1,00\text{KN/m}^2$.

¹ Extrait de la norme NF P 06-004 de mai 1977 [1.9].

b. Présentation des résultats :

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats des applications numériques :

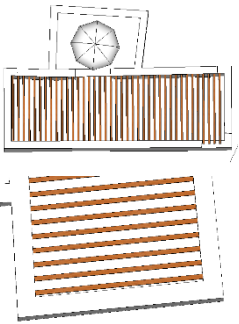
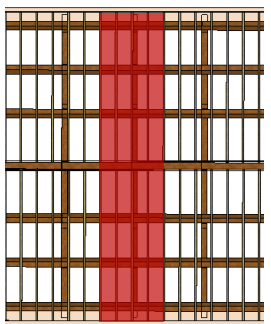
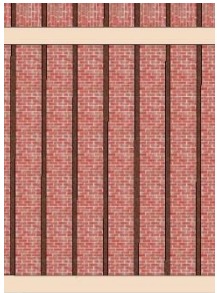
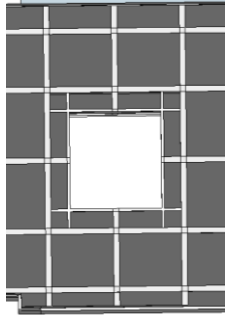
Entité	OTTOMANE	COLONIALE « 1 »	COLONIALE « 2 »	POST-COLONIALE
Relevé des éléments porteurs les plus sollicités				
Surface d'influence	$(3,50 * 0,30) =$ 1.05 m ²	$(4,90 * 2) * 2 =$ 19.60 m ²	$(5,20 * 0,70) =$ 3.64 m ²	$(8 * 5) =$ 40 m ²
Poids du plancher (à nu)	7.58 kN	Ferme + tuile : 21 kN	7.28 kN	112 kN
Charges permanentes	G = 8.84 kN / m ² N _G = 9.82 kN	G = 1.19 kN / m ² N _G = 23.32 kN	G = 3.72 kN / m ² N _G = 13.54 kN	G = 6.87 kN / m ² N _G = 274.8 kN
Surcharges d'exploitation	Q = 1.00 kN / m ² N _Q = 1.05 kN	Q = / N _Q = /	Q = 1.00 kN / m ² N _Q = 3.64 kN	Q = 1,00kN/m ² N _Q = 40 kN
Charge ultime (toiture à nu) ¹	11.81 kN	28.35 kN	15.29 kN	211.20 kN
Charge ultime	N _i = 14.83 kN	N _i = 31.49 kN	N _i = 23.74 kN	N _i = 431 kN

Tableau IV- 5 : charges supportées par les éléments les plus sollicités de la toiture

(Source : auteur 2017)

¹ C'est-à-dire, le poids de la toiture sans compter le complexe d'étanchéité ou tout autre surcharge susceptible d'être enlevé si la toiture va être sujette d'une intervention.

3. Calcul de la portance des éléments de structure

a. Méthode de calcul :

i. Cas des planchers :

Un plancher est un ouvrage horizontal de charpente qui sépare les étages d'un bâtiment et supporte une aire de répartition des charges d'exploitation correspondant à une destination spécifique (affectation, usage des lieux) (Fredet, 2003).

Matériaux homogènes (fer et bois) :

Ce calcul est valable pour les matériaux homogènes (dans notre cas, le fer et le bois) et pour des élancements géométriques limités :

(Poutres : $l/h = 12$ Solives : $l/h = 24$)

Les trois conditions à vérifier simultanément sont les suivantes :

1) contrainte due au moment de flexion : σ (daN/cm²) = $\frac{M_{\max} \text{ (cm/daN)} \times h \text{ (cm)}}{2 \times I \text{ (cm}^4\text{)}} = \sigma_{\text{admissible}}$

(Condition de rupture, la plus contraignante) $2 \times I \text{ (cm}^4\text{)}$

avec : $M_{\max} = P l^2 / 8$ (charges uniformément réparties)

2) condition de flèche : $f \text{ (cm)} = \frac{M_{\max} \text{ (cm/daN)} l^2}{\alpha E \text{ (daN/cm}^2\text{)} I \text{ (cm}^4\text{)}} = 1/150, 1/200, 1/300 \text{ ou } 1/400$

(déformation max. adm.) $\alpha E \text{ (daN/cm}^2\text{)} I \text{ (cm}^4\text{)}$

Avec : $I = bh^3 / 12$ (sections rectangulaires)

$\alpha = 9,6$ (charges uniformément réparties), 12 (1 charge ponctuelle) ou 8 (2 charges ponctuelles réparties symétriquement sur une solive d'enchevêtrement)

E (module de Young) = $100\,000 \text{ bars} = 10^5 \text{ bars}$ (avec $1 \text{ bar} = 1 \text{ daN/cm}^2$)

(le module d'élasticité E est un facteur de proportionnalité entre contrainte et déformation)

3) contrainte de cisaillement due à l'effort tranchant : $\delta_{\max} \text{ (daN/cm}^2\text{)} = \frac{3 T_{\max} \text{ (daN)}}{2 S \text{ (cm}^2\text{)}} = \delta_{\text{admissible}}$

(rupture due au cisaillement) $2 S \text{ (cm}^2\text{)}$

(dans cette dernière formule, S : surface de matière en section transvers., sans notion d'inertie)

On considère trois cas principaux de chargement :

a) charges uniformément réparties p , sur portée l : $T_{\max} = p l / 2 \quad \alpha = 9,6$
 $M_{\max} = p l^2 / 8$

b) charge concentrée P , située à une distance a de A et b de B, portée l entre A et B :
 $M_{\max} = [(p \cdot b) / l] \times a$, réaction des appuis en , en B : $(p \cdot a) / l$
 A : $(p \cdot b) / l$

$T_{\max} = P \cdot a / b \quad \alpha = 12$

c) Deux charges concentrées réparties symétriquement au voisinage de chaque appui ($< 1/4$ de l) : $M_{\max} = P \cdot a \quad T_{\max} = P \quad \alpha = 8$

Dans ces équations, l'inconnue est p , charge par unité de longueur, à convertir en charge par mètre carré de plancher (charge d'exploitation admissible).

Matériau composite (béton armé) :

ii. Cas des fermes :

Une ferme est une structure complexe, elle est composée de :

Entraits : triangulaires qui travaillent essentiellement en traction/compression.

Pannes et chevrons : rectangulaires, qui travaillent principalement en flexion.

Il s'agit d'un effort normal, la transition des efforts se fait dans un sens descendant (par effet de gravité terrestre) des planches vers les chevrons et des chevrons vers les pannes puis vers les entraits. En effet il faut étudier les sections suivant les types de contraintes qu'elles subissent.

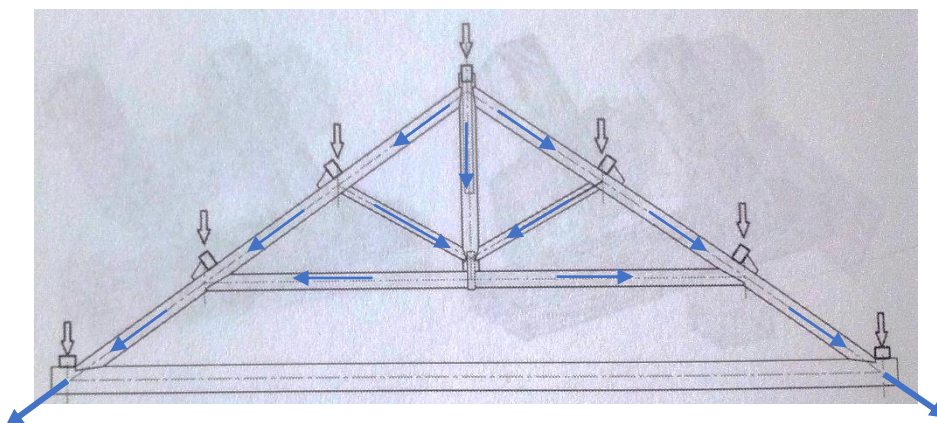


Figure IV- 5 : schéma statique d'une ferme à deux pannes intermédiaires, faux entrait et contreflèches

(Source : Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens, 2013.)

a. Traction axiale :

La traction axiale est une sollicitation fréquemment rencontrée dans les entrails, éléments de contreventement, membrure inférieure de poutre composite, etc.

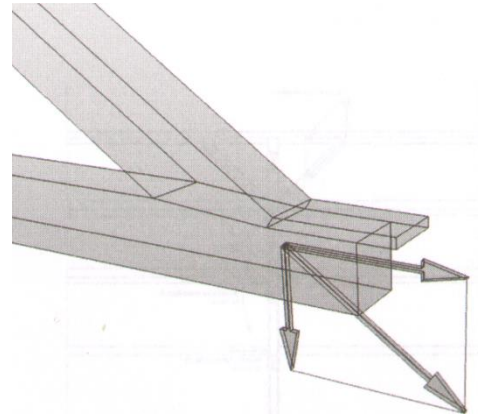


Figure IV- 6 : décomposition de la résultante de l'effort normal appliqué sur l'entrait

(Source : Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens, 2013)

Justification :

La composante verticale de la force étant reprise par l'appui, l'entrait n'est sollicité qu'avec la force horizontale qui est perpendiculaire à sa section, et donc un effort de traction axial.

La contrainte de traction axiale induite par la charge doit rester inférieure ou égale à la résistance en traction axiale calculée. Le taux de travail est le rapport de la contrainte induite sur la résistance calculée. Il doit être inférieur ou égal à 1.

La justification avec le taux de travail permet d'identifier très rapidement les points sensibles d'un bâtiment lorsque ce taux est proche de 1.

$$\text{taux de travail} = \frac{\sigma}{f} \leq 1 \quad \text{avec :}$$

- σ : contrainte de traction axiale induite par la combinaison d'actions des états limites ultimes en MPa

$$\sigma = \frac{N}{A}$$

N : effort de traction en Newton.

A : aire de la pièce en mm²

- f : résistance de traction axiale calculée en MPa

$$f = f_{t,k} * \frac{k(\text{mod})}{\gamma_m} * k(h)$$

f : contrainte de résistance en traction axiale en MPa.

f_{t,k} : contrainte caractéristique de résistance en traction axiale en MPa.

k_{mod} : coefficient modificatif en fonction de la charge de plus courte durée et de la classe de service.

γ_m : coefficient partiel qui tient compte de la dispersion du matériau.

k_h : coefficient de hauteur.

b. Plancher des combles :

L'entrait de la ferme subit la charge du plancher des combles (construit en bois), il y a lieu de vérifier sa résistance aux charges induites par ce dernier. Cette charge -étant sous la toiture- ne perturbe pas la présente étude, néanmoins il faut vérifier la stabilité de l'ensemble.

La démarche de calcul est la même démarche expliquée dans le point précédent.

b. Présentation des résultats :

iii. Entité ottomane :

« En dehors de la nécessité de conserver les planchers de ce bâtiment ou de les réparer l'ancienne, il apparaît la difficulté de diagnostiquer la portance de ces planchers.

Pour cela, il est proposé que des essais de chargements soient réalisés sur quelques planchers significatifs. En effet, 50 % des planchers seraient altérés seulement au niveau du voligeage, et de quelques solives et 20 % n'auraient pas été altérés. Sur l'un et l'autre de ces planchers, on vérifierait la contrainte à prendre en compte dans les solives pour déterminer la capacité portante des planchers. On mesurerait la portance jusqu'à par exemple une flèche égale 1/200.

Les résultats de ces mesures compte tenu que le mélange de gravats, de terre et de chaux au-dessus des voliges peut être avantageusement remplacé par des granulats d'argile expansée pour diminuer le poids propre du plancher (Ou dans notre cas d'un substrat de végétation extensif), permettraient d'établir expérimentalement la capacité portante des planchers. De plus, on tiendra compte d'un coefficient de sécurité à définir en fonction de la dispersion des essais » (Bouineau, 1985, p. 18)

« La structure des terrasses sera traitée comme les planchers cités ci-dessus. En ce qui concerne leur étanchéité, il est recommandé pour la durabilité des bois de réaliser une étanchéité moderne. En effet, l'étanchéité ancienne était seulement assurée par une chape de mortier et par endroits, par des revêtements complémentaires comme par exemple des

carreaux de céramique. Ce type d'étanchéité ne peut être parfait et demande en outre un entretien important.

Il est donc souhaitable-de réaliser une étanchéité sur un support qui pourrait être en béton armé d'argile expansé » (Bouineau, 1985)

« On pourra ensuite, suivant l'esthétique et l'usage désiré, choisir une protection lourde, c'est-à-dire que par exemple, pour une utilisation piétonne, on pourrait réaliser sur une couche de désolidarisation de l'ordre de quatre cm en sable, effectuer une chape en mortier ou en béton, isolée du sable par un papier kraft. Il est possible de laisser cette chape brute ou de la revêtir par exemple de carreaux de terre cuite » (Bouineau, 1985)

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats des différentes vérifications pour la détermination de la capacité portante de la poutre :

Caractéristiques géométriques et mécaniques	Condition de flèche $f_{\max} = M_{\max} * l^2 / (\alpha * E * I)$	Résistance à la flexion $\sigma = (M_{\max} * h) / (2 * I)$	Résistance au cisaillement $\tau = (3/2) * (T_{\max} / S_{\text{ame}})$
S_{influence} : 1.05 m² l : 350 cm A : (20 * 10) cm² I : bh³/12 α : 9.6 σ : 100 Bar E : 95000 Bar τ : 12 Bar	Avec : $F_{\max} = l / 400$ $M_{\max} = (p * l^2) / 8$ soit p égale à : $= \frac{(2 * f_{\max} * \alpha * E * b * h^3)}{(3 * l^4)}$ = 2.836 daN/ cm d'où : P = 945 daN/m ²	Avec : $M_{\max} = (p * l^2) / 8$ soit p égale à : $= \frac{(4 * \sigma * b * h^2)}{(3 * l^2)}$ = 4.354 daN/ cm d'où : P = 1451.2 daN/m ²	Avec : $T_{\max} = (p * l) / 2$ soit p égale à : $= \frac{(4 * \tau * b * h)}{(3 * l)}$ = 9.143 daN/ cm d'où : P = 3047.6 daN/m ²

Tableau IV- 6 : la capacité portante de la poutre en bois de thuya (cèdre).

(Source : auteur 2017)

iv. Entité coloniale « 1 » :

a. Traction axiale (la ferme) :

Le tableau ci-dessous représente les résultats de la vérification de la résistance de traction de l'entrait de la ferme pour la détermination de la capacité portante de la poutre :

Caractéristiques géométriques et mécaniques	Condition de Résistance à la traction axiale	Application numérique
N : 31.49 KN l : 800 cm S_{influence} : 19.60 m² A : (16*44) cm² I : bh³/12 f_{tk} : 90 bar k_{mod} : 0.6 γ_m : 1.3 k_h : 1	taux de travail = $\frac{\sigma}{f} \leq 1$ Avec $\sigma = \frac{N}{A}$ $f = f(t, k) * \frac{k(mod)}{\gamma_m} * k(h)$	$\sigma = 3.9 \text{ bar}$ $f = 41.5 \text{ bar}$ $\frac{\sigma}{f} = \frac{3.9}{41.5} = 0.09 \leq 1$ $N_{critique} = f * A$ $= 29216 \text{ daN}$ $= 1490.6 \text{ daN/m}$

Tableau IV- 7 : la capacité portante en traction de la poutre en bois de chêne.

(Source : auteur 2017)

- b. Plancher des combles : Le tableau ci-dessous regroupe les résultats des différentes vérifications pour la détermination de la capacité portante de l'entrait :

Caractéristiques géométriques et mécaniques	Condition de flèche	Résistance à la flexion	Résistance au cisaillement
S_{influence} : 19.60 m² l : 800 cm A : 16*44 cm² I : bh³/12 α : 9.6 σ : 115 Bar E : 105 Bar τ : 15 Bar	$f_{max} = M_{max} * l^2 / (\alpha * E * I)$ Avec : $F_{max} = l / 400$ $M_{max} = (p * l^2) / 8$ soit p égale à : $= \frac{(2 * f_{max} * \alpha * E * b * h^3)}{(3 * l^4)}$ $= 4.26 \text{ daN/cm}$ d'où : P = 255.5 daN/m ²	$\sigma = (M_{max} * h) / (2 * I)$ Avec : $M_{max} = (p * l^2) / 8$ soit p égale à : $= \frac{(4 * \sigma * b * h^2)}{(3 * l^2)}$ $= 7.42 \text{ daN/cm}$ d'où : P = 302.9 daN/m ²	$\tau = T_{max} / S_{ame}$ Avec : $T_{max} = (p * l) / 2$ soit p égale à : $= \frac{(4 * \tau * b * h)}{(3 * l)}$ $= 17.6 \text{ daN/cm}$ d'où : P = 718.37 daN/m ²

Tableau IV- 8 : la capacité portante en flexion et en cisaillement de la poutre en bois de chêne.

(Source : auteur 2017)

v. Entité coloniale « 2 » :

Le tableau ci-dessous regroupe les résultats des différentes vérifications pour la détermination de la capacité portante de la poutre :

Caractéristiques géométriques et mécaniques	Condition de flèche $f_{max}=M_{max} * l^2 / (\alpha * E * I)$	Résistance à la flexion $\sigma = (M_{max} * h) / (2 * I)$	Résistance au cisaillement $\tau = (3/2) * (T_{max} / S_{ame})$
S_{influence} : 3.64 m² l : 520 cm A : IAO 180*55 I : (BH³-bh³) / 12 α : 9.6 σ : 600 Bar E : 1 900 000Bar τ : 0.85*σ	Avec : $F_{max}=l/400$ $M_{max}=(p * l^2) / 8$ soit p égale à : $= (8 * f_{max} * \alpha * E * I) / l^2$ $= 2.188 \text{ daN/cm}$ d'où : $P = 312.6 \text{ daN/m}^2$	Avec : $M_{max}=(p * l^2) / 8$ soit p égale à : $= (16 * \sigma * I) / (h * l^2)$ $= 1.663 \text{ daN/cm}$ d'où : $P = 237.6 \text{ daN/m}^2$	Avec : $T_{max}=(p * l) / 2$ $S_{ame} = 18 * 0.7$ soit p égale à : $= (2 * \tau * S_{ame}) / l$ $= 24.71 \text{ daN/cm}$ d'où : $P = 3530 \text{ daN/m}^2$

Tableau IV- 9 : la capacité portante du profilé en IOA

(Source : auteur 2017)

vi. Entité post-coloniale¹ :

Caractéristiques géométriques et mécaniques	Résistance à la flexion
S_{influence} : 40 m² l : 800 cm / A : (40*40) cm² I : bh³/12 D_{armature} : 16mm f_e : 4000 Bar σ : 350 Bar f_{tj} : 0.6+0.06* f_{cj}	ELU : $A_s = M_{ultime} / (0.93 * d * \sigma_s)$ avec : $\sigma_s = f_e / \gamma_s$ ELS : $A_s = M_{service} / (0.88 * d * \sigma_{ss})$ avec : $\sigma_{ss} = (2/3) * f_e$ condition de non fragilité : $A_{s \text{ min}} = 0.23 * f_{t28} * b * h / f_e$

Tableau IV- 10 : la capacité portante en flexion de la poutre en béton armé

(Source : auteur 2017)

¹ Flexion et cisaillement des poutres, Dr. Si Youcef, cours de structure de 3eme année, EPAU, Alger, 2015/2016.

a. Résistance à la flexion :

Hypothèse de calcul :

soit la poutre de (40*40) est armée de six « 6 » barres en acier de haute adhérence (Fe 400) du diamètre 16 mm (T16) :

Calcul des sections des armatures :

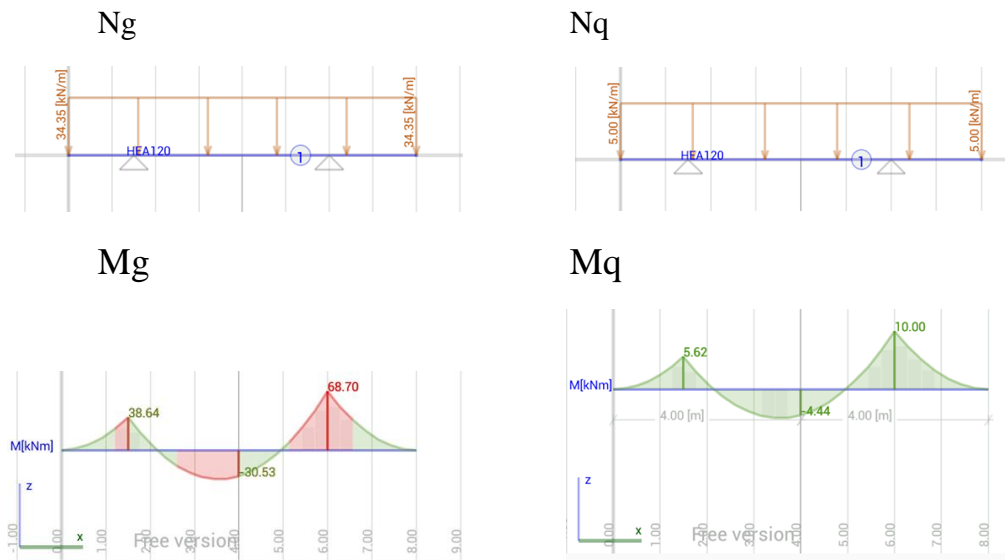


Figure IV- 7 : diagrammes des moments de flexion des charges permanentes et d'exploitation

(Source : auteur 2017)

Calcul du nombre de barres d'aciers :

	a	b	c	d	e
M g « diagramme g »	0,00	38,64	30,54	68,70	0,00
M q « diagramme q »	0,00	5,62	4,44	10,00	0,00
M ultime (1.35Mg + 1.5Mq)	0,00	60,59	47,89	107,75	0,00
M service	0,00	44,26	34,98	78,70	0,00
As ultime cm ²	0,00	5,20	4,11	9,25	0,00
As service cm ²	0,00	5,24	4,14	9,31	0,00
As min cm ²	0,00	2,48	2,48	2,48	0,00
nombre de barre	0	3	3	5	0

Tableau IV- 11 : synthèse des résultats et détermination du nombre de barres

(source : auteur 2017)

b. Capacité portante de la poutre :

$$\text{on a : } \left\{ \begin{array}{l} M_{\text{ultime critique}} = A_s * 0.93 * d * \sigma_s = 140.4 \text{ kN/m} \\ M_{\text{service critique}} = A_s * 0.88 * d * \sigma_{ss} = 101.8 \text{ kN/m} \end{array} \right.$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} M_{\text{ultime critique}} = 1,35 * M_g + 1,5 * M_q = 140.4 \text{ kN/m} \\ M_{\text{service critique}} = M_g + M_q = 101.8 \text{ kN/m} \end{array} \right.$$

$$\text{D'où : } \left\{ \begin{array}{l} M_g \text{ critique} = 82 \text{ kN/m} \\ M_q \text{ critique} = 19.8 \text{ kN/m} \end{array} \right. \quad \text{Et :} \quad \left\{ \begin{array}{l} N_g \text{ critique} = 41 \text{ kN/m} = 328 \text{ KN} \\ N_q \text{ critique} = 9.9 \text{ kN/m} = 79.2 \text{ KN} \end{array} \right.$$

$$\text{Donc : } \left\{ \begin{array}{l} N_{\text{ultime critique}} = 1.35 * N_g \text{ critique} + 1.5 * N_q \text{ critique} = 561.6 \text{ kN} \\ N_{\text{service critique}} = N_g \text{ critique} + N_q \text{ critique} = 407.2 \text{ kN} \end{array} \right.$$

La capacité portante de cette poutre est : 407.2 kN, soit : 10.18 kN/m².

4. Croisement des résultats :

Après avoir calculé les charges, les surcharges et les capacités portantes pour les différentes structures. Nous allons vérifier la portance de ces systèmes en comparant les résistances des éléments porteurs avec leurs sollicitations (charges), dans le cas favorable nous allons déterminer la différence dans les charges, ce gain est décisif pour l'évaluation de la possibilité de surcharger les toitures.

Le tableau suivant représente le croisement des résultats obtenu :

Entité	OTTOMANE	COLONIALE « 1 »1		COLONIALE « 2 »	POST- COLONALE
Charge ultime kN/m ²	14.12	1.6		6.52	10.78
Capacité portante kN/m ²	9.45	2.56	14.9	2.37	10.18
1 ^{ere} Vérification (capacité/charge)	0.67	1.59		0.36	0.94
Dimensionnement de l'élément	sous- dimensionné	Surdimensionné		sous- dimensionné	Correctement dimensionné
Charge ultime (toiture à nu) kN/m ²	11.25	1.45		4.2	5.28
2 ^{eme} Vérification (capacité/charge à nu)	0.84	10.28		0.56	1.93
Gain kN/m ²	-1.8	13.45		-4.15	4.9

Tableau IV- 12 : synthèse des résultats

(source : auteur 2017)

En vue des résultats obtenue, seule l'entité coloniale « a » et l'entité post-coloniale présentent des possibilités de surcharge de la toiture. L'entité ottomane et l'entité coloniale « b » ne peuvent supporter des surcharges, ainsi elles ne peuvent faire l'objet d'une adaptation de toiture végétalisée.

Cependant, si l'on souhaite vivement, il existe des méthodes et des moyens de renforcement de la structure, notamment ceux qui sont appliqués dans les projets de réhabilitation et de restauration.

III. Evaluation de la possibilité d'introduction des toits végétaux :

La volonté d'adapter des toitures végétalisées dans un bâtiment existant est une opération qui s'avère complexe. La surcharge, la hauteur des plantes, la pente de la toiture et l'accessibilité sont des critères très importants :

1 Cette entité est caractérisée par deux capacités portante : une de l'ordre de 2.56 kN/m² qui inclue le plancher des combles, et l'autre de l'ordre de 14.9 kN/m² qui ne concerne que la toiture.

1. Poids et surcharges (Wallonne, 1998) :

L'introduction d'une toiture végétalisée sollicite la structure existante avec une surcharge significative (selon le type de toiture proposé) qui ne doit en aucun cas dépasser la capacité portante de cette structure :

Type de végétation	Végétation intensive	Végétation semi-intensive	Végétalisée extensive
Surcharge approximative de la toiture	> 4 kN/m ²	1 à 4 kN/m ²	0.3 à 1 kN/m ²
Entité POST-COLONIALE	✓	✓	✓
Entité COLONIALE 1	✓	✓	✓

Tableau IV- 13 : comparaison des surcharges des types de végétation avec la portance des toitures

(Source : auteur 2017)

2. Autres aspects :

En plus du poids, les toits verts ont d'autres exigences auxquelles le bâtiment doit répondre (Wallonne, 1998) :

Type de végétation	Végétation intensive	Végétation semi-intensive	Végétalisée extensive
Epaisseur (indicative)	> 0,25 m	de 0,1 à 0,25 m	< 0,1 m
Accessible	Oui	oui	non (1)
Pente usuelle du support (indicatif)	2 % à 10 %	2 % à 57 %	2 % à 70 %
Entretien de la végétation	important	moyen	Limité
Entité POST-COLONIALE	✓	✓	✓
Entité COLONIALE 1		✓	✓

Tableau IV- 14 : comparaison des caractéristiques des types de végétation avec les spécificités des toitures

(source : auteur 2017)

L'entité « post-coloniale » répond parfaitement aux différentes exigences des types de végétalisation proposés, ainsi elle peut accueillir tous types de végétalisation. Tandis que l'entité « coloniale 1 » ayant une toiture avec une pente de 30°, ne peut pas accueillir une végétalisation intensive. Seules les végétalisations extensive et semi-intensive sont possible.

1 Sauf aménagement supplémentaire.

IV. Conclusion :

La végétalisation des bâtiments existant devient une pratique assez fréquente en vue de ses nombreux avantages. Faisant partie d'un projet de rénovation ou un projet en lui-même, cette opération nécessite une étude rigoureuse et compétente.

Dans ce chapitre nous avons essayé de vérifier nos hypothèses émises au début de cette recherche en appliquant la méthode d'évaluation (étude théorique) sur les entités choisis en amont. Après avoir cité les différentes caractéristiques des systèmes porteurs, leurs matériaux, leurs sollicitations et leurs capacités portantes, nous avons croisé les résultats avec les exigences des trois procédés de végétalisation afin d'évaluer la possibilité d'appliquer ces procédés sur ces structures.

Seules deux entités ont une habilité d'accueillir une végétalisation, à l'exception de l'entité coloniale « 1 » qui -de par nature de pente- ne peut pas accueillir une végétalisation intensive.

Dans ce chapitre nous avons pu vérifier notre hypothèse concernant le recours aux essais d'écrasement, car l'évaluation théorique est non seulement pas précise mais aussi très difficile à mener :

- Les caractéristiques géométriques des éléments architectoniques ne sont pas toujours accessibles (difficulté des relevés).
- Les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisées (à l'époque de la construction) ne sont pas toujours documentés.
- Les caractéristiques mécaniques sont sujettes de dispersion après un certain temps ce qui rend les valeurs (de résistance par exemple) moins fiables.

Conclusion générale

I. Conclusion générale :

Les Grenelles de l'environnement -dans la plupart des pays- présentent la question de la réintroduction de la nature en ville. Le besoin de restaurer la nature en ville tient à ses nombreuses caractéristiques et fonctions : anti-ruissellement, énergétique, thermique, sanitaire (eau, air, bruit, déchets), prévention de l'usage de produits chimiques, esthétique, psychologique.

Une des solutions les plus répandues sont les toitures végétalisées. Le concept de végétalisation des toits n'est pas nouveau, les peuples anciens maîtrisaient des techniques leur permettant de faire pousser des végétaux sur les toits. Les contraintes de forte charge et d'entretien des systèmes intensifs ont poussé les chercheurs à développer de nouveaux systèmes de végétalisation des toits, plus légers et efficaces, appelés toitures à végétation extensive.

Le végétal devient de plus en plus précieux en ville à cause de l'évolution de nos sociétés vers plus de technologies. Cet élément vivant intégré à l'enveloppe du bâtiment est très prisé par les pays développés puisqu'il présente autant d'avantages qu'un aménagement sur le sol. Cependant, la végétalisation des toits est soumise à plusieurs contraintes, et elle est régit par des normes et des réglementations strictes, qui assurent la sécurité et la pérennité des toits.

Les contraintes qui conditionnent la conception des toits végétaux concernent : les paramètres climatiques, les caractéristiques du bâtiment, le type d'entretien et la fréquence d'arrosage admis par le propriétaire. L'analyse de ces contraintes permet d'adapter au mieux le choix du système de végétalisation (extensif, intensif...), le choix des espèces végétales et leur mise en œuvre pour que l'installation soit durable.

La toiture végétalisée présente l'avantage d'être un système constructif écologique, efficace et durable. En plus des avantages environnementaux, écologiques, sociaux, urbanistiques qu'elle procure en rajoutant des espaces verts dans les centres urbains pour le bien-être de chacun. Ces surfaces végétales supplémentaires sur les toits sont un excellent moyen pour créer des microclimats et diminuer l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ce qui se répercute sur le confort thermique intérieur et permet d'effectuer des économies sur la consommation énergétique.

La végétalisation des toits s'est développée grâce à la création d'étanchéité anti- racines, de substrats et systèmes de drainages à grande capacité de rétention de l'eau. Ces derniers sont nécessaires pour la survie des plantes.

Le développement des matériaux composants les systèmes de végétalisation extensive des toits a comblé les lacunes des systèmes de végétalisation intensive. Cependant l'analyse de certaines contraintes régissant la conception de ces toits ne peut être écartée, et ce, afin d'assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages.

L'objectif de cette recherche est de vérifier l'adaptabilité des différents types de toitures végétalisées aux structures existantes, et ce en déterminant la capacité d'une structure existante de supporter le poids d'une couverture végétale.

Nous avons choisi de tester nos hypothèses sur le centre-ville d'Alger et plus précisément dans l'hôpital Lamine Debaghine à Bab el Oued, en raison de ses caractéristiques qui sont en adéquation avec notre centre d'intérêt :

- Situation dans le centre-ville
- Les différentes mutations qu'a connu le site et qui retracent l'histoire de la ville d'Alger
- L'hôpital est une véritable synthèse des types de structures existants dans la ville d'Alger.

Tout en retraçant son histoire, nous avons énuméré les différents types de toitures existants, et les procédés de construction utilisés. Nous avons recensé trois périodes : ottomane, coloniale et post-coloniale.

Après avoir cité les différentes caractéristiques des systèmes porteurs, leurs matériaux, leurs sollicitations et leurs capacités portantes, nous avons croisé les résultats avec les exigences des trois procédés de végétalisation.

Seules deux entités ont une habilité d'accueillir une végétalisation, à l'exception de l'entité coloniale « 1 » qui -de par nature de pente- ne peut pas accueillir une végétalisation intensive.

Nous avons pu vérifier notre hypothèse concernant le recours aux essais d'écrasement (ou autres) car l'évaluation théorique est non seulement pas précise mais aussi très difficile à mener.

II. Recommandation :

Cette modeste recherche nous a montré que la végétalisation d'une toiture (dans un bâtiment existant) est un projet complexe, nécessitant une étude complète et précise.

Dans un projet d'adaptation d'une toiture végétalisée, il est à prendre en compte :

- La capacité portante de la structure est le critère de faisabilité le plus important.
- La tenue en eau augmente considérablement le poids des substrats de culture, ce qui rend la mise en place d'un système d'irrigation efficace, d'une importance majeure.
- La végétalisation d'un toit rend l'accès à l'étanchéité très difficile, il faut donc les réaliser à la perfection, et éviter tout choc mécanique.
- Le travail de relevé minutieux des sections facilite d'avantage l'évaluation de la capacité portante des structures et donne des résultats assez précis.

III. Pistes de recherche :

Au cours de cette recherche, nous avons souvent été confrontés à des questionnements et des interrogations, mais aussi des manques de données qui sont des véritables handicaps pour les chercheurs.

Les perspectives de recherche futures s'orientent, donc, vers :

- Les méthodes de renforcement des structures du XIXème et XXème siècle.
- Modes de détermination de la dispersion des caractéristiques mécaniques des matériaux de construction.
- Les toitures végétalisées comme moyen de protection et de pérennisation du patrimoine bâti.

Bibliographie

Ouvrages

1. ADIVET, C. & S. U., 2007. *Règles Professionnelles pour la conception et la réalisation, des terrasses et toitures végétalisées..* 2e éd éd. Paris: s.n.
2. Anon., 2004. *Toitures végétalisées : un procédé ancien, des techniques d'avenir,,* s.l.: s.n.
3. Assari, N., 2011. *Alger, un Passe a la Carte.* s.l.:Dalimen .
4. Côme, D., 2006. *Dictionnaire de la biologie des semences et des plantules.* Paris: Edition TEC & DOC.
5. Couasnet, Y. & B. G., 2005. *Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction.* s.l.:du Moniteur.
6. Courtat, E., 2007. *Aménager balcons et terrasses.* Paris: Hachette livre.
7. Faustine, M. F., 1989. *Le jardin en terrasse et balcon.* Paris: Editions De Vecchi S.A.
8. Fredes. J, L., 2013. *Guide de diagnostic des structures dans les bâtiments d'habitation anciens.* Paris: le moniteur.
9. Fredet, J., 2003. *Les maisons de Paris: types courants de l'architecture mineure parisienne de la fin de l'époque médiévale à nos jours, avec l'anatomie de leur construction.* s.l.:de l'Encyclopédie des Nuisances.
10. Furlani Pedroja, A., 1996. *Comment fleurir terrasse et balcons.* Paris: Editions De Vecchi S.A.,
11. Givoni, B., 1978. *l'Homme l'architecture et le climat.* Paris: Le Moniteur.
12. Hegger, M. e. a., 2009. *Construire atlas des matériaux.* France: Ed Presses Polytechniques Et Universitaires Romandes,.
13. Hubert, E., 2000. *Castrum 6: maisons et espaces domestiques dans le monde méditerranéen au Moyen Âge.* s.l.:Casa de Velázquez.
14. Larcher, J. L. & G. T., 2000. *Aménagement des espaces verts urbains et du paysage rural.* s.l.:Editions Tec & Doc.

15. Grimmond, C. S. B. & O. T. R., 2002. Turbulent heat fluxes in urban areas: observations and a local-scale urban meteorological parameterization scheme (LUMPS). *Journal of Applied Meteorology*, 41(7), pp. 792-810.
16. Lassalle, F., 2006. *Végétalisation extensive des terrasses et toitures: guide technique: conception et mise en oeuvre, aspects réglementaires, données économiques, exigences et solutions..* s.l.: Le Moniteur.
17. Mouchel, a., 1978. *La couverture : Etanchéité des toitures- terrasses.* Paris: Editions Eyrolles.
18. Rainer, R., 1972. *Les extérieurs vivants.* Suisse: s.n.
19. Risser, P., 2006. *Terrasses et balcons en ville.* Solar éd. s.l.:s.n.
20. Stevens, D., 1988. *Terrasses et petits jardins.* Paris: Editions Gründ.
21. Wallonne, 1998. L'isolation thermique de la toiture plate-Guide pratique pour les architectes.. Dans: s.l.:s.n.

Mémoires, thèses et cours

1. Emilsson, T., 2005. *Extensive vegetated roofs in Sweden: establishment, development and environmental quality. Doctoral dissertation.* Swedish University of Agricultural Sciences éd. Sweden: Faculty of Landscape Planning Horticulture and Agricultural Science of Landscape Management and Horticultural Technology Alnar.
2. Leroux, F., 2005. *Intégration végétale des bâtiments, contributions environnementales sur une maison individuelle.* Mémoire de formation continue- Architecture HQE éd. Lyon: Ecole d'Architecture de Lyon.

Rapports d'études et comptes rendus

3. Banting, D. e. a., 2005. *Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto.* s.l.:s.n.
4. Bouineau, A., 1985. *Citadelle d'Alger, expertise des travaux de protection provisoire et des travaux de restauration proposés.* Paris: unesco.

5. Do Nascimento, W. C. & S. A., 2008. *From the Modern toit jardins to the current green roofs: can a hit become classic*. Dublin, 25 ème Conference PLEA .
6. Hudson, M., 2000. *Le besoin d'une nature urbaine : un rapport de recherche*. [En ligne]
Available at: <http://www.evergreen.ca/fr/cg/resources/gw2000/index.html>
[Accès le Février 2017].
7. Jellicoe, G. J. & J. G., 2000. Dans: *Influence de l'épaisseur du substrat de culture et du microclimat sur l'acclimatation de six especes vivaces herbacees cultivees en systeme de vegetalisation de toiture SOPRANATURE (RTM)*. s.l.:Faculté des sciences.
8. Laar, M. & G. F. W., 2006. *Thermal comfort and reduced flood risk through green roofs in the Tropics*. Genève, 6-8 Sep., PLEA -23ème conférence.
9. Laroche, D., M. .. P., 2004. *Les toits verts aujourd'hui ; c'est construire le Montréal de demain*. s.l.:Mémoire présenté à L'office de consultation publique de Montréal dans le cadre du nouveau plan d'urbanisme.

Revue, guides et documents techniques

10. Blumenthal, M., 1977. Le végétal et l'architecture. *Revue Technique et Architecture*, Jan.- Fév(313), p. 27.
11. CNERIB, 2005.. *Travaux d'étanchéité des toitures : terrasses et toitures inclinées (support en maçonnerie), E4-1*, Alger: CNERIB.
12. Mouchel, A. B., 1979. Classification selon la réglementation française. *DTU*, Oct.75(43).
13. Normalisation, C. E., 1993. *EUROCODE 5–Design of timber structures*. [En ligne]
Available at: <http://www.plateforme-eurocode5.fr/>
[Accès le 04 2017].
14. OFEFP, 1995. Toits végétalisés. *Cahier de l'environnement et Protection des eaux-protection des paysage*, Volume 216.
15. Peck, S. & K. M., 2013. Lignes directrices de conception de toits verts. *SCHL et Ontario Association of Architects*.

Articles

16. Crégut, A., 2004. *La toiture végétalisée: une technique d'aménagement durable, Technique du solaire thermique*,. [En ligne] Available at: <http://www.gazettenucleaire.org/~resosol/SolPass/toiturevegetalisee/intro.html> [Accès le 15 02 2017].
17. Ecovegetal, 2014. *Entretien des systèmes de végétalisation extensive et semi-intensive*. [En ligne] Available at: www.ecovegetal.fr
18. Henderson, B., Miller, P. et al., 2003. *Human-Driven Extensive Greenroof Design*.. s.l.: Virginia Polytechnic Institute & State University.
19. Nowak, D. J. e. a., 1998. *Modeling the effects of urban vegetation on air pollution*. cité dans *Air pollution modeling and its application XII*. s.l.: Springer US..
20. Steemers, k., 2004. *environmental diversity in architecture*. great britain: spon press.

ملخص

الهدف من هذا البحث هو المساهمة في تحقيق التنمية المستدامة. وتهدف هذه السياسة إلى الجمع بين الازدهار الاقتصادي والتوازن البيئي والاجتماعي، وبالتالي الاستفادة من تحسين الظروف المناخية للمدينة، والدعوة إلى احترام البيئة من خلال التوفيق بينها وبين المحيط الحضري والبيئة المبنية.

توفر الأسقف النباتية حلا ملموسا لنقص الغطاء النباتي في البيئات الحضرية. ويتألف هذا العمل المتواضع من اتقان مفاهيم الغطاء النباتي على السطح من أجل تقييم احتمال تطبيق هذه التقنية على مختلف أنواع الهياكل الموجودة مسبقا.

طموحنا هو المشاركة، من خلال أطروحة الماجستير هذه، لإثراء النظرية المتعلقة بالأسقف الخضراء، وإمكانية تطبيقها على الهياكل الموجودة مسبقا، وخاصة في أعمال التجديد وإعادة التأهيل في الجزائر. ونأمل أيضا أن نقدم توصيات إلى زملائنا الباحثين حول مساهمة الغطاء النباتي للسطح في حماية واستدامة غلاف المبنى.

أولا، سوف نسلط الضوء على الأسطح الخضراء، وتكوينها، والخصائص التقنية والقيود على التصميم. وسيساعدنا ذلك على تحديد معالم تسمح بتقييم إمكانية تطبيق هذه التقنية في المباني القائمة.

ثم سنقوم بدراسة هذا الاحتمال في مدينة الجزائر، وتحديدًا في مستشفى لمين دجاجين باب الوادي، وهذه المنشأة تعتبر خير مثال على تنوع الهياكل المبنية في هذه المدينة. سنقوم -نظريا- بتقييم قدرة تحمل العناصر الحاملة من أسطح المباني الأربعة. المقارنة بين هذه النتائج وخصائص الأسقف الخضراء تسمح لنا بمعرفة إمكانية تطبيق ما نصبوا إليه. وبذلك، سنقدم توصيات لاختيار نوع الغطاء النباتي الملائم للمباني القائمة.

كلمات البحث: سقف نباتي، المبنى الموجود، قدرة تحمل، تكيف.

Abstract

The objective of this research is to contribute to sustainable development. This policy aims to combine economic prosperity with an ecological and sociocultural balance, hence the advantage of optimizing the climatic conditions of the city, advocating respect for the environment by reconciling it with the urban space and the built environment.

Vegetated roofs offer a palpable solution against the lack of vegetation in urban environments. Thus, this modest work consists in mastering the concepts of roof vegetation in order to evaluate the probability of applying this technique to the different types of preexisting structures.

Our ambition is to participate, through this master's thesis, to extend the theory concerning green roofs, the possibility of introducing them to the preexisting structures, especially in the renovation and rehabilitation works, and this in an Algerian context. We also, hope to provide recommendations to our fellow researchers on the contribution of roof vegetation to the protection and perpetuation of the building envelope.

First, we will be presenting a state of knowledge on green roofs, their composition, their technical characteristics and their design constraints. This will help us define parameters allowing the evaluation of the possibility of introducing this technique in existing buildings. Then, we will be studying this possibility on the city of Algiers, specifically on the hospital *Lamine Debaghine* in Bab El Oued, this establishment presenting a true synthesis of the built structures present within the city.

Finally, we'll be making a theoretical evaluation to the loads of the roofs of four buildings, and the bearing capacities of their structural elements. The combination of these results with the characteristics of the green roofs will allow us to identify the feasibility. Therefore, we will extricate recommendations for the picking of the type of vegetation favorable to existing buildings.

Keywords : vegetalized roof, existing building, bearing capacity, possibility.