



ZiE
Fondation ZiE

Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering

**BATIMENT BIOCLIMATIQUE: ETUDE DE L'IMPACT THERMIQUE
D'UNE TOITURE VERTE ET REDUCTION DES PONTS
THERMIQUES**

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU
MASTER EN INGENIERIE DE L'EAU ET DE
L'ENVIRONNEMENT
OPTION : GENIE-CIVIL**

Présenté et soutenu publiquement en Juin 2011 par

Nassirou TAHIROU

Travaux dirigés par : Dr Raffaele VINAI

(UTER-ISM)

Dr Ismaila GUEYE

(UTER-ISM)

M Pierre ABADIE

(Expert comptable)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Prénom NOM

Membres et correcteurs : Prénom NOM

Prénom NOM

Prénom NOM

Promotion [2010/2011]

CITATIONS

« L'écologie est une magnifique occasion, peut-être même l'ultime occasion, de redonner du sens au progrès... »

Nicolas HULOT

« Tout devient patrimoine : l'architecture, les villes, le paysage, les bâtiments, les équilibres écologiques, les codes génétiques »

Marc GUILLAUME

REMERCIEMENTS

Tous mes remerciements et toute ma gratitude sont adressés :

- Tout d'abord à l'Eternel Dieu Tout Puissant, le Tout Miséricordieux, Unique et sans associé qui m'a donné la force de terminer ce long parcours,
- à mon cher père M Tahirou ABDOU pour son appui soutenu durant toutes ces années de formation,
- à ma chère et tendre maman Mme TAHIROU Fourératou pour tous ses sacrifices,
- à M Pierre ABADIE qui m'a donné l'opportunité d'étudier ce thème passionnant,
- à mes encadreurs pour leurs conseils dans l'élaboration du présent mémoire,
- à mes coéquipiers du groupe NEWANGO (Abderrahmane, Nicolas et Ousmane),
- à mes chers frères et sœur (Ibrahim, Youssoufa, Rahinatou),
- à mes amis et compagnons de tous les jours (plus particulièrement à Faizatou, Abdulkader, Aida, Atteib, Césaire, Ismaël-Yacine, Nasser, Olivier...),
- à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail.

A vous tous, ce document vous est dédié. Je vous remercie tous du fond du cœur.

RESUME

Ce mémoire porte essentiellement sur l'étude de l'optimisation de l'enveloppe d'un bâtiment bioclimatique à sept étages, répondant au nom de NIWANGO (« Bienvenue » en langue locale), en recherchant les matériaux adaptés, les techniques de construction, et le confort, tout en intégrant l'aspect économique avec l'utilisation des matériaux locaux disponibles.

Le réchauffement climatique n'est pas une illusion ; c'est un fait réel. Son impact se fait de plus en plus sentir et inquiète les collectivités (Accord de Kyoto¹, Grenelle de l'Environnement²...) La sauvegarde de notre environnement est inscrite comme une priorité dans toutes les politiques de développement. La sauvegarde de l'environnement prend plusieurs formes parmi lesquelles figurent les bâtiments bioclimatiques. Cependant, en Afrique, les techniques de végétalisation des toits restent encore mal connues.

Pour une première dans le bâtiment au Burkina Faso et même en Afrique de l'Ouest, Il s'agit particulièrement d'étudier la l'impact d'une toiture verte sur le confort thermique dans le bâtiment, les techniques de mise en œuvre en climat tropical sec, en se servant des matériaux locaux. Cette technique de construction se sert de la forte inertie de la terre et de l'évaporation de l'eau, et de l'évapotranspiration des plantes pour le rafraîchissement de la toiture et donc des bâtiments. C'est une technique de construction bioclimatique encore jamais étudiée en Afrique occidentale. Cette étude d'optimisation se poursuit en outre par l'étude de méthodes de réduction des transferts de chaleur par effet des ponts thermiques.

Mots Clés :

1 – Toiture verte

2 – Toiture végétalisée

3 – Bâtiment durable

4 – Isolation thermique

5 - Complexe végétal

¹ Traité international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre signé le 11 décembre 1997.

² Ensemble de rencontres politiques visant à prendre des décisions à long terme en matière d'environnement et de développement durable.

ABSTRACT

This research thesis is essentially about the optimization of the envelope of a seven-story green building going by the name NIWANGO' (meaning 'welcome' in local tongue), by researching necessary raw materials, construction methods, comforts, while taking into account economics aspect and availability of those materials.

The global warming is not an illusion but a fact. Its impact is getting worst and worries the communities. Kyoto Protocol³, Grenelle Environnement⁴... the protection of our environment has become a priority. However, green roofing techniques are not well known in Africa.

As a first in the building area in Burkina Faso and in West Africa, the objective of this project is mainly to study the feasibility of green roofing on buildings, its implementation techniques in a dry tropical climate using native materials.

This construction technique uses the earth's high inertia, high water evaporation, plants evapotranspiration to refresh the roofs, and thus the building interior. This is a green project, never done in West Africa. This optimization is performed by studying methods of heat transfer reduction by thermal bridge effect.

Key words:

1 – Green roof

2 - Vegetated roof

3 – Green Building

4 – Thermal insulation

5 – Plant complex

³ International environmental treaty adopted on 11 December 1997 with the goal of achieving the "stabilization of greenhouse gas concentrations" in the atmosphere.

⁴ Open multi-party debate with goal of unifying a position on a specific theme and defining the key points of public policy on ecological and sustainable development.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

2iE: Institut Internationale d'Ingénierie de l'eau et de l'environnement

γ_b : Coefficient de sécurité du béton

γ_e : Coefficient de sécurité de l'acier

AFNOR: Association française de normalisation

Asa : Section d'acier en appuis

Ast : Section d'acier en travée

BAEL: Béton armé aux Etats Limites

CCT : Cahier des Clauses Techniques

HQE : Haute Qualité Environnementale

DaN : Déca newton

DTU : Dossiers Techniques Unifiées

ELS : Etats Limites de Service

ELU : Etats Limites Ultimes

EN : Norme européenne

Fbu : Résistance du béton pour le calcul à l'ELU

Fc28 : résistance en compression du béton à 28 jours

Fe400 : Limite d'élasticité de l'acier

Ft28 : Résistance en traction du béton à 28 jours

HA : Haute Adhérence

kN : kilo-newton

lx : petite largeur (suivant x)

ly : grande largeur (suivant y)

ML (végétoit) : Substrat végétal Lourd de Ecotoit

MS (végétoit) : Substrat végétal Léger de Ecotoit

Mua : Moment ultime sur appuis

Mus : Moment ultime en travée

NF : Norme Française

PVC : Polychlorure de Vinyle

pyBar : Logiciel de calculs de structures

TVE: Toiture Verte Extensive

TVS : Toiture Verte Semi-intensive

TVI : Toiture Verte Intensive

IBGE : Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement

IRC : Institut de Recherche en Construction

SOMMAIRE

CITATIONS	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	v
SOMMAIRE.....	1
LISTE DES TABLEAUX.....	3
LISTE DES FIGURES	3
INTRODUCTION.....	4
Chapitre 1 : Généralités	6
I- Historique	6
II- Concept.....	6
III- Etudes des techniques de construction	7
1. Les toitures vertes intensives (toiture jardin).....	8
2. Les toitures vertes semi-intensives	12
3. Les toitures vertes extensives.....	14
IV- Comparatif des différents types de toiture en zone tropicale sèche.....	17
Chapitre 2 : Conception et dimensionnement de toitures vertes : cas d'un bâtiment R+7.....	18
A- CONCEPTION	18
I. Analyse technique de la toiture	18
II. Disposition de la toiture végétalisée dans la construction et l'environnement.....	18
III. Dispositions nécessaires	18
IV. Modélisation de la toiture.....	19
B. DIMENSIONNEMENTS DES DIFFERENTS TYPES DE TOITURE.....	19
I. Analyse et dimensionnement de la toiture verte extensive	20
1. Forme géométrique de la toiture.....	20
2. Eléments de la toiture	20
3. Les charges à prendre en compte.....	21
4. Dimensionnement de la structure portante (Voir détails de calculs en annexes)	22
II. Analyse et dimensionnement de la toiture verte semi-intensive	23
1. Forme géométrique de la toiture.....	23
2. Eléments de la toiture	23
3. Les charges à prendre en compte.....	25

4. Dimensionnement de la structure portante (Voir détails de calculs en annexes)	26
III. Analyse et dimensionnement de la toiture verte intensive	26
1. Forme géométrique de la toiture.....	26
2. Eléments de la toiture	26
3. Les charges à prendre en compte.....	28
4. Dimensionnement de la structure portante (Voir détails de calculs en annexes)	29
C. OUVRAGES PARTICULIERS.....	29
I. La zone stérile.....	29
II. Le dispositif de séparation.....	30
III. Le système d'arrosage	30
IV. Les évacuations pluviales	31
D. LES PONTS THERMIQUES	32
I. Les écrans de protection solaire.....	32
1. Les rupteurs de ponts thermiques.....	33
2. Isolation par réduction des surfaces de contacts	33
Chapitre 3 : Résultats, analyses et discussions	34
I. Résultats et analyses	34
II. Discussions.....	35
Chapitre 4 : Etude socio-environnementale et économique.....	37
I. Impacts environnementaux.....	37
II. L'aspect financier.....	39
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	42
BIBLIOGRAPHIE.....	44
SITES INTERNET	45

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1: Hypothèses de calculs du béton armé</i>	19
<i>Tableau 2: Les charges permanentes</i>	22
<i>Tableau 3: Les charges permanentes (TVS)</i>	25
<i>Tableau 4: Les charges permanentes (TVI)</i>	29
<i>Tableau 5: Coût du toit vert extensif</i>	40
<i>Tableau 6: Coût du toit vert semi-intensif</i>	40
<i>Tableau 7: Coût du toit vert intensif</i>	40

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1: les étapes du mémoire</i>	5
<i>Figure 2: Les différentes couches d'un toit vert (source : www.batireco.fr)</i>	6
<i>Figure 3: Les différents types de cultures (source : www.garden-deco.fr)</i>	8
<i>Figure 4: Toiture jardin (source : www.wikipedia.org)</i>	8
<i>Figure 5: Toiture verte intensive (source: "Chicago City-Hall" www.toiturejardin.in)</i>	11
<i>Figure 6: Toiture semi-intensive aménagée</i>	12
<i>Figure 7: toiture verte semi-intensive</i>	12
<i>Figure 8: Eléments drainants à réserve d'eau</i>	13
<i>Figure 9: Toiture verte extensive (source : www.aujardin.info)</i>	14
<i>Figure 10: plantes grasses pour les toitures vertes extensives ou les toitures jardin</i>	16
<i>Figure 11: Modélisation de la toiture</i>	19
<i>Figure 12: Plan de toiture verte extensive</i>	20
<i>Figure 13: Coupe de la toiture verte extensive en partie courante</i>	21
<i>Figure 14: Plan de la toiture verte semi-intensive</i>	23
<i>Figure 15: Coupe toiture verte semi-intensive en partie courante</i>	24
<i>Figure 16: Plan de la toiture verte intensive</i>	26
<i>Figure 17: Coupe transversale de la toiture jardin</i>	28
<i>Figure 18: Dispositif de séparation (perspective et coupe)</i>	30
<i>Figure 19: Entrées des eaux pluviales</i>	31
<i>Figure 20: Ponts thermiques par les dalles</i>	32
<i>Figure 21: Pont thermique par dalle non protégée</i>	32
<i>Figure 22: Rupture par rupteurs de pont thermique</i>	33
<i>Figure 23: réduction des surfaces de contact</i>	33
<i>Figure 24: Histogramme des besoins en climatisation</i>	34
<i>Figure 25: Courbe de simulation avec COMFIE PLEIADES</i>	35
<i>Figure 26: Biodiversité de la flore (source : divergetoit.net)</i>	39

INTRODUCTION

Qu'il soit utilisé comme un logement, un bureau ou une usine, le bâtiment classique consomme de l'énergie pour son chauffage et sa climatisation. Dans un monde où l'énergie est un bien très précieux il s'avère indispensable de penser à la construction de bâtiments durables : des éco-bâtiments. Avec l'éco-bâtiment, on passe d'un bâtiment coûteux à un bâtiment consommation très modérée par la réduction de sa consommation en énergie, l'utilisation de matériaux locaux disponibles et une meilleure sauvegarde de l'environnement...

Les effets du changement climatique amènent de plus en plus les populations à trouver d'autres méthodes afin de s'en prémunir. Ainsi donc, instinctivement, celles-ci ont penché pour le chauffage et la climatisation qui se trouve être très énergétivore. Dans un bâtiment non-isolé, les sources de d'échanges thermiques sont, en règle générale⁵, les suivantes :

- 30% par les toitures
- 13% par les portes et les fenêtres
- 16% par les murs
- 16% par les sols
- 20% par les ventilations
- 5% par les ponts thermiques

Au vu de ces valeurs, il paraît donc impérieux de trouver des voies et moyens pour la réduction de ses gains de chaleur. C'est ainsi que les toitures vertes se sont développées et ont pris de l'ampleur dans les campagnes comme dans les villes des pays développés. En Afrique, particulièrement en Afrique occidentale, la toiture verte sur les bâtiments urbains est un concept complètement nouveau. Il consiste à combiner la dalle de toiture à un complexe végétal afin de lui conférer une meilleure isolation (thermique et acoustique) et un confort meilleur.

De longues études ont été menées sur la végétalisation des toitures ailleurs dans le monde (Amérique, Europe, Asie, Australie) mais en Afrique, particulièrement en Afrique occidentale, elles restent inexistantes. L'objectif de ce mémoire est donc d'étudier l'impact d'une toiture verte sur la température intérieure du bâtiment en Afrique subsaharienne car on s'aperçoit qu'il est difficile de transposer une technologie mise au point à partir des conditions climatiques

⁵ Source : RT 2005 (Règlementation thermique construction maison)

spécifiques d'une région à l'autre. Un projet local nommé NIWANGO⁶, déjà sur pieds, prévoit de mettre en place une toiture verte sur un éco-bâtiments : un bâtiment bioclimatique R+7 muni de deux niveaux de sous-sol. Un bâtiment pour lequel l'enveloppe sera étudiée minutieusement afin de réduire au maximum les gains de chaleur et réduire ainsi les besoins en climatisation.

Pour se faire, notre travail s'articulera sur les étapes suivantes :

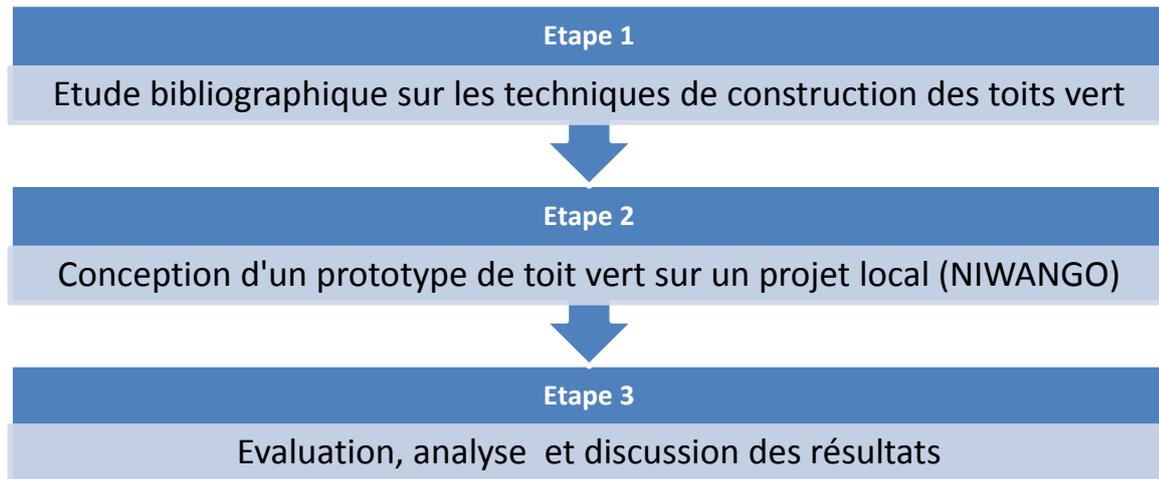


Figure 1: les étapes du mémoire

⁶ Propriété de M P. ABADIE

Chapitre 1 : Généralités

I- Historique

Les toits verts ne constituent pas un nouveau phénomène. Il s'agit d'une méthode de construction que de nombreuses communautés ont adoptée depuis des centaines et même des milliers d'années pour l'excellente qualité isolatrice des couches de terre et de végétation (gazon). Dans les climats froids de l'Islande et de la Scandinavie, les toits de gazon contribuent à garder les immeubles au chaud, alors que dans les climats chauds comme celui de la Tanzanie et même en Afrique de l'Ouest, dans les zones rurales (sur les habitats traditionnels en banco) ils contribuent à les garder au frais. Les premiers exemples de toits verts au Canada remontent à l'époque des Vikings, ce que les colonisateurs français ont imité, dans les provinces de Terre-Neuve et de Nouvelle-Écosse.

II- Concept

Le toit vert (toit végétal, ou encore toiture végétalisée) est un concept de toiture utilisant de la terre et des végétaux en remplacement de la tuile ou des tôles. Le mélange de terre et de végétaux enracinés sur les toits permettrait de réaliser des toitures bien isolées thermiquement et phoniquement, étanches à l'air et à l'eau, résistantes au vent et au feu (ralentit sa propagation surtout quand le substrat est saturé d'eau). Le concept de toiture végétalisée est souvent utilisé pour la construction des bâtiments durables ou de type HQE. Tout éco-toit, qu'il soit plat ou à pente, est conçu au-dessus d'un substrat végétalisé. C'est ce support de culture qui va assurer l'épanouissement des plantes.



Figure 2: Les différentes couches d'un toit vert (source : www.batireco.fr)

Un toit vert ou toit végétal est constitué essentiellement de cinq composantes. En partant du support de toit, on retrouve :

- La **structure portante** : En béton, acier ou bois (ces deux derniers uniquement pour les toitures à végétation extensive et semi-intensive) elle doit supporter le poids de l'installation prévue qui peut doubler lorsqu'elle est gorgée d'eau en cas de pluie;
- une **couche d'étanchéité** : Une barrière anti racines et une membrane d'étanchéité séparent le système du toit vivant du bâtiment isolé qui se trouve en dessous ;
- une **couche éventuelle de drainage et de filtration** : En cas d'excédent d'eau, une couche de galets la filtre puis, les réservoirs s'il en existe se remplissent et enfin elle se déverse dans les canalisations d'assainissement. Pendant les périodes sèches, l'eau stockée remonte vers les racines ;
- **un substrat de croissance** : La terre végétale naturelle déjà trop lourde le devient encore plus quand elle se gorge d'eau (majoré à 75%). Les architectes des toits verts utilisent donc un substrat. Le substrat va permettre aux plantes de se développer, d'ancrer leurs racines et de retenir l'eau. Les matériaux utilisés sont généralement des mélanges de terre ou de compost végétal mélangé à des matières minérales ;
- une **couche végétale** : On peut rechercher un aspect engazonné, de type prairie, et même souvent un aspect de jardin doté de buissons. Pour les premiers, on plantera surtout des plantes succulentes, de type sedum et de plantes adaptées aux milieux secs. Les sédums stockent l'eau, absorbent les pluies qui ruisselleraient sur un toit plat ordinaire.

III- Etudes des techniques de construction

L'épaisseur du substrat (conditionnée par les possibilités de charge de la toiture) et le degré d'arrosage souhaité permettra de choisir entre trois types de toitures. On choisira ainsi entre une végétation de type extensive, semi-intensive et intensive.

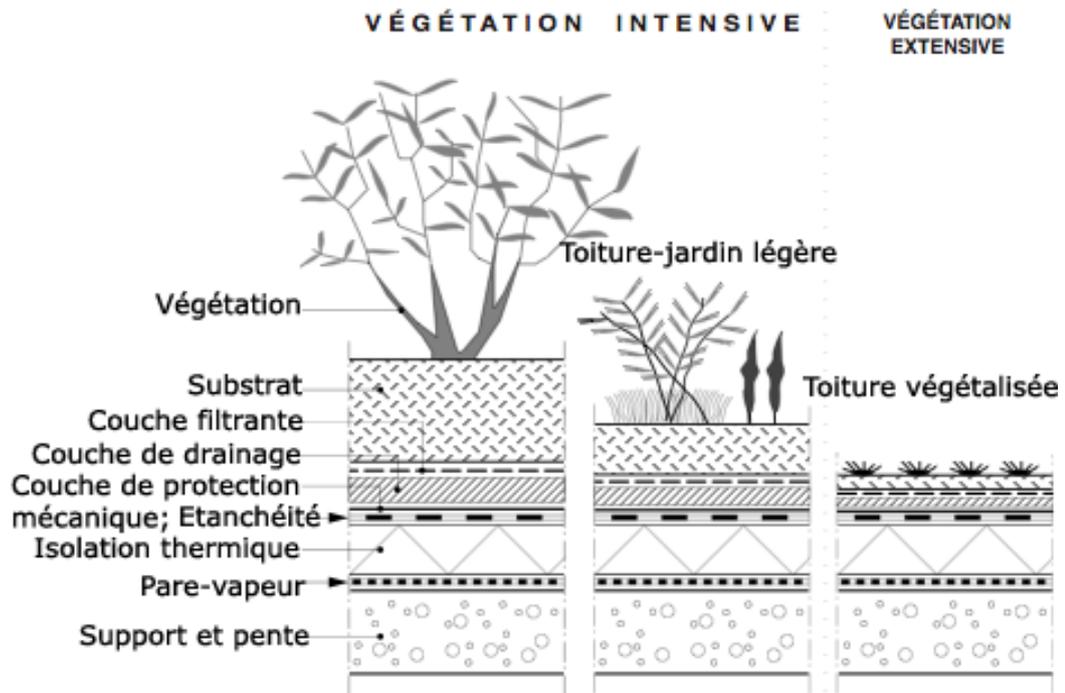


Figure 3: Les différents types de cultures (source : www.garden-deco.fr)

1. Les toitures vertes intensives (toiture jardin)



Figure 4: Toiture jardin (source : www.wikipedia.org)

Une *toiture verte intensive* ou encore *toiture jardin* est en fait un jardin de toiture, ou une terrasse comparable à un jardin ordinaire des points de vue de son aspect et de son usage. La végétation y a un enracinement plutôt profond et est composée de plantes fleurissantes ou d'herbes, de buissons et même parfois d'arbustes. On peut s'y promener et y poser des tables.

La plantation intensive est réalisée dans des profondeurs pouvant atteindre 1 mètre (dans le cas de plantations de petits arbres). Ces toitures demandent un entretien relativement intensif (d'où le nom 'toiture verte intensive') selon le type de végétation, il faudra tailler, tondre ou désherber. Elle doit être dotée d'un système d'arrosage de préférence automatique afin d'assurer un développement normal des végétaux exigeants.

Ce type de culture nécessite une bonne étanchéité et est mal adaptée aux toits à forte pente.

Il y a aussi l'aspect financier : la toiture jardin, du fait de sa complexité, a un cout élevé. D'après « éco-végétal » le prix va souvent jusqu'à 2 à 3 fois plus cher qu'un toit normal (dalle de 20 cm)

a. La végétation

Comme son nom l'indique, on y pratique une culture intensive. En raison de la profondeur supérieure du sol, il existe une grande diversité dans le choix des plantes selon le climat, un choix presque illimité: des mousses aux arbres en passant par les gazons, les herbacée et les arbustes. Les types de plantes utilisées : les feuillus, les plantes grimpantes, les conifères, les plantes en touffes ou à bulbes, les fleurs d'été, les plantes herbacées.

Cette panoplie permet de créer un espace très attrayant et accessible mais implique la nécessité de systèmes d'irrigation d'où la consommation d'énergie, d'eau et de matériaux

b. Le substrat de croissance

Le substrat de croissance, dans le cas d'une toiture jardin se compose principalement de terre⁷ à laquelle s'ajoutent d'autres composants. Sa profondeur oscille entre 30 et 60 cm (mais peut aussi dépasser le mètre) et son poids saturé d'eau, entre 480 et 1600 kg/m².

Sa composition est généralement faite de terre, de compost végétal de feuilles ou d'écorces mélangés à des agrégats de pierres légères et absorbantes (pierre ponce, matériau expansé, éventuellement récupération de déchets de tuiles broyés...). Ses capacités de rétention en eau, de perméabilité, de résistance à l'érosion, de densité conditionnent le bon fonctionnement du système.

Pour une toiture verte intensive, la terre de jardin sert de base au substrat et doit être améliorée par l'ajout d'éléments organiques, d'éléments minéraux et d'éléments chimiques, dans ce cas on atteindra une épaisseur de substrat minimale de 30cm.

Composition de base (variable selon substrat retenue)

Terre cuite recyclée3 - 16 mm

⁷ Dans le cas de la toiture intensive le substrat léger ne permet pas aux arbustes et petits arbres de bien ancrer leurs racines

Pouzzolane / Argile expansé.....	3 - 8 mm
Sable de terre cuite / Sable de ponce.....	0 - 4 mm
Scories de charbon.....	0 - 16 mm
Compost / Compost d'écorce/ Tourbe	0 - 15 mm

c. La couche de drainage

La couche drainante assure l'évacuation de l'excédant d'eau, évitant aussi l'asphyxie des racines. La couche de drainage est une couche de matière poreuse synthétique (très souvent polyéthylène gaufré) ou éventuellement des agrégats minéraux poreux (roches volcaniques, argiles ou schistes expansés, concassés ou non)

Les caractéristiques requises pour les matériaux de drainage sont les suivantes :

- Perméabilité minimale de 0,3 cm/s (180 mm/min) ; pour les géotextiles, cette valeur peut être mesurée suivant la norme NF EN ISO 11058 (VH50) ;
- Stabilité structurale : vu son importance, cette couche ne doit en aucun cas s'ébranler ou s'effondrer;
- Epaisseur minimale: elle doit être supérieure à la hauteur maximale des flaches d'eau observée sur la toiture
- Le cas échéant nécessité d'une rétention d'eau complémentaire.

Afin que cette membrane ne soit pas obstruée par le substrat, on met un filtre (géotextile non-tissé) qui évite le colmatage de la couche de drainage avec les particules du substrat. Ce filtre retient les particules et laisse passer l'eau.

d. Le complexe d'isolation-étanchéité

Le complexe d'isolation-étanchéité est composé, comme son nom l'indique, d'une couche d'étanchéité (souvent anti-racine) et, si besoin est, d'une couche d'isolation thermique. Comme pour toute toiture, elle est essentielle. Pour la toiture intensive elle devient indispensable. L'importance de la couche d'étanchéité ne doit jamais être sous-estimée. La toiture verte présente l'inconvénient qu'en cas de fuite l'étanchéité n'est pas accessible, le plus grand soin doit donc être apporté à la réalisation de celle-ci. Il faut que la toiture soit totalement étanche avant de venir y poser de la végétation. La membrane d'étanchéité doit empêcher la pénétration trop profonde des racines.

Les membranes bitumineuses (traitées avec adjuvants) sont les plus récurrentes, mais dans leurs versions « anti-racine » uniquement : elles offrent une épaisseur plus importante que leurs sœurs synthétiques et présentent moins de problème de recyclage. L'application en deux couches d'une membrane anti-racine est recommandée.

Il est aussi possible de mettre en œuvre des étanchéités en polyoléfine et en PVC.

Il est conseillé de renforcer l'isolation du toit en fixant des panneaux d'isolation avant d'installer les différentes couches qui composent la toiture végétale. L'option toiture chaude est recommandée, c'est à dire que l'isolant se trouve entre le support et l'étanchéité. L'isolant doit posséder une résistance à la compression adaptée à la charge permanente de la toiture. On utilisera dans ce type de toiture des matériaux d'isolation de classe de compressibilité P4⁸.

e. **La structure portante**

Elle est construite uniquement en béton armé. Une végétation arborée nécessite une dalle surdimensionnée, selon le type d'arbre et le poids de terre que l'on voudra y disposer. Ce type de culture est réservé aux constructions neuves en raison de la surcharge considérable à prendre en compte. La toiture intensive doit être plate avec une pente comprise entre 2 et 5% afin de favoriser l'écoulement des eaux et ainsi réduire l'épaisseur de la couche drainante et donc le poids de l'installation.

Le système des toitures jardin (toits verts intensifs) est un système très élaboré et très complexe du fait des contraintes massiques élevées. Le substrat, à saturation, pèse très lourd suivant l'épaisseur. Il doit donc être le plus léger possible afin de réduire les contraintes appliquées sur la structure portante. Sa conception et sa mise en place tient compte des normes des Dossiers Techniques Unifiés (DTU).



Figure 5: Toiture verte intensive (source: "Chicago City-Hall" www.toiturejardin.in)

⁸ Classe de compressibilité des panneaux d'isolation P3 ou P4 caractérise le comportement (réduction de l'épaisseur instantanée) sous l'effet de la charge qui lui est appliquée.

2. Les toitures vertes semi-intensives

Ces toitures diffèrent des toitures vertes intensives par leur épaisseur de substrat inférieure à 30 cm (et donc aussi par leurs charges) excluant la plantation d'arbustes au système racinaire important.

Dans ce cas-ci, la réalisation en rénovation peut-être envisagée, la pente de la toiture est très souvent comprise entre 1 et 15°.

Leurs végétaux sont de petites tailles (ou de taille moyenne) vu l'épaisseur du substrat. Il est possible de les rendre accessibles et praticables à travers quelques aménagements : Création de chemins, terrasses, agrémentées de reliefs, et de mobiliers,... Ces toitures peuvent être appropriées à la détente privée ou collective



Figure 6: Toiture semi-intensive aménagée

Elles nécessitent souvent un toit adapté ainsi qu'un renforcement de structure du bâtiment. L'implantation se fait principalement sur des toitures plates, les toitures inclinées recouvertes de gazon peuvent cependant aller jusqu'à une pente de 25°.

a. La couche végétale

Les végétaux utilisés sont moins volumineux et demandent moins d'entretien. Les végétaux sont du gazon, des herbacées (Sedums, vivaces, graminées), arbrisseaux, des arbustes et plantes basses mais pas d'arbres ni de grands arbustes



Figure 7: toiture verte semi-intensive

b. Le substrat de croissance

Le substrat de croissance des toitures vertes semi-intensives se démarque par son épaisseur plutôt moyenne, comprise entre 12 et 30 cm. Il est de la même composition de base que celui des toitures vertes intensives mais contient un minimum de terre. Il est composé de compost, de matières organiques et de minéraux. Il doit en outre être poreux et faciliter l'absorption de l'eau et une aération adéquate du sol de culture.

c. La couche de drainage

Elle devient facultative pour une pente supérieure à 5 %. Différents types de matériaux peuvent assurer la fonction drainage. Celle-ci peut être associée à une fonction de rétention d'eau :

- Agrégats minéraux poreux : roches volcaniques, argiles ou schistes expansés, concassés ou non,
- Eléments alvéolaires et poreux : panneaux à base de mousses plastiques,
- Géotextiles et composites spécifiques pour l'utilisation en drainage,
- Eléments drainants à réserve d'eau : ils assurent la rétention des eaux de pluie de manière homogène sous toute la surface de la toiture végétalisée, ainsi que le drainage des eaux excédentaires.

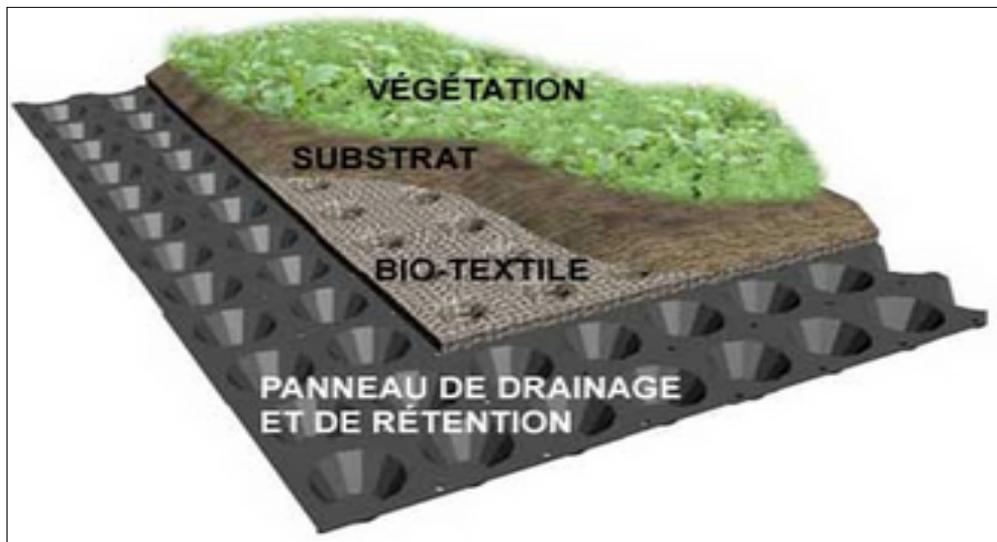


Figure 8: Eléments drainants à réserve d'eau

Une couche filtrante est nécessaire. Elle retient les particules fines du substrat et s'interpose entre d'une part le substrat et la couche drainante pour éviter son colmatage, et d'autres parts le substrat et le dispositif de séparation pour éviter le passage des fines au travers des zones ajourées.

La couche filtrante peut avoir une qualité de barrière aux racines. Mais elle est à mettre en œuvre même en l'absence de couche drainante.

d. Le complexe d'isolation-étanchéité

Il comporte un revêtement d'étanchéité résistant à la pénétration des racines placé sur ou sous isolant thermique éventuel. Les revêtements d'étanchéité sont posés soit en adhérence totale, soit en semi-indépendante, soit fixés mécaniquement. Ce complexe doit résister aux efforts dus à la dépression du vent quel que soit le taux de couverture de la végétalisation.

e. La structure portante

Elle peut être réalisée en maçonnerie (Béton armé), en béton cellulaire auto-enclavé armé (avec pente minimale de 1 %), en tôles d'aciers nervurés (avec pente minimale de 3 %) ou en bois et panneaux dérivés du bois (avec pente minimale de 3 %).

3. Les toitures vertes extensives



Figure 9: Toiture verte extensive (source : www.aujardin.info)

La toiture verte extensive a une profondeur d'enracinement réduite et se compare plutôt à la végétation d'une prairie rocailleuse ou sèche. Les toitures vertes extensives sont les plus répandues. Elles le doivent à la technique utilisant un complexe de culture élaboré de faible épaisseur et de faible poids, permettant la réalisation d'un couvert végétal, constitué de plantes

d'origine horticole ou sauvage. L'entretien est réduit au minimum ; l'eau de pluie, en général suffisante car pouvant être stockée dans des réservoirs aménagés, peut être complétée par un arrosage d'appoint en fonction des contraintes climatiques. On y trouve des plantes de type mousses, sedums, plantes vivaces (durent des années et sont très résistantes). Ces plantes supportent la sécheresse et le froid, leur feuillage persistant varie de couleur selon les saisons.

Ces toitures ne demandent pas de construction sous-jacente spécifique et peuvent être posées sur des bâtiments existants, moyennant quelques adaptations minimales.

Les toitures extensives conviennent surtout aux toits plats, mais certaines techniques d'inclinaison permettent de les adapter aux toits en pente.

Les toitures vertes extensives ne devraient pas être accessibles, excepté pour le contrôle nécessaire. Il s'agit en réalité d'un 'toit à regarder' plutôt que d'un 'toit à utiliser' comme un jardin de toiture.

a. La couche végétale

Il s'agit d'un type de plantation sur substrat de faible épaisseur qu'on ne veut pas nécessairement arroser, sauf éventuellement en cas de sécheresse prolongée ou dans un climat à faible pluviométrie comme le climat sahélien. Cette plantation utilise surtout des couvre-sols très rustiques capables de supporter des sécheresses et qui prennent rapidement de l'expansion pour ombrager le sol et le stabiliser par leurs racines.

Les plantes à sélectionner sont naturellement résistantes aux conditions extrêmes rencontrées sur les toitures (ensoleillement intense, vent, sécheresse...) auto-régénérables, tapissantes pour constituer un tapis végétal permanent.

Le choix des végétaux doit tenir compte des valeurs climatiques locales et de l'exposition de la toiture. Pendant la phase chantier, l'arrosage est obligatoire pour permettre le démarrage de la végétation. Il est adapté à la technique retenue et aux conditions climatiques.

Les catégories de végétaux (horticoles ou sauvages) admises peuvent être des:

- plantes succulentes (type sedum),
- plantes vivaces (type œillet),
- plantes bulbeuses (type iris),
- graminées vivaces (type fétuque),
- plantes ligneuses à petit développement peuvent être adjointes selon l'effet désiré et le programme d'entretien accepté par le maître d'ouvrage.



Figure 10: plantes grasses pour les toitures vertes extensives ou les toitures jardin

b. Le substrat de croissance

La qualité du substrat est très importante, il faut qu'il soit léger, résistant à la compaction et doit aussi retenir l'eau. Le substrat est d'une épaisseur de 10 à 15 cm d'épaisseur. Il contiendra jusqu'à 70 % d'agréats poreux, en volume, afin de conserver le plus d'eau possible. Les matériaux admis peuvent être des mélanges de matières minérales et organiques (roches volcaniques, tourbes,...). D'autres couches de culture (sur base de matériaux synthétiques ou autres) peuvent être envisagées.

c. La couche de drainante

Elle est du même type que les précédents. Elles peuvent aussi être munies d'un système de rétention et de stockage d'est eaux de pluies, surtout pour les zones climatiques à longues périodes sèches.

d. Le complexe d'isolation-étanchéité

Les toitures vertes extensives offrent une faible amélioration du confort thermique vis-à-vis des précédents types. Il serait cependant intéressant d'y placer des panneaux d'isolation thermique afin de le renforcer.

Un risque de perforation de l'étanchéité reste faible mais subsiste cependant. Il serait donc indispensable de placer une couche d'étanchéité afin de se prémunir de toute perforation.

e. La structure portante

On peut concevoir de poser une toiture verte extensive sur tout type de bâtiment, que le toit soit en béton, en acier ou en bois. Le toit peut être plat ou incliné à maximum 35°, il est également recommandé de construire des terrasses avec une pente de 2 % afin de favoriser l'écoulement des eaux et ainsi réduire l'épaisseur de la couche drainante et donc le poids de l'installation.

IV- Comparatif des différents types de toiture en zone tropicale sèche

Les toits verts extensifs sont faciles à mettre en œuvre. Les végétaux sont essentiellement composés de graminées et vivaces ne supportant pas tous le piétinement. Par conséquent la toiture extensive reste impraticable sauf si elle est spécialement aménagée pour. On peut donc y aménager des allées permettant d'y avoir accès mais les surfaces végétales restent inaccessibles. Par contre, les toits verts intensifs quant à eux sont très complexes dans leur mise en œuvre. Ce sont de véritables jardins suspendus, de vrais biotopes, elles sont totalement accessibles et praticables comme tout jardin ordinaire. Les toits semi-intensifs sont à mi chemin entre les deux précédents. Ces toits sont accessibles si elles sont aménagées pour, car ce sont des végétaux plus robustes que ceux des toits extensifs.

Pour une construction neuve tout type de toiture peut être envisagé. Il convient, pour les toitures intensives et semi-intensives de procéder à une étude minutieuse de la structure portante car elle devra supporter des charges colossales (pouvant, selon l'épaisseur du complexe aller de 2 à 3 fois le poids d'une toiture plate en BA de 20cm). En rénovation, le toit pourra accueillir une végétation extensive mais difficilement une végétalisation semi-intensive. Très souvent il est impossible d'y aménager des cultures intensives.

Les toits verts intensifs offrent une meilleure isolation acoustique et un confort thermique inégalable mais demande un entretien assidu et important. Les coûts de construction, de gestion et d'entretien font de la toiture verte intensive un ouvrage coûteux et onéreux.

En zone tropicale sèche, comme son nom l'indique, est marquée par de longues périodes sèches (allant de 8 à 9 mois). Le problème crucial d'irrigation se pose. Ainsi donc, il est nécessaire de faire un choix judicieux des plantes (préférer les plantes grasses et vivaces résistant à la sécheresse aux arbres et arbustes), mettre en place un procédé de rétention et de stockage des eaux infiltrées et aménager si besoin est un système complet d'arrosage.

Chapitre 2 : Conception et dimensionnement de toitures vertes : cas d'un bâtiment R+7

A- CONCEPTION

I. Analyse technique de la toiture

Les paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- **Localisation climatique de la toiture végétalisée : régime pluviométrique, intensité solaire, vent...pour l'apport en eau d'arrosage.**

3 types de région sont définis :

ZONE 1 : Drainage avec ou sans réserve d'eau

ZONE 2 : Conditions capricieuses, drainage avec réserve d'eau obligatoire

ZONE 3 : Conditions rudes, drainage avec réserve d'eau obligatoire, épaisseur de substrat augmentée de 20%, munie d'un système d'arrosage automatique obligatoire.

La zone de projet sera située dans la **ZONE 3** considérée comme la plus rude et nécessitant **un arrosage obligatoire**.

II. Disposition de la toiture végétalisée dans la construction et l'environnement

Il s'agit ici de la configuration de la toiture dans son environnement :

- Zone urbaine localisée en plein centre ne subissant aucune contrainte particulière excepté l'effet d'îlot thermique urbain ;
- Visibilité de la toiture végétalisée : vu la hauteur du bâtiment (une trentaine de mètres) la toiture ne dispose pas d'un angle de vue appréciable) ;
- Toiture végétalisée accessible que pour l'entretien.

III. Dispositions nécessaires

Ce sont les différents ouvrages et dispositifs pratiques indispensables à la toiture :

- **Moyen d'accès** : des escaliers faciliteront un accès aisé à la toiture pour l'entretien
- **Point(s) d'eau en toiture** : l'eau sera acheminée par des conduites reliées à une pompe
- **Les chemins de circulation** : les zones stériles seront aménagées de sorte à faciliter la circulation des agents d'entretien. Il sera aussi aménagé d'éventuelles allées facilitant la circulation et permettant d'atteindre les zones stériles.
- **Délimitation des zones techniques** : Il est prévu des émergences d'antennes paraboliques et hertziennes.

IV. Modélisation de la toiture

Pour une meilleure souplesse dans le calcul du toit du bâtiment, il a été subdivisé en quatre (4) dalles.

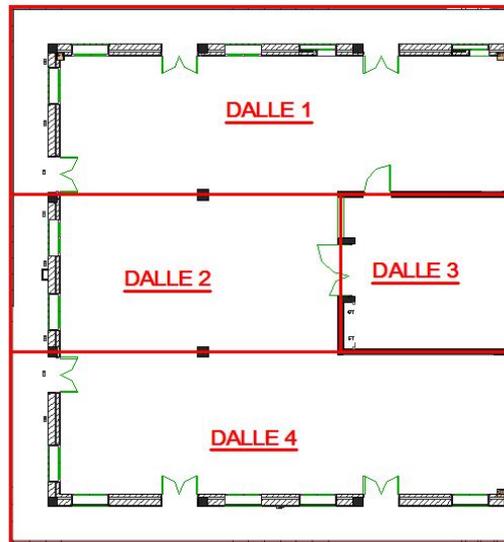


Figure 11: Modélisation de la toiture

B. DIMENSIONNEMENTS DES DIFFERENTS TYPES DE TOITURE

Les hypothèses de calcul, et les caractéristiques des matériaux utilisés sont les suivants :

Tableau 1: Hypothèses de calculs du béton armé

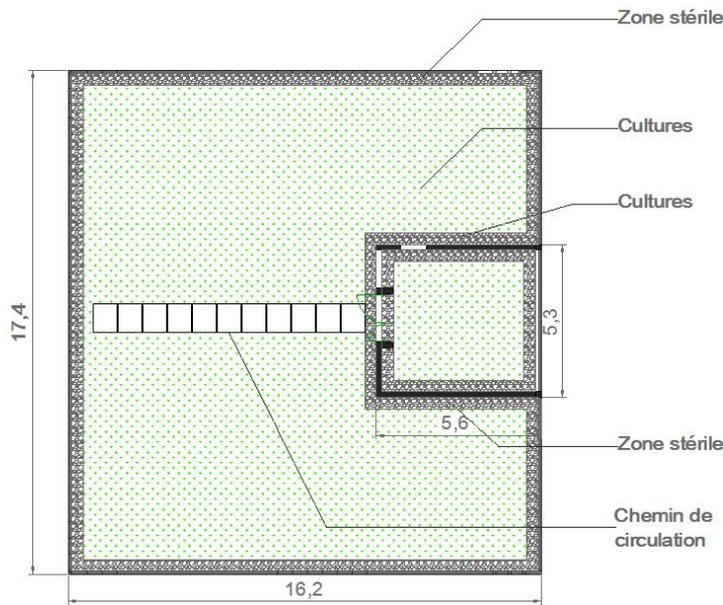
Matériaux utilisés		
Calcul suivant BAEL 91 mod. 99		
Acier	Fe(MPa)	400
	gamma e	1,15
Béton	fc28(MPa)	25
	gamma b	1,5
	fbu	14,17
	θ	1
	ft28	2,1
	fissuration	Préjudiciable

Justifications :

- Le choix du type d'acier (**Fe 400**) a été fait compte tenu sa disponibilité sur le marché.
- Le choix de la résistance en compression à 28 jours (**Fc28**) a été fait compte tenu des charges élevées qui seront appliquées sur la structure
- La fissuration a été considérée préjudiciable du fait de la haute altitude, de la condensation de l'humidité de l'air et pour aller dans le sens de la sécurité.

I. Analyse et dimensionnement de la toiture verte extensive

1. Forme géométrique de la toiture



- ❖ FORMES :
 - rectangulaires
- ❖ GRAND TOIT
 - Longueur : 17.4m
 - Largeur : 16.2m
 - Hauteur : 28.5m
- ❖ PETIT TOIT
 - Longueur : 5.6m
 - Largeur : 5.3m
 - Hauteur : 30.8m
- ❖ CHEMINS
 - Longueur : 10m
 - Largeur : 1m
- ❖ ZONE STERILE
 - Largeur : 0,4 à 1m

Figure 12: Plan de toiture verte extensive

2. Éléments de la toiture

La conception de la toiture verte extensive a donné les dimensions et les caractéristiques suivantes :

❖ Le complexe végétal

- La couche végétale (10 DaN/m^2): formée d'un semis, par graines, de vivaces et de graminées tapissantes;
- Le substrat de croissance (12cm d'épaisseur ; 1400 DaN/m^3) : substrat monocouche Végétoit MS.
- Un filtre anti-racines : des feuilles en rouleau de Géotextile non-tissé en polypropylène comprimé et rigidifié à la chaleur ou Géotextile en polyéthylène et polypropylène rigidifié thermiquement.
- Une couche de drainage (12cm à 30% de vides ; 2700 DaN/m^3) constituée d'un agrégat de roches cristallines (granite ou quartz).
- Un artifice de rétention des eaux constituée par une grille munie d'alvéoles carrée de 10cm de côtés et d'une hauteur de 5cm,
- Une forme de pente de 2% constitué par un mortier en béton.

❖ Le complexe d'étanchéité

- La couche d'étanchéité à base d'asphalte (Face-alu).

- La structure portante (20cm) constituée d'une dalle en maçonnerie conforme aux normes DTU de la série 43.1 (Réf. NF P 84-204).

❖ **Les équipements divers**

- Les chemins de circulation : formés par des alignements de dalles préfabriquées.
- Emergences d'antennes : placées sur le toit de la cage à escaliers
- Les zones stériles : à base d'agrégats de roches cristallines de même composition que le substrat de croissance.
- Les garde-corps de sécurité : constitués par les rebords en maçonnerie et des barres de fer

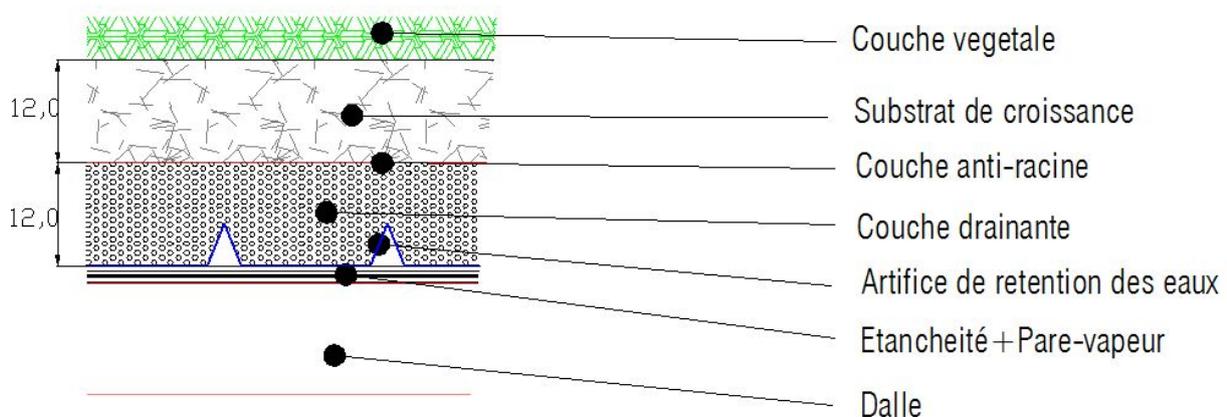


Figure 13: Coupe de la toiture verte extensive en partie courante

3. Les charges à prendre en compte⁹

❖ **Les charges permanentes**

Les charges permanentes sont les poids propres des éléments regroupés dans le tableau suivant:

ELEMENTS		CHARGES RELATIVES¹⁰	CHARGE REELES (DaN/m²)
Permanent	complexe végétal		
	Végétalisation	10 DaN/m ²	10
	Substrat	1400 DaN/m ³	168
	filtre anti-racine	1 DaN/m ²	1
	couche de drainage	2700 DaN/m ³	247
	artifice de rétention des eaux	10 DaN/m ²	10
	Complexe d'isolation/étanchéité		
couche d'étanchéité	1 DaN/m ²	1	

⁹ D'après le DTU 43.1 CCT

¹⁰ Cahier de prescriptions de poses ECOVEGETAL

	Forme de pente	2%	275
	Structure portante	2500 DaN/m ³	500
	Charges forfaitaires		
	charges forfaitaires	15 DaN/m ²	15
	Charges équipements		
	chemins de circulation	2500 DaN/m ³	100
	Zones stériles	1400 DaN/m ³	252
	Rebords	2500 DaN/m ³	513
	Garde-corps		10

Tableau 2: Les charges permanentes

❖ **Les charges climatiques**

Ce sont les charges descendantes (dues à la pluie) et les charges ascendantes (dues au vent). Ces dernières ont une valeur de **57 DaN/m²**

C'est les charges climatiques descendantes (pluies) et ascendantes (vents).

❖ **Les charges d'exploitation**

Pour les toitures végétalisées (toitures-terrasses techniques ou zones techniques) prendre la valeur¹¹ suivante: **150 DaN/m²**.

❖ **Les charges d'entretien**

La valeur des charges d'entretien à prendre en compte est de **100 DaN/m²**.

4. Dimensionnement de la structure portante (Voir détails de calculs en annexes)

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La dalle la plus sollicitée en travée : **dalle 3 (80.86 kN.m)** dalle située au dessus du la cage d'escaliers.

10HA16 par ml dans le sens le plus sollicité et **8 HA16** par ml dans le sens le moins sollicité.

- La dalle la plus sollicitée en appuis : **dalle 1 (54.82 kN.m)** dalle située à la sortie des escaliers d'accès.

6 HA 16 par ml dans le sens le plus sollicité et **7 HA 12** dans le sens le moins sollicité.

¹¹ D'après le DTU 43.1 CCT

II. Analyse et dimensionnement de la toiture verte semi-intensive

1. Forme géométrique de la toiture

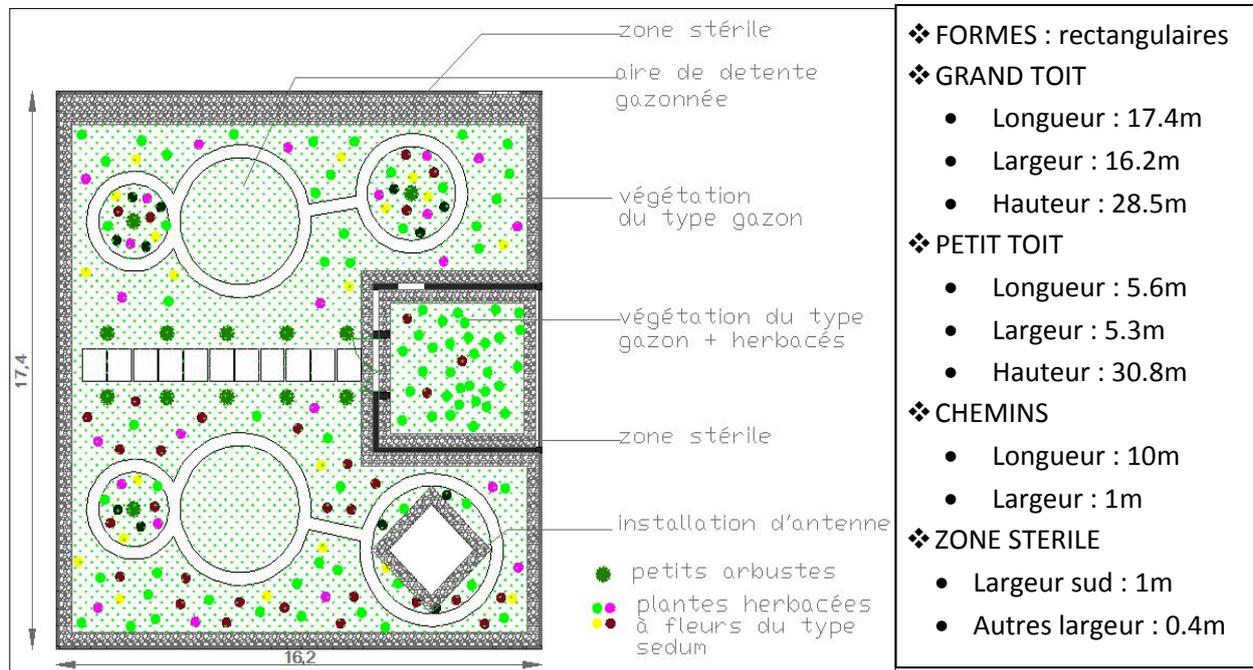


Figure 14: Plan de la toiture verte semi-intensive

2. Éléments de la toiture

La conception de la toiture verte extensive à donné les dimensions et les caractéristiques suivantes :

❖ Le complexe végétal

- La couche végétale (20DaN/m²): formée d'un semis, par graines, de vivaces et de graminées ; un mélange de plantes à fleurs et de petits arbustes.
- Le substrat de croissance (25cm d'épaisseur ; 1400 DaN/m³) : substrat monocouche Végétoit MS + un peu de terre.
- Un filtre anti-racine : des feuilles en rouleau de Géotextile non-tissé en polypropylène comprimé et rigidifié à la chaleur ou Géotextile en polyéthylène et polypropylène rigidifié thermiquement.
- Une couche de drainage (12cm à 30% de vides ; 2700 DaN/m³) constituée d'un agrégat de roches cristallines (granite ou quartz).
- Un artifice de rétention des eaux constituée par une grille munie d'alvéoles carrée de 10cm de cotés et d'une hauteur de 5cm.

❖ **Le complexe d'étanchéité**

- La couche d'étanchéité à base d'asphalte
- Une forme de pente de 2% constitué par un mortier en béton
- La structure portante (20cm) constituée d'une dalle en maçonnerie conforme aux normes DTU de la série 43.1 (Réf. NF P 84-204).

❖ **Les équipements divers**

- Les chemins de circulation : formés par des alignements de dalles préfabriquées.
- Emergences d'antennes : dalle préfabriquée de 2x2 m² de 10cm de hauteur
- Les zones stériles : à base d'agrégats de roches cristallines de même composition que le substrat de croissance.
- Les garde-corps de sécurité : constitués par les rebords en maçonnerie et des barres de fer

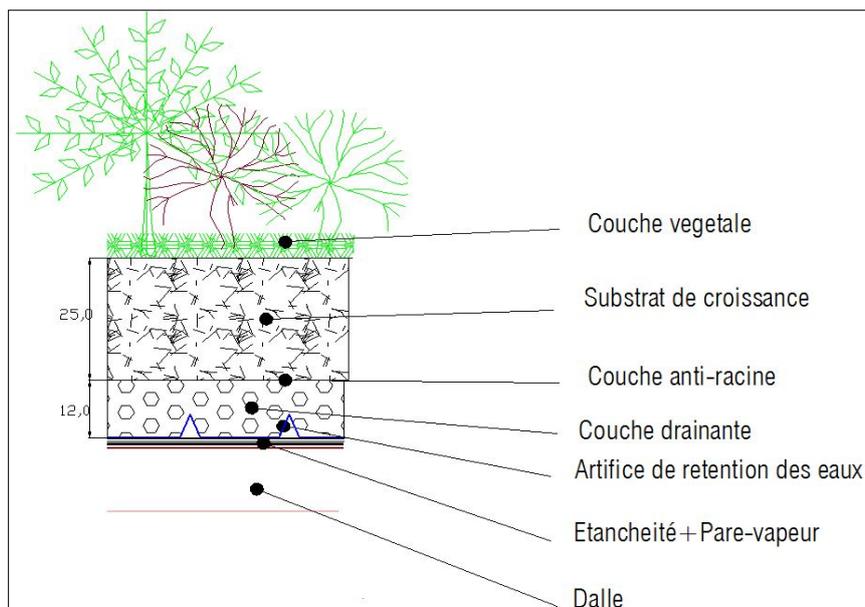


Figure 15: Coupe toiture verte semi-intensive en partie courante

3. Les charges à prendre en compte¹²

❖ Les charges permanentes

		<u>ELEMENTS</u>	<u>CHARGES RELATIVES</u>	<u>CHARGE REELES (DaN/m²)</u>
<i>Charges Permanentes</i>		complexe végétal		
		végétalisation	20 DaN/m ²	20
		Substrat	1480 DaN/m ³	370
		filtre anti-racine	1 DaN/m ²	1
		couche de drainage	2700 DaN/m ³	247
		artifice de rétention des eaux	10 DaN/m ²	10
		Complexe d'isolation/étanchéité		
		couche d'étanchéité	1 DaN/m ²	1
		Forme de pente	2%	275
		Structure portante	2500 DaN/m ³	500
		Charges forfaitaires		
		charges forfaitaires	15 DaN/m ²	15
		Charges équipements		
		chemins de circulation	2500 DaN/m ³	40
		Zones stériles	1400 DaN/m ³	520
		Rebords+écran	2500 DaN/m ³	513
		Emergence d'antennes	2500 DaN/m ³	250
	Garde-corps		25	

Tableau 3: Les charges permanentes (TVS)

❖ Les charges climatiques

Elles sont les charges descendantes (la pluie) et les charges ascendantes (le vent). Ces dernières on une valeur de **57 DaN/m²**

❖ Les charges d'exploitation

Pour les toitures végétalisées (toitures-végétalisées ou zones techniques) prendre la valeur suivante: **150 DaN/m²**.

❖ Les charges d'entretien

La valeur des charges d'entretien à prendre en compte est de **100 DaN/m²**.

¹² DTU 43.1 CCT

4. Dimensionnement de la structure portante (Voir détails de calculs en annexes)

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La dalle la plus sollicitée en travée : **dalle 3 (100.11 kN.m)** dalle située au dessus du local destiné à l'ascenseur.

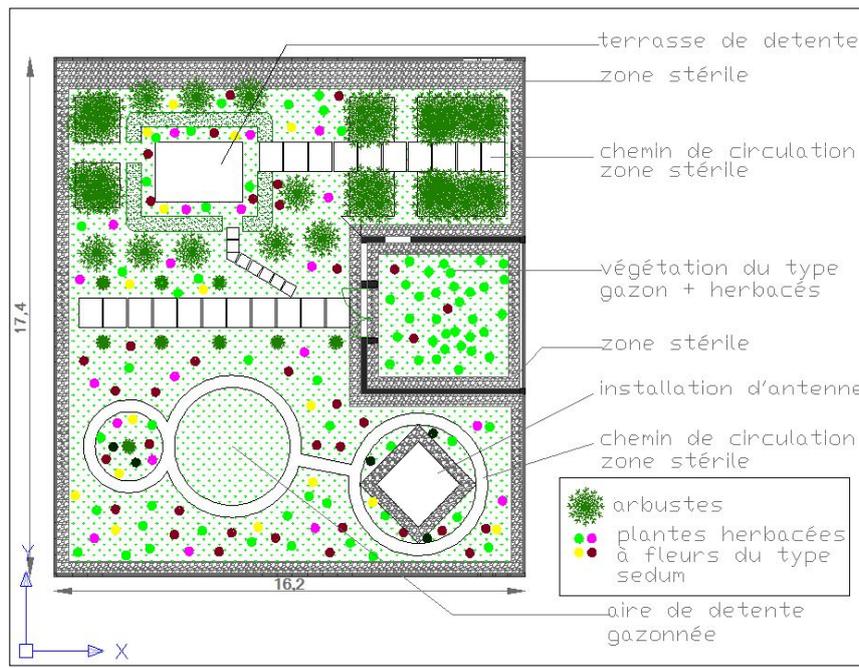
12HA 16 par ml dans le sens le plus sollicité et **10HA16** par ml dans le sens le moins sollicité.

- La zone la plus sollicitée en appuis : **dalle 1&4 (67.76 kN.m)** dalle située à la sortie des escaliers d'accès.

7HA 16 par ml dans le sens le plus sollicité et aussi **7HA 16** dans le sens le moins sollicité.

III. Analyse et dimensionnement de la toiture verte intensive

1. Forme géométrique de la toiture



- ❖ **FORMES** : rectangulaires
- ❖ **GRAND TOIT**
 - Longueur : 17.4m
 - Largeur : 16.2m
 - Hauteur : 28.5m
- ❖ **ZONE STERILE**
 - Largeur sud : 1m
 - Autres largeur : 0.4m
- ❖ **PETIT TOIT**
 - Longueur : 5.6m
 - Largeur : 5.3m
 - Hauteur : 30.8m
- ❖ **CHEMINS**
 - Dalles : 0.4*0.4 m²
 - Dalles : 1.0*0.8 m²

Figure 16: Plan de la toiture verte intensive

2. Eléments de la toiture

La conception de la toiture verte extensive à donné les dimensions et les caractéristiques suivantes :

❖ Le complexe végétal

- La couche végétale de pente 1% (60 DaN/m^2): formée d'un semis, par graines, de vivaces et de graminées ; un mélange de plantes à fleurs et d'arbustes.
- Le substrat de croissance (25cm en amont et 43cm en aval d'épaisseur) ; 1400 DaN/m^3) : substrat monocouche Végétoit MS mélangé à de la terre.
- Un filtre anti-racine : des feuilles en rouleau de Géotextile non-tissé en polypropylène comprimé et rigidifié à la chaleur ou Géotextile en polyéthylène et polypropylène rigidifié thermiquement.
- Une couche de drainage (20cm à 30% de vides ; 2700 DaN/m^3) constituée d'un agrégat de roches cristallines (granite ou quartz).
- Un artifice de rétention des eaux constitué d'une grille munie d'alvéoles carrée de 10cm de cotés et d'une hauteur de 12cm.

❖ Le complexe d'étanchéité

- La couche d'étanchéité à base d'asphalte
- Une forme de pente 3% en maçonnerie
- La structure portante (20cm) constituée d'une dalle en maçonnerie conforme aux normes DTU de la série 43.1 (Réf. NF P 84-204).

❖ Les équipements divers

- Les chemins de circulation : formés par des alignements de dalles préfabriquées.
- Terrasse de détente : dalle préfabriquée de $3 \times 2 \text{ m}^2$ de 10cm de hauteur
- Emergences d'antennes : dalle préfabriquée de $3 \times 2 \text{ m}^2$ de 10cm de hauteur
- Les zones stériles : à base d'agrégats de roches cristallines de même composition que le substrat de croissance.
- Les garde-corps de sécurité : constitués par les rebords en maçonnerie et des barres de fer

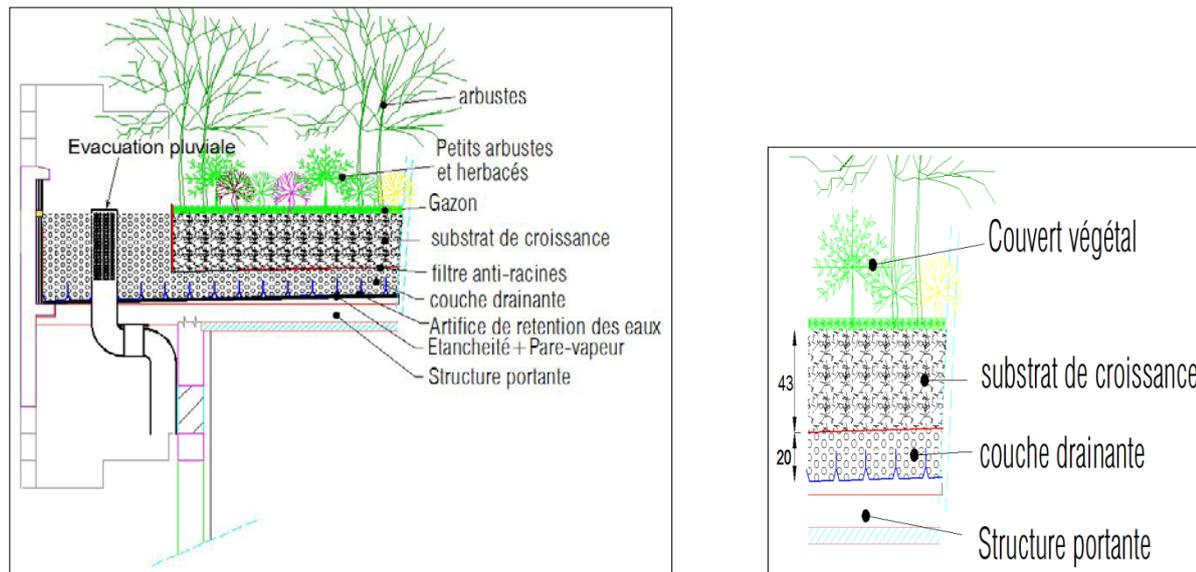


Figure 17: Coupe transversale de la toiture jardin

3. Les charges à prendre en compte¹³

❖ Les charges permanentes

		ELEMENTS	CHARGES RELATIVES	CHARGE REELES (DaN/m²)
Charges Permanentes	complexe végétal			
		végétalisation extensive	20 DaN/m ²	20
		arbustes (intensif)	60 DaN/m ²	60
		Substrat	1600 DaN/m ³	686
		filtre anti-racine	1 DaN/m ²	1
		couche de drainage	2700 DaN/m ³	540
		artifice de rétention des eaux	20 DaN/m ²	20
	Complexe d'isolation/étanchéité			
		couche d'étanchéité	1 DaN/m ²	1
		forme de pente	2%	275
		Structure portante	2500 DaN/m ³	500
	Charges forfaitaires			
		charges forfaitaires	15 DaN/m ²	15
	Charges équipements			
		chemins de circulation	2500 DaN/m ³	40
		Zones stériles	1400 DaN/m ³	520
	Terrasse de détente	2500 DaN/m ³	250	
	Emergence d'antenne	2500 DaN/m ³	250	
	Antennes	100 DaN/m ²	100	

¹³ DTU 43.1 CCT

	Rebords+écran	2500 DaN/m ³	513
	Garde-corps		25

Tableau 4: Les charges permanentes (TVI)

❖ **Les charges climatiques**

Elles sont les charges descendantes (la pluie) et les charges ascendantes (le vent). Ces dernières on une valeur de **57 DaN/m²**

❖ **Les charges d'exploitation**

Pour les toitures végétalisées (toitures-terrasses ou jardin privatif ou zones techniques) prendre la valeur suivante: **150 DaN/m²**.

❖ **Les charges d'entretien**

La valeur des charges d'entretien à prendre en compte est de **100 DaN/m²**.

4. Dimensionnement de la structure portante (Voir détails de calculs en annexes)

Les résultats obtenus sont les suivants :

- La dalle la plus sollicitée en travée : **dalle 2 (128.42 kN.m)** dalle située à la sortie de la cage d'escaliers dessus du local destiné à l'ascenseur.

11HA 20 par ml dans le sens le plus sollicité et **8HA 20** par ml dans le sens le moins sollicité.

- La zone la plus sollicitée en appuis : **dalle 1&4 (40.83 kN.m)** dalle située à la sortie des escaliers d'accès.

7HA 14 par ml dans le sens le plus sollicité et **5 HA 12** dans le sens le moins sollicité.

C. OUVRAGES PARTICULIERS

Les ouvrages particuliers sont les ouvrages connexes au complexe de culture. Ce sont entre autres : La zone stérile, les dispositifs de séparation, les relevés, les entrées eaux pluviales.

I. La zone stérile

La zone stérile est un espace aménagé sur la toiture, dont le but est de :

- Faciliter l'accès aux relevés d'étanchéité et aux évacuations pluviales,
- Permettre une hauteur des relevés

Elle n'est pas considérée comme une zone accessible, ni comme un chemin de circulation sauf aménagé préalablement.

La largeur de cette zone stérile est de 40 cm. Elle est constituée d'agrégats de roche magmatiques (granite, quartz) de même diamètre que ceux de la couche drainante.

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

II. Le dispositif de séparation

Le dispositif de séparation est un matériau séparant la zone stérile de la zone végétalisée

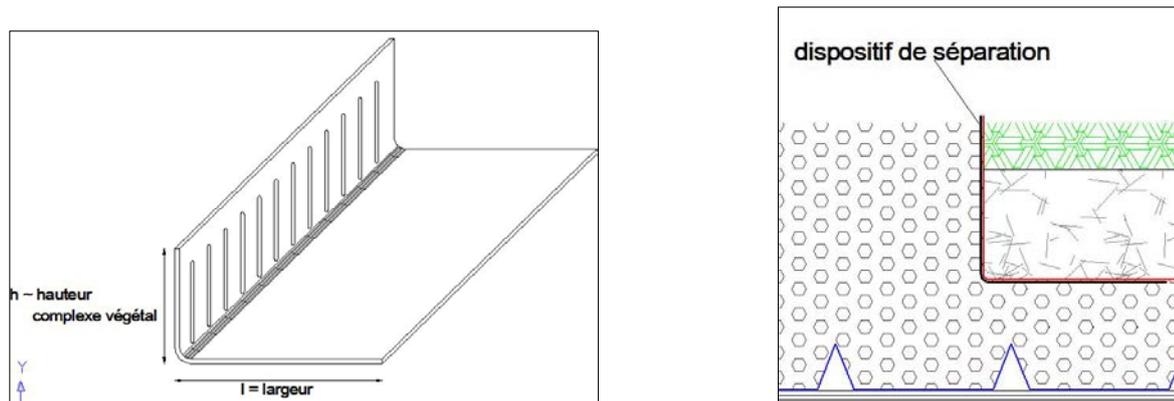


Figure 18: Dispositif de séparation (perspective et coupe)

Le matériau de séparation utilisé permet :

- de retenir la couche de culture ;
- le passage de l'eau vers la zone stérile et les canalisations d'évacuation des eaux pluviales

Il sert également de filtre retenant les particules du substrat de croissance.

III. Le système d'arrosage

Grâce à l'artifice de rétention des eaux, l'irrigation sera faite durant toute la saison sèche ; en saison de pluie c'est seulement lors des périodes de latence (un intervalle de pluie allant de 10 jours à 2 semaines).

La technique d'irrigation consistera à coupler un système de refoulement (une motopompe) et un système d'arrosage.

Le système d'arrosage sera assuré par un certain nombre de micro-asperseurs dans le cas des extensif et semi-intensif car étant plus adapté à une végétation de prairie (gazons et herbacés). Quant au cas intensif, son irrigation sera aussi assurée par des asperseurs auxquels on ajoute un système de goutte à goutte déposant l'eau à chaque pied de buisson et d'arbuste.

Le micro asperseur est adapté aux surfaces fleuries en libérant une pluie très fine qui arrose à basse pression (cela n'abîme pas les fleurs, même fragiles) et sur différentes distances assez larges (1 à 3 mètres de rayon suivant les marques). Il est facile à mettre en œuvre. L'irrigation goutte à goutte consiste à apporter régulièrement et de façon localisée au niveau des racines, la quantité suffisante d'eau dont la plante a besoin : cette technique est très économique dans l'utilisation de l'eau. L'efficacité de ces deux systèmes varie entre 80 et 90%.

IV. Les évacuations pluviales

L'évacuation des eaux pluviales est assurée par les entrées d'eaux pluviales. Celles-ci sont bordées par une zone stérile sur 40 cm minimum et sont protégées par un garde-grève. Une partie de l'eau de pluie s'infiltrera dans le complexe végétal jusqu'à saturation. Le surplus, pouvant pas s'infiltrer, s'écoulera à la surface suivant la pente jusqu'à atteindre la zone stérile. Une partie de l'eau infiltrée alimentera les plantes et le reste atteindra la couche drainante. Cette dernière stockera autant que possible dans les réservoirs de rétention et l'excédant sera drainé vers les entrées des eaux pluviales.

L'eau ruisselée à la surface, quant à elle, ayant atteint la zone stérile, très poreuse, s'infiltrera et sera évacuée par les entrées d'eaux pluviales.

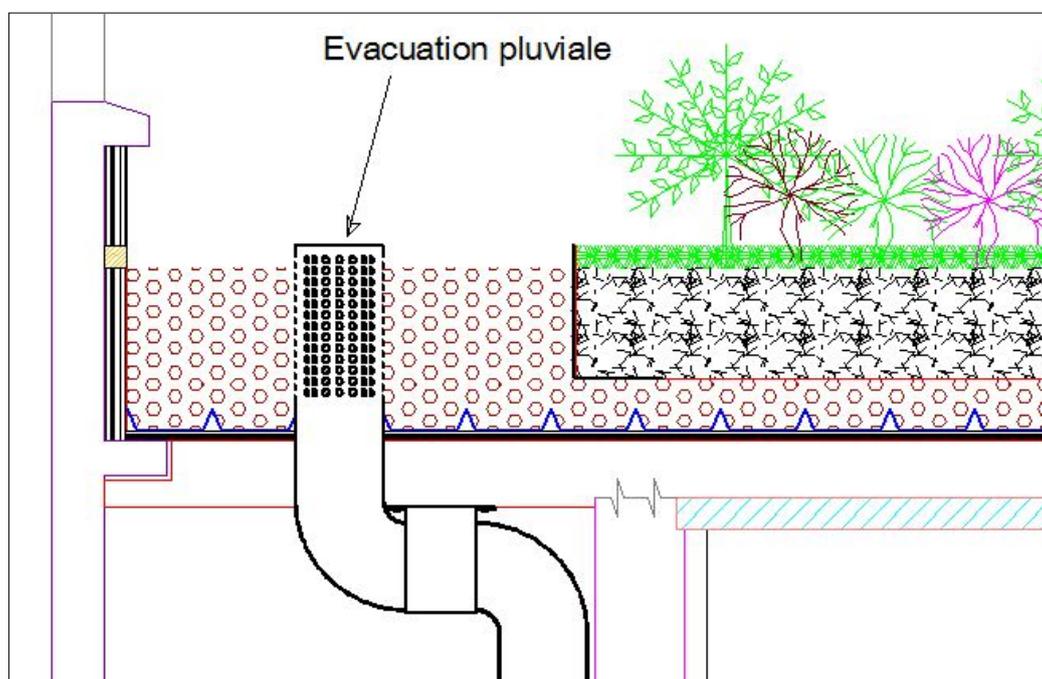


Figure 19: Entrées des eaux pluviales

D. LES PONTS THERMIQUES

Un pont thermique est une zone ponctuelle ou linéaire qui, dans l'enveloppe d'un bâtiment, présente une variation de résistance thermique (à la jonction de deux parois en général).

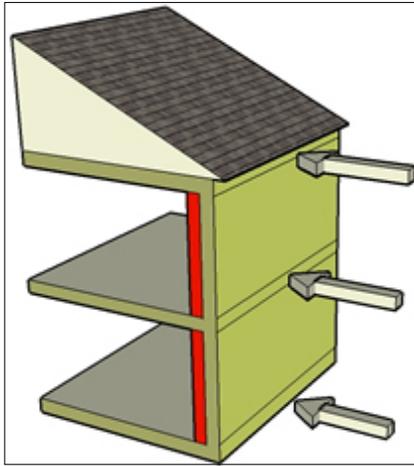


Figure 20: Ponts thermiques par les dalles

Les ponts thermiques constituent des zones de fortes gains thermiques. On les rencontre surtout aux jonctions des dalles et des murs.

Les ponts thermiques existeront toujours. Il s'agit alors de les limiter en améliorant la conception du bâtiment.

Cette partie de l'étude, est consacrée à la proposition de méthodes atténuantes qui concernent surtout les ponts thermiques acheminant la chaleur accumulée par les écrans de protection solaire et des murs de la cage à escaliers qui débouchent sur la toiture.

I. Les écrans de protection solaire

Le projet NIWANGO, dans son plan de construction bioclimatique, a prévu sur ses balcons des écrans protégeant les baies contre la pénétration des rayonnements directs du soleil.

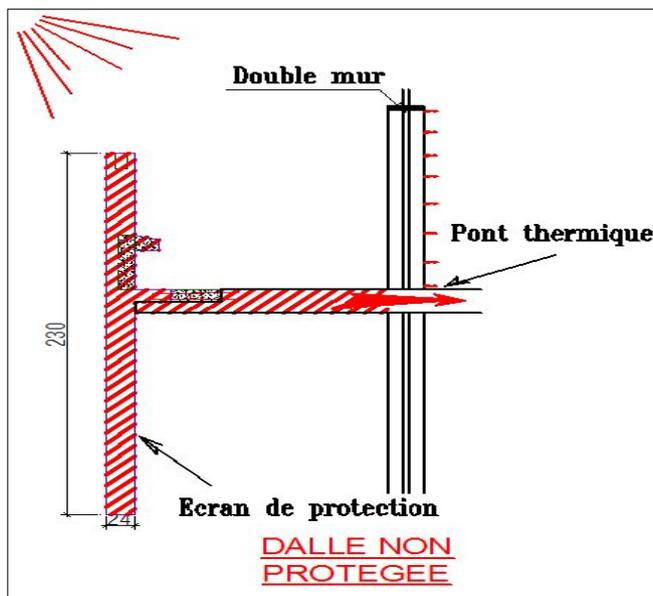


Figure 21: Pont thermique par dalle non protégée

Exposés aux rayonnements solaires, les écrans de protection se chauffent. Cette chaleur sera transmise à la dalle par conduction. Elle sera transmise ensuite à l'intérieur du bâtiment qui s'échauffera à son tour. Cela occasionnera une plus grande demande en énergie de climatisation.

Mais des solutions peuvent être trouvées pour réduire ces gains thermiques :

1. Les rupteurs de ponts thermiques

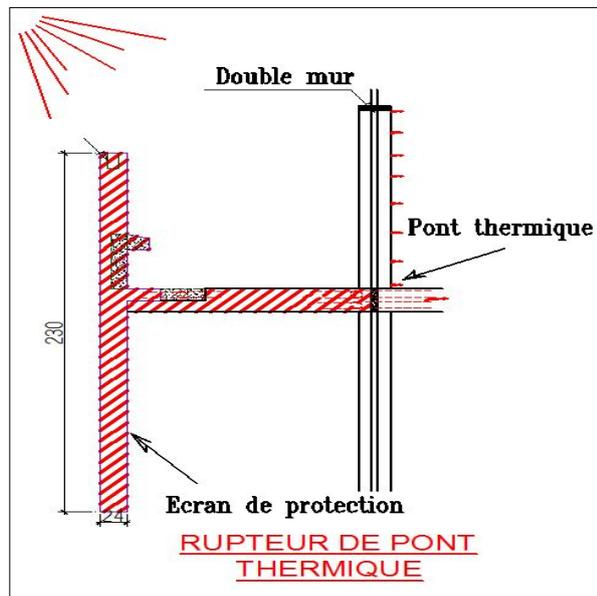


Figure 22: Rupture par rupteurs de pont thermique

Le secret de l'isolation est de créer une discontinuité, une rupture dans la conduction de chaleur entre la dalle et l'écran de protection peut être envisagée.

Les rupteurs de ponts thermiques sont des pièces isolantes préfabriquées (généralement en polystyrène) qui viennent s'intercaler au moment du coulage de la dalle intérieure et celle du balcon. Elles serviront à rompre la conduction de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur ou vice-versa.

Mais ces pièces sont très efficaces mais se trouvent aussi être très coûteuses.

2. Isolation par réduction des surfaces de contacts

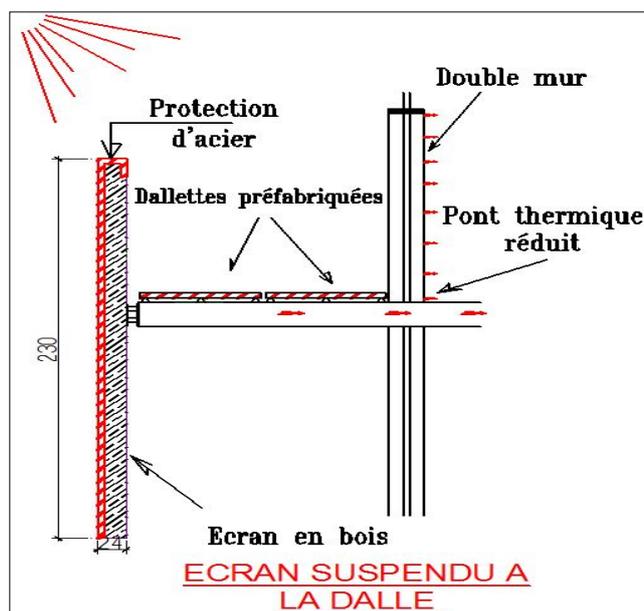


Figure 23: réduction des surfaces de contact

Il s'agit donc dans ce cas d'un écran en bois, recouvert par un acier protecteur contre les chocs thermiques et les intempéries, qui sera fixé à la dalle de balcon par des attaches. Exposée aux rayonnements solaires, la protection en acier s'échauffe mais la transmission de cette chaleur est inhibée par l'écran en bois. En outre, la dalle, elle-même est protégée des rayons solaires par des dallettes préfabriquées déposées par des appuis sur la dalle.

L'isolation est donc assurée par la présence du bois entre l'écran et la protection en acier.

Les ponts thermiques ne représentent que 5% des gains de chaleurs dans le bâtiment d'après les règlements thermiques construction maison. Mais les réduire peut quand même s'avérer intéressant pour les besoins en climatisation, et donc pour la facture d'électricité.

Chapitre 3 : Résultats, analyses et discussions

I. Résultats et analyses

Beaucoup de recherches restent à mener dans le domaine de la résistance thermique des toitures vertes. Evidemment, une toiture verte offre une protection naturelle contre le vent et les températures extrêmes, ce qui est dans tous les cas positif. Mais tout ceci dépend surtout du type de toiture verte, des couches qui la composent et de leurs épaisseurs. Les toitures vertes intensives peuvent, grâce à leur plus grande épaisseur, mieux stocker la chaleur, ce qui ralentira sa diffusion.

Des essais ont été faits à l'aide du logiciel de simulation COMFIE PLEIADES. Il a permis, de simuler les différents types de toiture pour une même construction afin de comparer leur caractère isolateur et aussi quantifier l'amplitude thermique entre une toiture dalle de 20cm en BA et les trois types de toitures vertes. Ces toitures sont exposées à la température ambiante extérieure, par effet de convection et sans tenir compte du phénomène d'évaporation et d'évapotranspiration. Ces simulations ont été faites pour un toit de 7x7 m² pendant périodes particulières de l'année (saison froide, saison chaude et saison pluvieuse voir page suivante) :

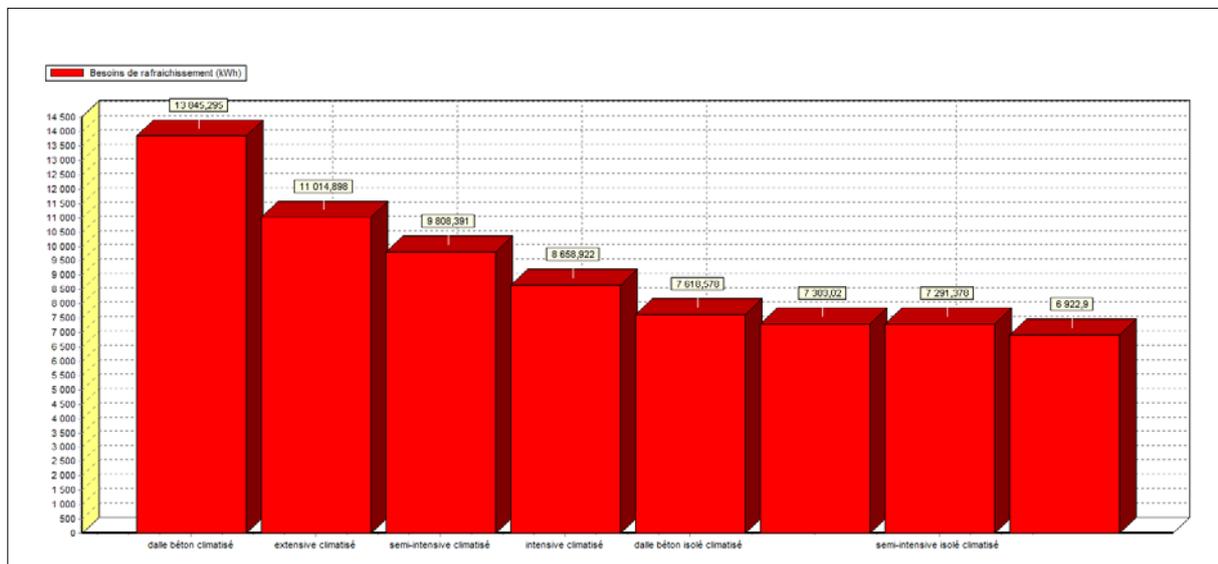


Figure 24: Histogramme des besoins en climatisation¹⁴

Comparée à une toiture dalle en BA de 20cm, dotée d'une toiture verte sans panneaux d'isolation permettrait de faire une réduction de 20% des besoins en climatisation pour une TVE, 28% pour

¹⁴ Pour une meilleure clarté, se référer aux annexes page 83

une TVS et 38% pour une TVI. Mais cette même toiture en BA, simplement isolée par des panneaux de laine de verre de 20cm d'épaisseur permet de faire une réduction de 45% en besoins de climatisation, 47% pour la TVE, 48% pour la TVS et 50% pour la TVI.

Pour un local non climatisé, voici ci-dessous les températures maximales, pour chaque toit vert :

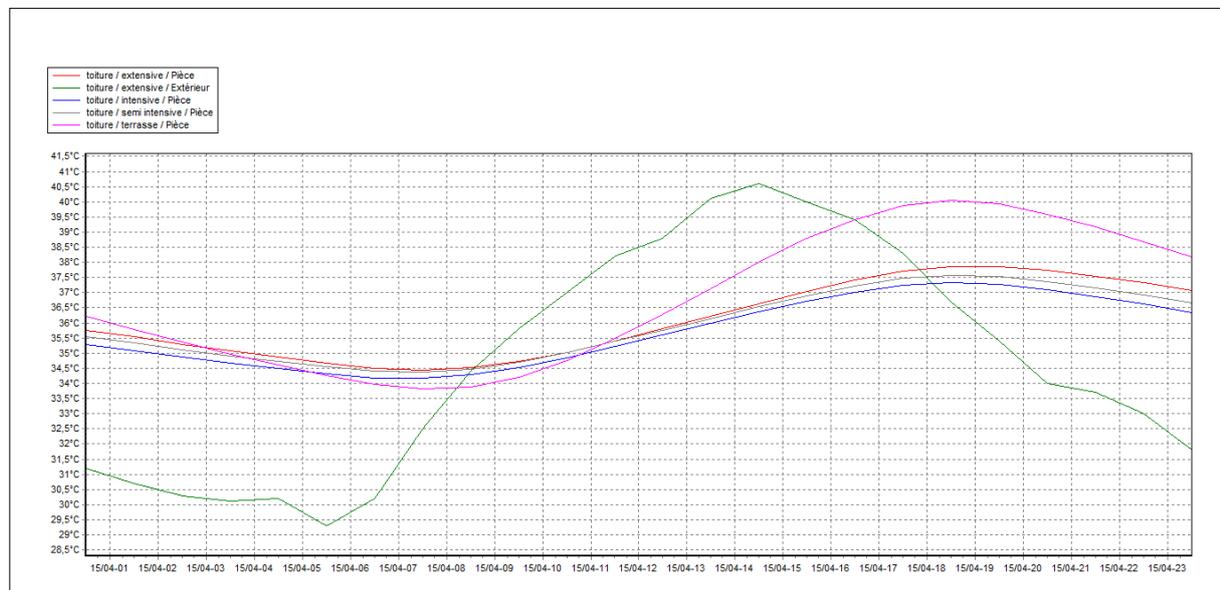


Figure 25: Courbe de simulation avec COMFIE PLEIADES¹⁵

Le 15 avril : T°C max :

- Toiture terrasse (20cm de BA) : 40 °C
- Toiture extensive : 37.9 °C
- Toiture semi-intensive : 37.5 °C
- Toiture intensive : 37.3 °C

Le 15 juillet :

- Toiture terrasse : 33.6 °C
- Toiture extensive : 31.5 °C
- Toiture semi-intensive : 31.4 °C
- Toiture intensive : 31.4 °C

Le 15 juin :

- Toiture terrasse : 35.8 °C
- Toiture extensive : 33.8 °C
- Toiture semi-intensive : 33.5 °C
- Toiture intensive : 33.2 °C

Le 25 décembre :

- Toiture terrasse : 31.6 °C
- Toiture extensive : 30 °C
- Toiture semi-intensive : 29.5 °C
- Toiture intensive : 29.5 °C

II. Discussions

Au vu de l'histogramme des besoins en climatisation, les toitures vertes ne paraissent intéressantes que pour les constructions non climatisées car il serait beaucoup moins coûteux d'installer des panneaux d'isolant de 20cm à base de laine de verre ou de capok qu'un complexe végétal coûteux, lourd et plus difficile à mettre en place.

¹⁵ Pour une meilleure clarté des courbes, se référer aux annexes pages 79-82

Les simulations de la **figure 25** de toits verts sur une construction indiquent qu'on peut faire un gain moyen de **2.4 °C** pour une dalle soumise à l'effet de convection.

Les études du **Pr Manfred Köhler**¹⁶, lors du salon de Neubrandenburg, ont montrées que l'évaporation et l'évapotranspiration d'une toiture gazonnée rafraichirait la dalle porteuse en béton de 12cm d'épaisseur d'une moyenne de **1.7°C**.

En partant de cette hypothèse et par extrapolation il apparait qu'un complexe gazonné rafraichirait une dalle de 20cm de **2.8°C**. Le bâtiment acquiert, de ce fait par la toiture verte environ **5.2°C** par rapport à la température intérieure d'une dalle en BA. Du fait de la très grande inertie de ses différentes couches, en présence de rayonnement solaire, la toiture verte reste protégée par le complexe végétal contre les chocs thermiques.

Le fait que la chaleur solaire et celle du complexe sont partiellement absorbées par l'évaporation de l'eau retenue par la végétation, il permet un refroidissement naturel, et se traduit par une diminution de la chaleur diffusée vers l'intérieur du bâtiment. Une toiture couverte de végétaux et d'un substrat de culture réduit considérablement la température d'un local du fait de sa grande inertie. En climat tropical sec, une toiture verte serait plutôt adaptée aux bâtiments positifs du fait de son caractère de refroidisseur (due à l'évaporation et à l'évapotranspiration).

Ainsi, pour un local climatisé, il serait plus ingénieux de placer un panneau d'isolation plutôt qu'un toit vert. Cela serait bien plus économique et plus pratique.

D'après les simulations, il serait donc possible de faire des économies d'énergie pour des bâtiments positifs grâce à une toiture verte à en climat tropical sec mais l'impact de la toiture verte sur la facture de climatisation reste secondaire car il existe des méthodes d'isolation plus pratiques et moins coûteux. Leurs impacts dans cette zone climatique resteraient cependant bien inférieurs à ceux en climat tempéré mais restent considérable. Toutefois, un intérêt particulier sera accordé à l'impact socio-environnemental et économique qui est en fait des volets pouvant avoir un impact direct sur ce type de projet.

¹⁶ Manfred Köhler architecte, paysagiste, écologiste et urbaniste allemand. Voir œuvres utilisées en bibliographie

Chapitre 4 : Etude socio-environnementale et économique

I. Impacts environnementaux

Les toitures vertes présentent un certain nombre d'avantages dont l'intérêt sera plus ou moins grand selon le type de toiture (extensive ou intensive), entre autre:

Une diminution du taux de CO₂ tout d'abord par réduction de la consommation énergétique et ensuite par sa fixation, par les feuilles des plantes, pour le phénomène de photosynthèse.

La fixation des poussières atmosphériques et des pollens : L'évapotranspiration engendrée par les terrasses plantées élève l'humidité de l'air et favorise donc la formation de rosée, indispensable à la fixation des poussières et des pollens en suspension dans l'air. Les particules de plomb, de carbone, les matières organiques particulaires ou de faible densité sont fixées dans le substrat ou nourrissent les bactéries, plantes et insectes qui s'y développent.

Une protection végétale permettant de maintenir la température du support de la toiture constante durant toute l'année.

Une meilleure isolation thermique : les plantes, et le substrat absorbent une grande partie de la chaleur offrant donc une meilleure inertie thermique à la toiture. En outre, l'humidité par évapotranspiration contribue également à réduire la température directement en contact avec la toiture de plus de 2°C.

Une protection contre les chocs thermiques et un allongement de la durée de vie du toit : la principale cause de dégradation progressive des membranes des toits plats est l'exposition aux intempéries et aux UV du soleil. Une toiture verte protège la membrane d'étanchéité des rayons UV (rayons du soleil) et des variations de température. Ces facteurs accélèrent le vieillissement de l'étanchéité. Sur un « toit nu », la température atteint rapidement les 70°C en saison chaude, alors que dans le cas d'une toiture verte, elle peut être réduite à 25°C. La toiture verte offre également une protection contre la grêle et les pluies battantes, contre l'envol de l'étanchéité sous l'effet du vent et contre les effets des pluies acides. En moyenne, la durée de vie de l'étanchéité d'une toiture verte est le double de celle d'un toit non végétalisé, grâce à l'effet tampon de la végétation.

Isolation phonique : les bruits aériens sont atténués de part la nature des matériaux du toit végétalisé. Suivant l'épaisseur du substrat, on peut obtenir une isolation acoustique. Une toiture verte amortit aussi considérablement les bruits. Cet effet est double : la transmission de bruits de l'extérieur vers l'intérieur est atténuée tout comme le sera l'éventuelle nuisance sonore provenant de l'intérieur du bâtiment.

La valeur d'isolation acoustique d'une toiture verte dépend bien entendu grandement de sa composition, et avant tout de la masse totale. C'est l'augmentation de la masse qui fait que les bruits aériens sont mieux absorbés. Une toiture verte intensive isolera donc mieux acoustiquement qu'une toiture verte extensive.

Dans un environnement urbain, le bruit du trafic est réfléchi par de nombreuses surfaces durcies, ce qui génère un bruit de fond continu caractéristique. Une surface molle comme une zone de verdure absorbe ces ondes au lieu de les réfléchir.

L'effet d'îlot thermique urbain (un climat plus agréable) : L'effet d'îlot thermique urbain est la surchauffe des zones urbaines et suburbaines, par rapport à la campagne environnante, en raison de l'accroissement des aires dures, chaussées, pavées et constructions dures. Les toitures vertes peuvent améliorer le microclimat en milieu urbain. L'évaporation suscitée par la présence de végétation diminue la température de l'air et augmente le degré d'humidité, ce qui améliore la qualité de l'environnement. Evidemment, le rôle joué par une toiture verte est limité, comparé à celui d'un parc ou d'une forêt, mais en milieu urbain, tout apport de verdure est bienvenu.

Prévention incendie : Grâce aux diverses couches sous-jacentes et à la couverture végétale, une toiture verte assure également un ralentissement de la propagation du feu, aussi bien de l'intérieur vers l'extérieur que dans le sens inverse.

Effets esthétiques : Les toitures vertes offrent un lieu de repos dans la ville. Esthétiques, elles améliorent la qualité de vie. Elles « rayonnent de nature », et on se sent mieux à la vue de leur verdure.

Amélioration de la biodiversité : Les toitures vertes, telles des îlots écologiques, sont des refuges pour toutes sortes d'animaux (insectes, oiseaux). Elles sont aussi un lieu où les plantes peuvent pousser et se multiplier. La fleur des plantes grasses exerce, par exemple, une très forte attraction sur les papillons et d'autres insectes se nourrissant du nectar des fleurs.

Une diversité accrue de plantes indigènes, de même qu'une variété de toitures à hauteur et à pentes différentes, d'espaces ouverts couverts de galets, de couches de végétation... améliore la biodiversité.



Figure 26: Biodiversité de la flore (source : divergetoit.net)

Out
res
tou
s
ces
ava
nta
ges

, les toitures vertes présentent aussi quelques inconvénients : entre autres :

L'eau de pluie est plus difficilement réutilisable : La végétation absorbe beaucoup d'eau, rendant la collecte et l'utilisation de l'eau de pluie plus difficiles. Il est difficile de donner des chiffres précis, cela dépend du type de toiture. Si vous réutilisez l'eau, vous pouvez considérer qu'environ deux fois moins d'eau s'écoule d'une toiture verte. L'eau prendra une couleur jaune-brun à cause des acides organiques. L'utilisation d'un filtre au charbon actif peut pallier ce problème.

Risque d'abîmer la membrane d'étanchéité : Si les couches et les épaisseurs qui composent la toiture ne sont pas adaptées au type de végétation, ou si on n'utilise pas une membrane suffisamment résistante, les racines risquent d'abîmer la membrane d'étanchéité.

Détection de fuites plus difficile : Les fuites sont plus difficiles à détecter que dans le cas d'une toiture sans végétation.

Besoin d'une structure portante adaptée : Plus le substrat est lourd, plus la structure portante devra l'être et plus il faudra utiliser de matière pour la réaliser.

II. L'aspect financier

Quelque soient ses avantages, un projet n'est réalisable que s'il l'est économiquement. Avant toutes choses, le maître d'ouvrage, ou le bailleur de fond est intéressé par le coût du projet. Il est donc capital de souligner ce point.

Dans ce rapport, il ne sera ressorti que les prix globaux des différents complexes. Pour le devis détaillé, se référer aux annexes.

Tableau 5: Coût du toit vert extensif

<u>ELEMENTS</u>	<u>COUT TOTAL</u>
complexe végétale	<u>2 503 258,00</u>
Complexe d'isolation/étanchéité	<u>11 825 385,00</u>
Charges équipements	<u>510 713,50</u>
TOTAL (FCFA)	14 839 356,50
Imprévus	10%
TOTAL TOITURE VERTE EXTENSIVE (FCFA)	<u>16 323 292,15</u>

Tableau 6: Coût du toit vert semi-intensif

<u>ELEMENTS</u>	<u>COUT TOTAL</u>
complexe végétal	<u>3 261 685,90</u>
Complexe d'isolation/étanchéité	<u>13 264 200,00</u>
Equipements	<u>692 207,50</u>
TOTAL (FCFA)	17 218 093,40
Imprévus	10%
TOTAL TOITURE VERTE SEMI-INTENSIVE (FCFA)	<u>18 939 902,74</u>

Tableau 7: Coût du toit vert intensif

<u>ELEMENTS</u>	<u>UNITES</u>	<u>PRIX UNITAIRES</u>	<u>QUANTITES</u>	<u>COUT TOTAL</u>
Complexe végétal				<u>4 096 568,00</u>
Complexe d'isolation/étanchéité				<u>16 156 350,00</u>
Equipements				<u>851 075,00</u>
TOTAL (FCFA)				21 103 993,00
Imprévus				10%
TOTAL TOITURE VERTE INTENSIVE (FCFA)				<u>23 214 392,30</u>

Le complexe d'isolation/étanchéité de la toiture verte extensive représente en réalité une toiture dalle ordinaire, de 20 cm d'épaisseur, normalement armée, recouverte d'une couche d'étanchéité et d'une forme de pente.

Au regard de ses chiffres, le premier constat saisissant est que la toiture verte extensive coûterait 1.25 fois plus chère qu'une toiture à dalle ordinaire. Cependant, bien qu'il ne soit pas accessible, le toit vert extensif pourrait faire gagner 5°C, ce qui lui offre un certain intérêt thermique.

Le toit vert semi-intensif, quant à lui, présente un complexe végétal accessible, comme lieu de récréation et de détente et coûterait 45% plus cher qu'une toiture dalle ordinaire. Au vu de son coût et de ses avantages esthétiques, thermiques et isolateurs elle paraît plus rentable.

La toiture jardin se démarque des autres par son coût élevé : 80% plus onéreux que les deux précédents (sans compter ses énormes besoins en eau). Néanmoins, il offre une inertie hors du commun, une esthétique inégalable, un lieu de détente et de récréation idéale avec ses multiples avantages environnementaux.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Au terme de notre étude dont l'objectif était d'observer l'impact des toits verts sur les charges de climatisation en Afrique subsaharienne, force est de constater que ce procédé d'isolation des toitures, dans un climat aussi rude n'ait pas l'impact attendu sur les besoins en climatisation est une voie de développement particulièrement séduisante pour les bâtiments positifs aux vues des degrés Celsius gagnés.

Dans des pays en voie de développement comme les nôtres, il serait réellement dommage de ne pas profiter du caractère refroidisseur des végétaux et de l'inertie de la terre pour améliorer es rendements des bâtiments positifs. Certes, la toiture verte peut revenir deux à trois fois plus coûteuse que le toit traditionnel mais en plus de ses qualités de refroidissement, sa durée de vie se trouve autant multipliée. Un nouvel état d'esprit doit être observé par les populations africaines, celui de « la projection des rendements à long terme ».

Aujourd'hui, c'est le facteur économique et financier qui semble être le plus important aux yeux du monde. Il faut espérer que dans les années à venir il y ait une véritable prise de conscience générale et que les économies d'énergie ne soient plus abordées seulement sous l'angle économique, mais sous l'aspect environnemental nous permettant ainsi de comprendre qu'économiser l'énergie n'est pas seulement un « placement financier » mais une opportunité que nous avons pour préserver notre planète. C'est de cette manière que le développement des systèmes d'éco-construction en Afrique sera, le plus accompli, le plus mûri, le plus intégré et donc le plus efficace.

Comme cela se passe dans les pays développés, des normes de constructions devraient être édictées afin d'introduire l'éco-construction dans les zones urbaines. On pourrait tout d'abord commencer par des lois stipulant que les projets d'ampleur introduisent des installations telles que les toitures vertes, les doubles murs, dans la construction. Vu le manque de surfaces vertes dans nos villes, ces lois permettront de créer, un microclimat urbain, une purification de l'atmosphère urbain et une économie importante d'énergie.

S'inspirant de Antoine LAVOISIER, NIWANGO, une éco-construction, dit : « **rien ne se perd, rien ne se jette tout se transforme** ». Afin de réduire la facture d'eau, il serait intéressant, au lieu d'utiliser de l'eau de la nationale des eaux, de procéder à un recyclage des eaux de usées pour l'arrosage des végétaux de la toiture. En effet, les eaux de douche, et d'évier peuvent être

recyclées et réutilisées à des fins d'arrosage. Les eaux usées ainsi récupérées pourraient être épurées par un filtre à sable, qui diminuera la concentration des détergents et les débarrassera des grosses particules de matières organiques. L'eau ainsi traitée ne contiendra que de fines particules de matières organiques en suspension ainsi qu'une flore bactérienne active et une concentration faible de détergent (un bon engrais) le tout fertilisant et enrichissant pour le sol végétal.

Enfin, la toiture verte, comme tout jardin nécessite un entretien régulier. Tout d'abord pendant la **période de parachèvement et de confortement** (3 mois à 1 an et demi) les actions suivantes doivent être menées : l'enlèvement des déchets apportés par le vent, le désherbage, une fertilisation, une cure des dispositifs d'assainissement. Pendant la **période de confortement** les préconisations d'entretien sont identiques à celles de la période de parachèvement. La fréquence minimale d'entretien est de 2 passages / an pour les toits verts extensifs, 4 à 6 passages /an pour les toits verts semi-intensifs et de 2 fois par mois pour les toits verts intensifs.

BIBLIOGRAPHIE

- **DTU 43.1 partis 1, 2, 3 e 4** : édité par CD-Reef V3 - Édition 142 (Décembre 2005)
- « **NF P 06-001 : les charges d'exploitation du bâtiment** » par CD-Reef V3 - version 135 - Mars 2004
- **Cours de Béton Armé** de Pascal LEGRAND (1995)
- « **L'Habitat Urbain, Brooklyn Bot Garden (USA) » Vol 4** : de Manfred Köhler: la recherche à long terme sur les toits verts extensifs à Berlin.
- « **Solutions constructives N°65** » par l'IRC
- « **Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment** »: de Building and Environment (2003)
- « **Conception Ecologique et de la Construction** » : de M Köhler et M. Keeley
- « **Règles Professionnelles pour la Conception et la Réalisation des Terrasses et Toitures Végétalisées (édition n°2)** » de ADIVET (Novembre 2007).
- « **Procédés de végétalisation extensive et semi-intensive pour les terrasses et les toitures végétalisées** » d'ECOVEGETAL (Janvier 2008)
- « **Cahier de prescriptions de poses pour pente <20%** » de ECOVEGETAL (Janvier 2008)
- « **Dossier Technique : la toiture végétalisée** » de l'Agence Locale de l'Energie (ALE) de l'agglomération Lyonnaise (Juillet 2008)
- « **Revêtement d'étanchéité Bicouche Bitume-polymère sous toiture végétalisée (TTV)** » Juillet 2007
- « **Système de végétalisation extensive sur étanchéité des toitures et terrasses inaccessibles** »
- « **Fiche Technique des Substrats Extensif Végétoit** » : VEGETOIT SARL
- « **Les info-fiches-ecoconstruction** » de l'IGBE (Février 2009).
- « **Les toitures végétalisées, une technique de gestion de l'eau devenue incontournable lors des nouvelles constructions respectant les critères de la Haute Qualité Environnementale** » de NOVATECH (2007)
- « **Lignes directrices de conception de toits verts** » : par Steven Peck and Monica Kuhn

- « **Végétalisation des murs et des toits à Paris Ed N°1** » par la mairie de Paris édité par COUE de Paris
- « **Calcul de l'évapotranspiration de référence ET0 selon la méthode FAO** » de Gilles Boullet
- « **Study on Evaporative Cooling effect of roof lawn gardens** » de Energy and Building (2000)

SITES INTERNET

http://fr.wikipedia.org/wiki/Toiture_vegetale (Mars 2011)

<http://fr.wikipedia.org/wiki/ecoconstruction> (Mars 2011)

http://fr.wikipedia.org/wiki/Jardin_de_toiture (Mars 2011)

<http://www.soprema.fr/> (Avril 2011)

http://www.vecover.com/index.php?option=com_content&view=article&id=78&Itemid=93
(Mars 2011)

ANNEXES

ANNEXES.....	46
ANNEXES 1 : PERSPECTIVES, PLANS ET COUPES.....	47
Annexe 1. 1: Perspective NIWANGO vue Sud-ouest.....	47
Annexe 1. 2: Perspective NIWANGO vue Nord-ouest.....	47
Annexe 1. 3: Plan d'implantation	48
Annexe 1.4 : Plan du niveau R+7.....	49
Annexe 1.5 : Coupe verticale BB.....	50
Annexe 1.6 : Plan toiture verte extensive.....	51
Annexe 1.7 : Plan toiture verte semi-intensive.....	52
Annexe 1.8 : Plan toiture verte intensive.....	53
Annexe 1.9 : Coupe porte-à-faux toiture verte extensive.....	54
Annexe 1.10 : Coupe porte-à-faux toiture verte semi-intensive.....	55
Annexe 1.11 : Coupe porte-à-faux toiture verte intensive.....	56
Annexe 1.13 : Pont thermique-protection par rupteur de pont thermique.....	58
Annexe 1.13 : Pont thermique-protection par réduction des surfaces de contact.....	59
ANNEXES 2 : DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES PORTANTES.....	60
Annexe 2.1 : Dimensionnement de la structure portante (TVE).....	60
Annexe 2.2 : Dimensionnement de la structure portante (TVS).....	67
Annexe 2.3 : Dimensionnement de la structure portante (TVI).....	73
ANNEXES 3 : LES SIMULLATIONS SUR COMFIE PLEIADES.....	79
Annexe 3.1 : test N°1 le 15 Avril.....	79
Annexe 3.2 : Test N°2 le 15 Juin.....	80
Annexe 3.3 : Test N°3 le 15 Juillet.....	81
Annexe 3.4 : Test N°4 le 25 Décembre.....	82
Annexe 3.5 : Histogramme des besoins en climatisation pour chaque type de toiture.....	83
ANNEXES 4 : AVANT METRE ET ESTIMATION DU COUT.....	84
Annexe 4.1 : Devis estimatif de la toiture verte extensive.....	84
Annexe 4.2 : Devis estimatif de la toiture verte semi-intensive.....	85
Annexe 4.3 : Devis estimatif de la toiture verte intensive.....	86

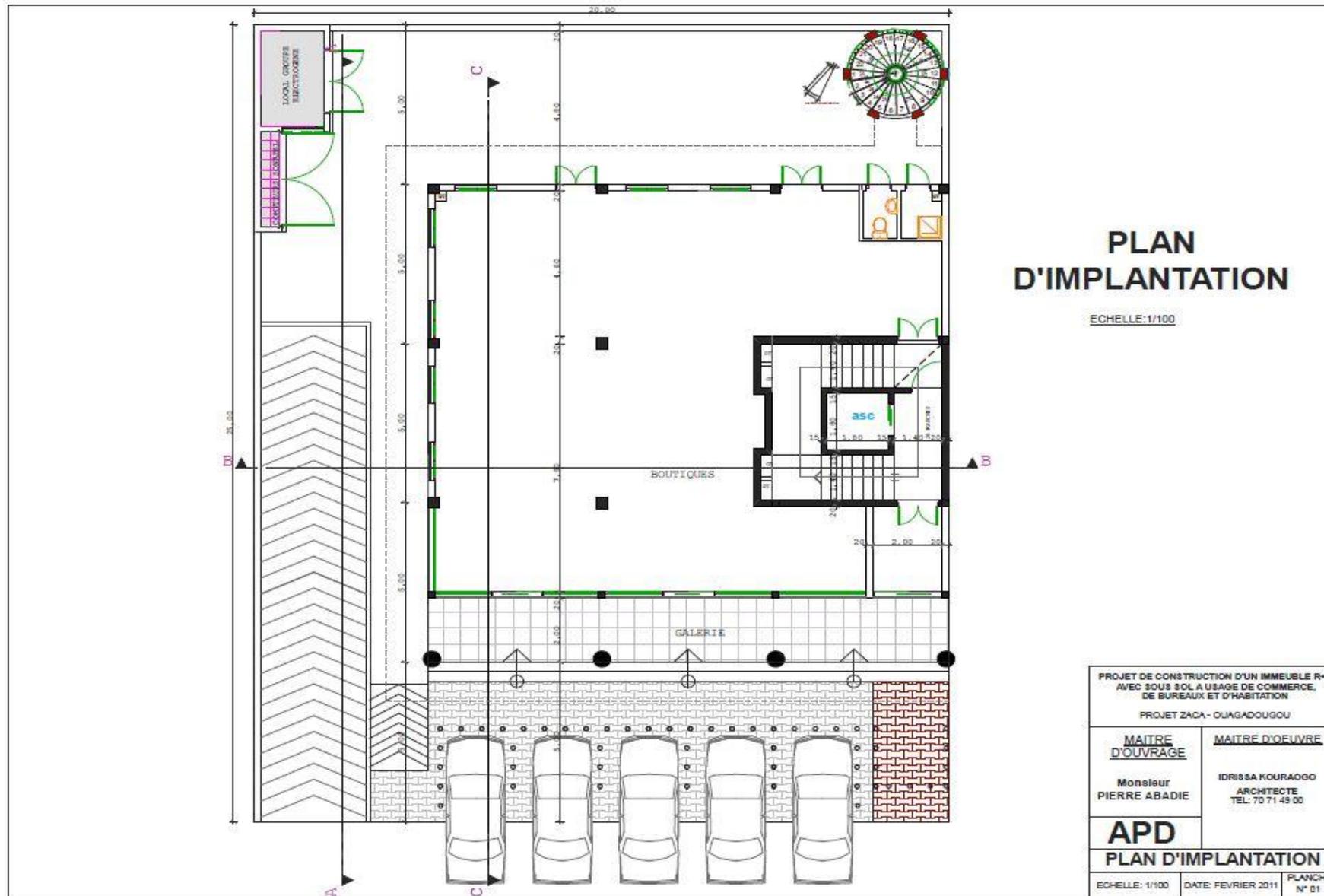
ANNEXES 1 : PERSPECTIVES, PLANS ET COUPES



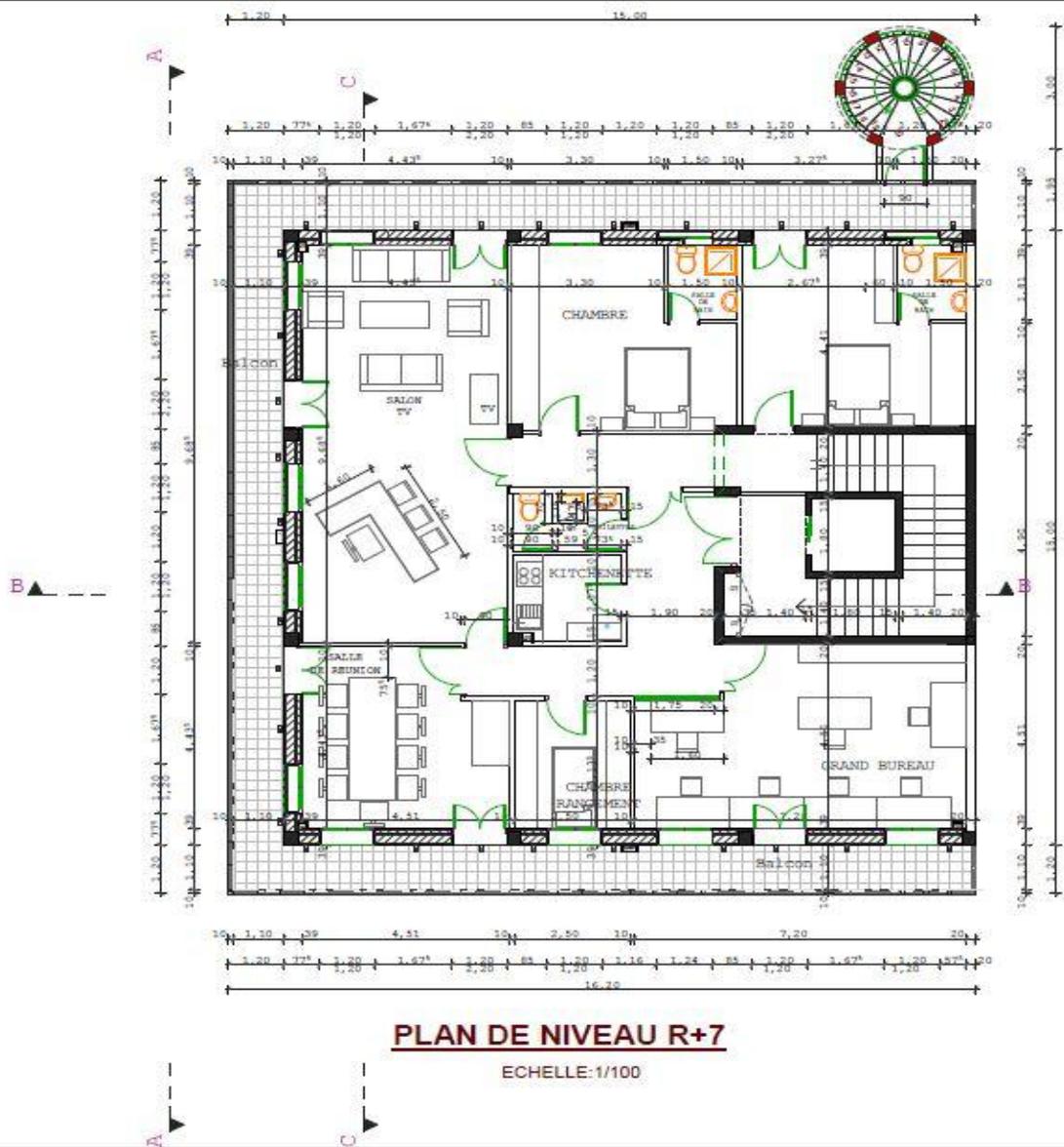
Annexe 1. 1: Perspective NIWANGO vue Sud-ouest



Annexe 1. 2: Perspective NIWANGO vue Nord-ouest

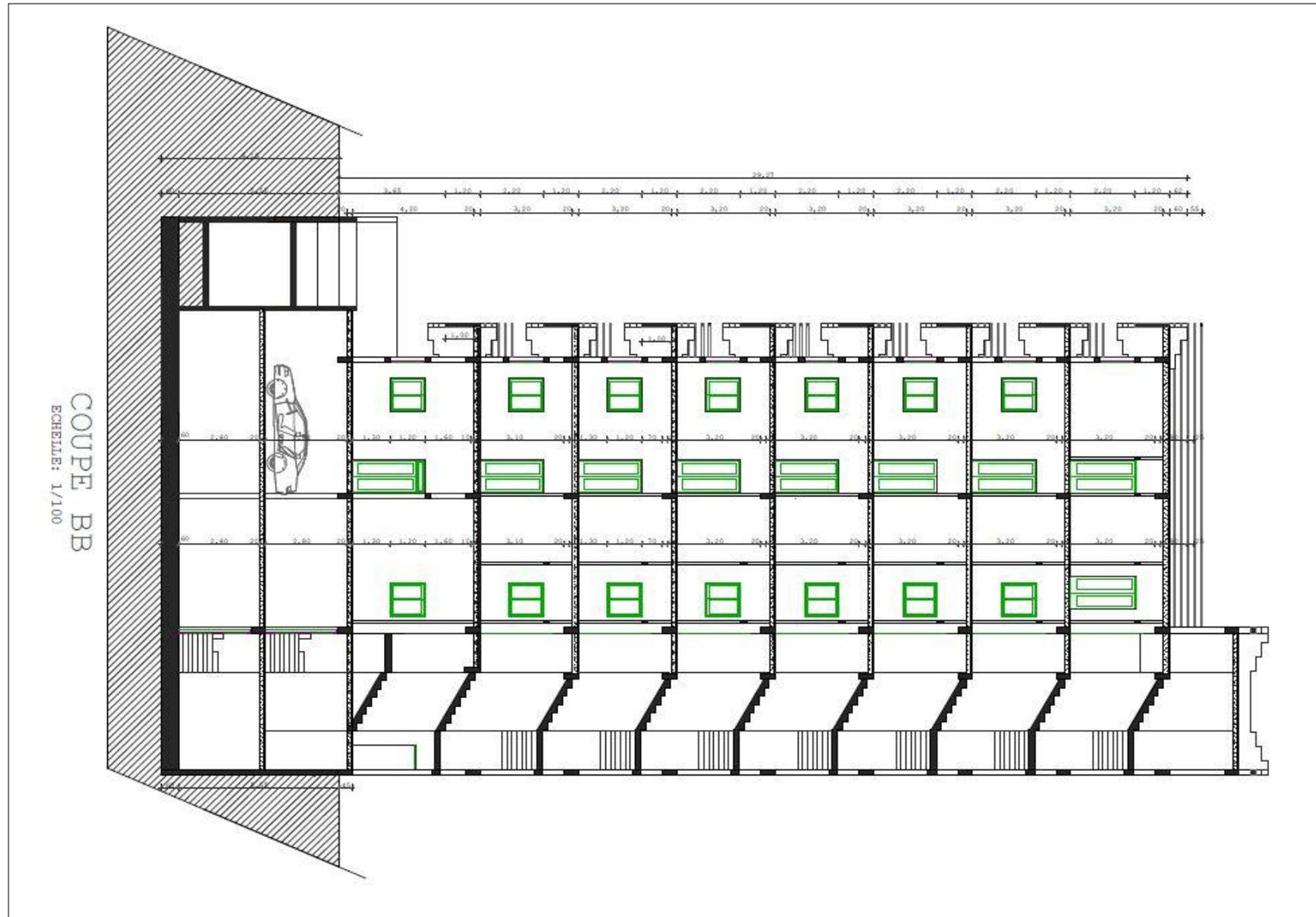


Annexe 1. 3: Plan d'implantation



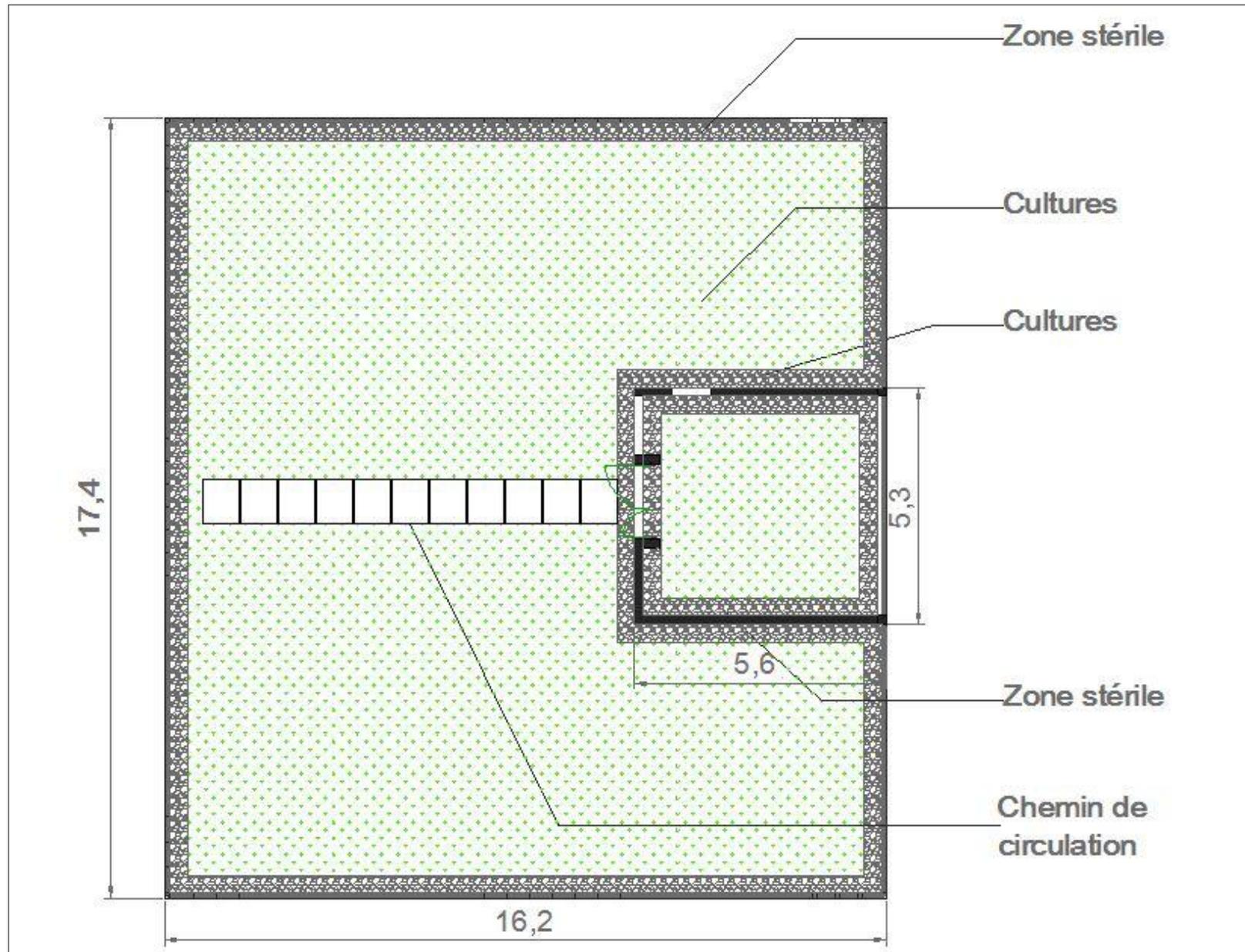
PROJET DE CONSTRUCTION D'UN IMMEUBLE R+7 AVEC SOUS SOL A USAGE DE COMMERCE, DE BUREAUX ET D'HABITATION		
PROJET ZACA - OUAGADOUGOU		
MAITRE D'OUVRAGE Monsieur PIERRE ABADIE	MAITRE D'OEUVRE IDRISSA KOURAOGO ARCHITECTE TEL: 70 71 49 00	
APD		
PLAN DE NIVEAU R+7		
ECHELLE: 1/100	DATE: FEVRIER 2011	PLANCHE N° 05

Annexe 1.4 : Plan du niveau R+7

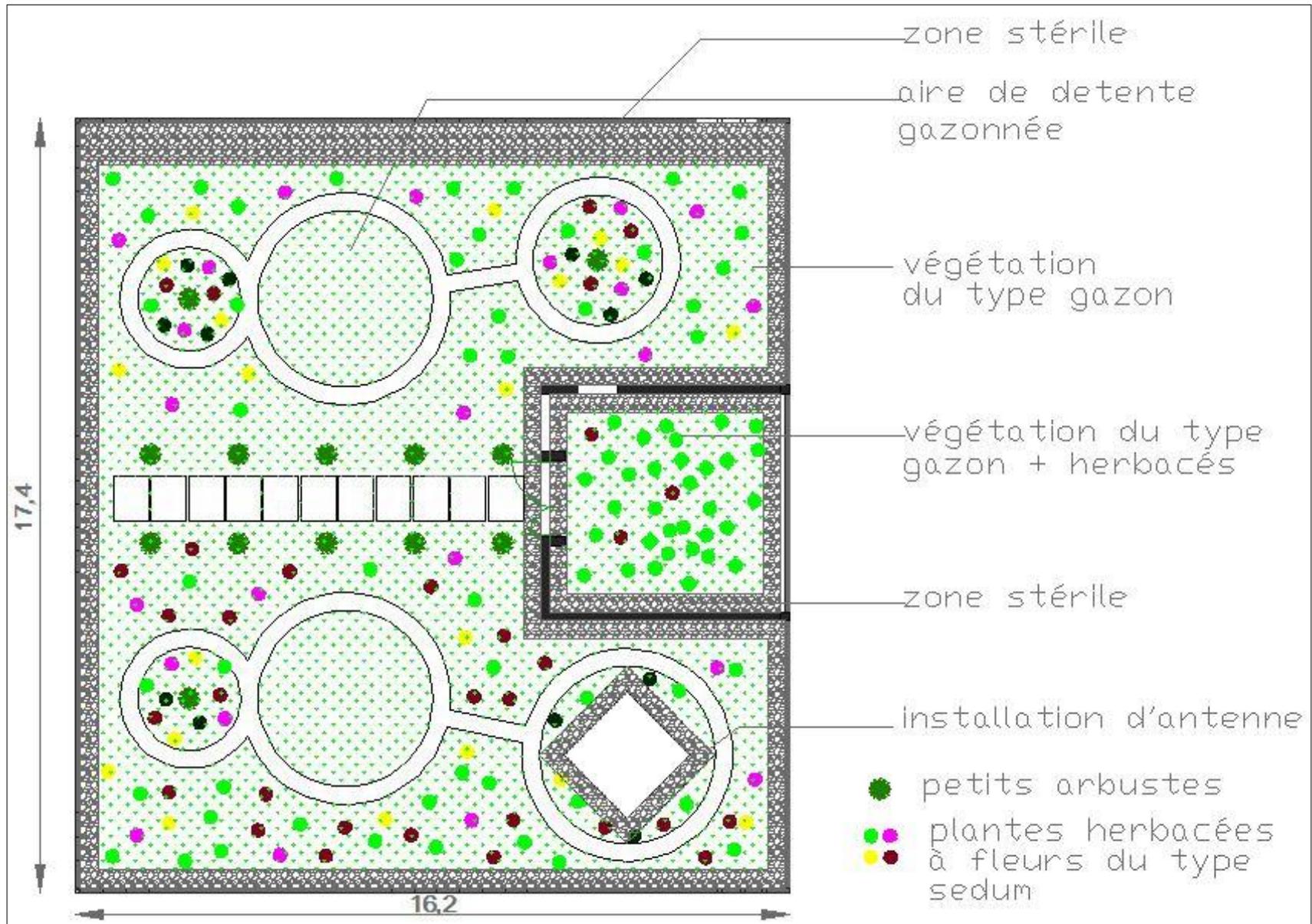


Annexe 1.5 : Coupe verticale BB

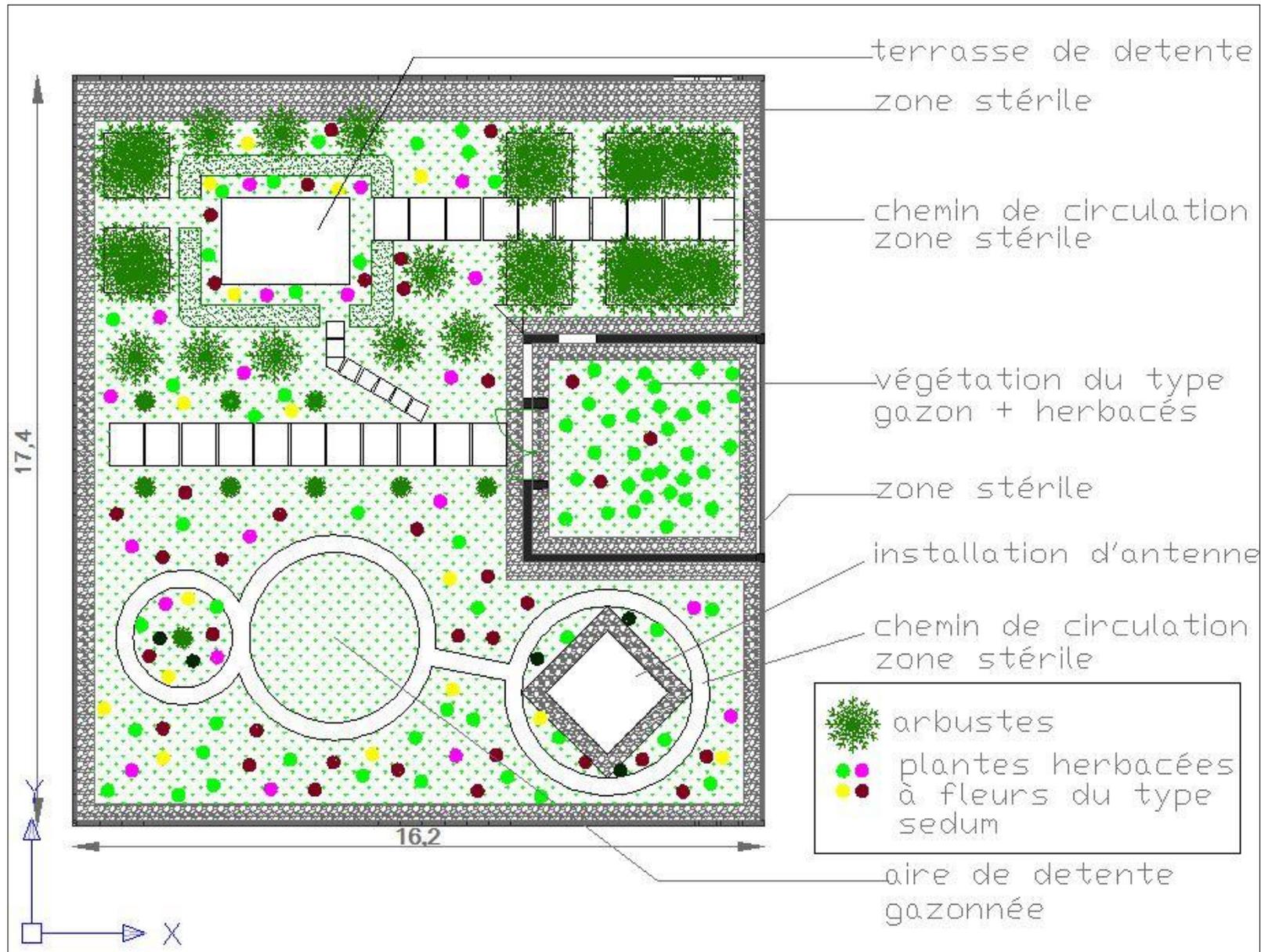
Annexe 1.6 : Plan toiture verte extensive



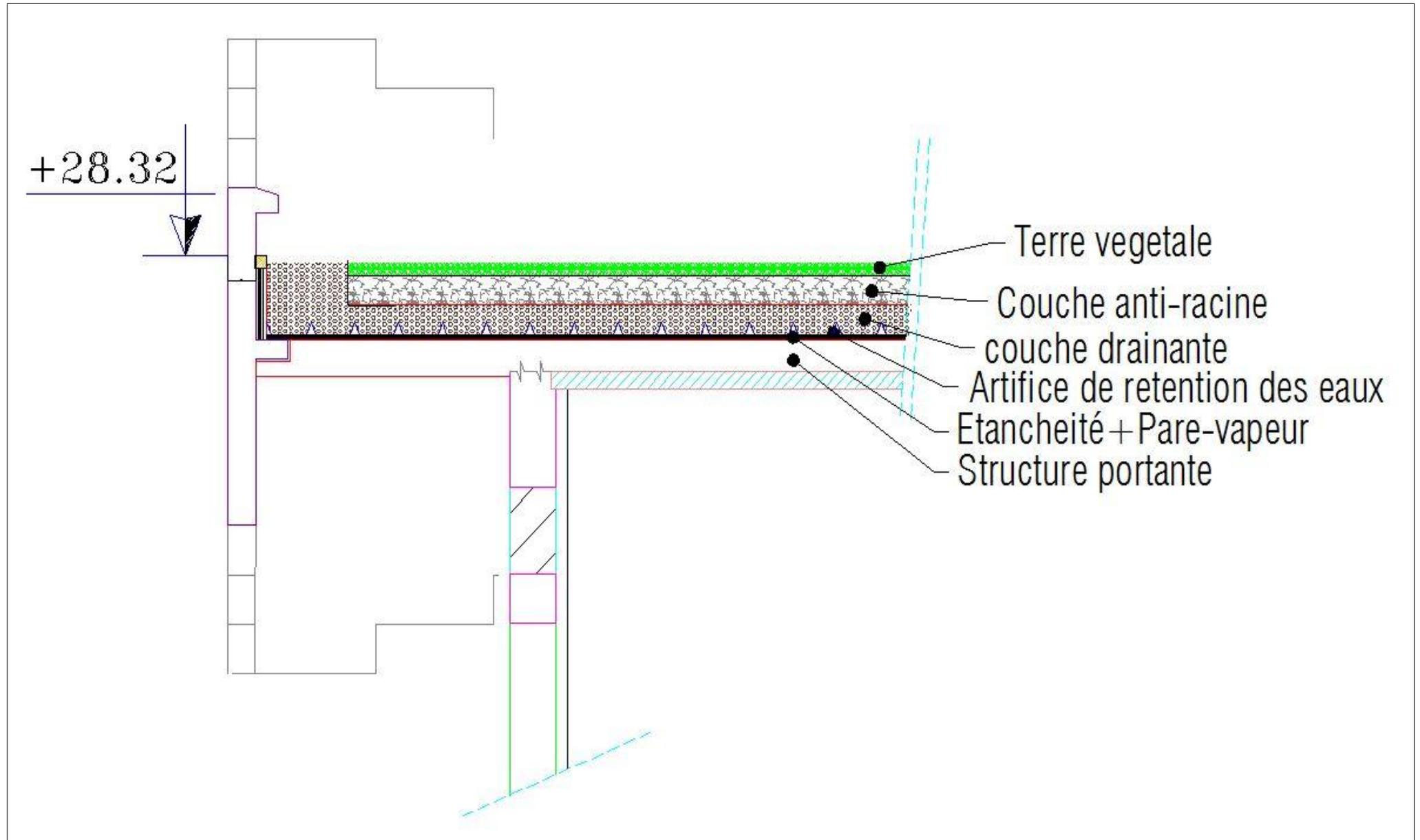
Annexe 1.7 : Plan toiture verte semi-intensive



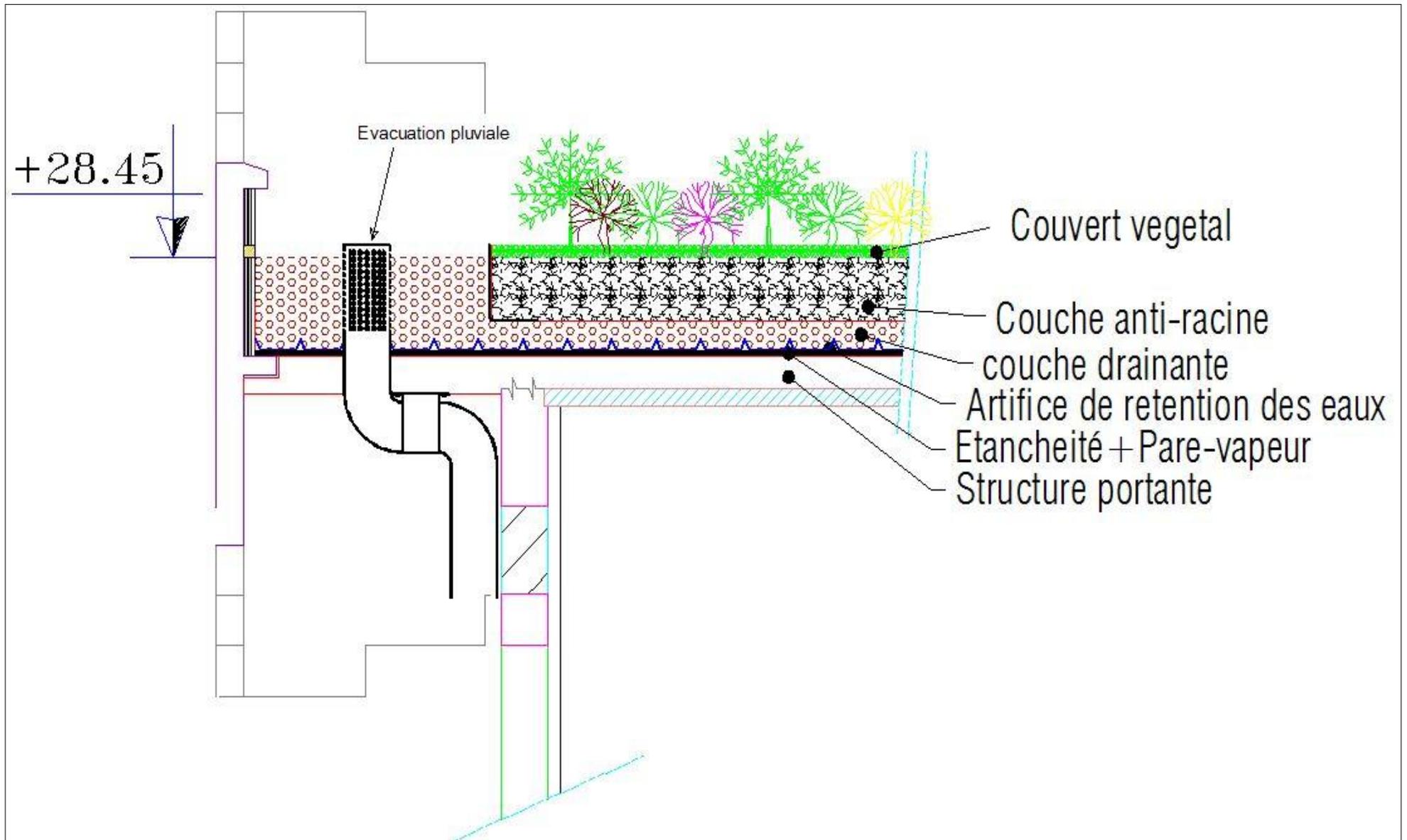
Annexe 1.8 : Plan toiture verte intensive



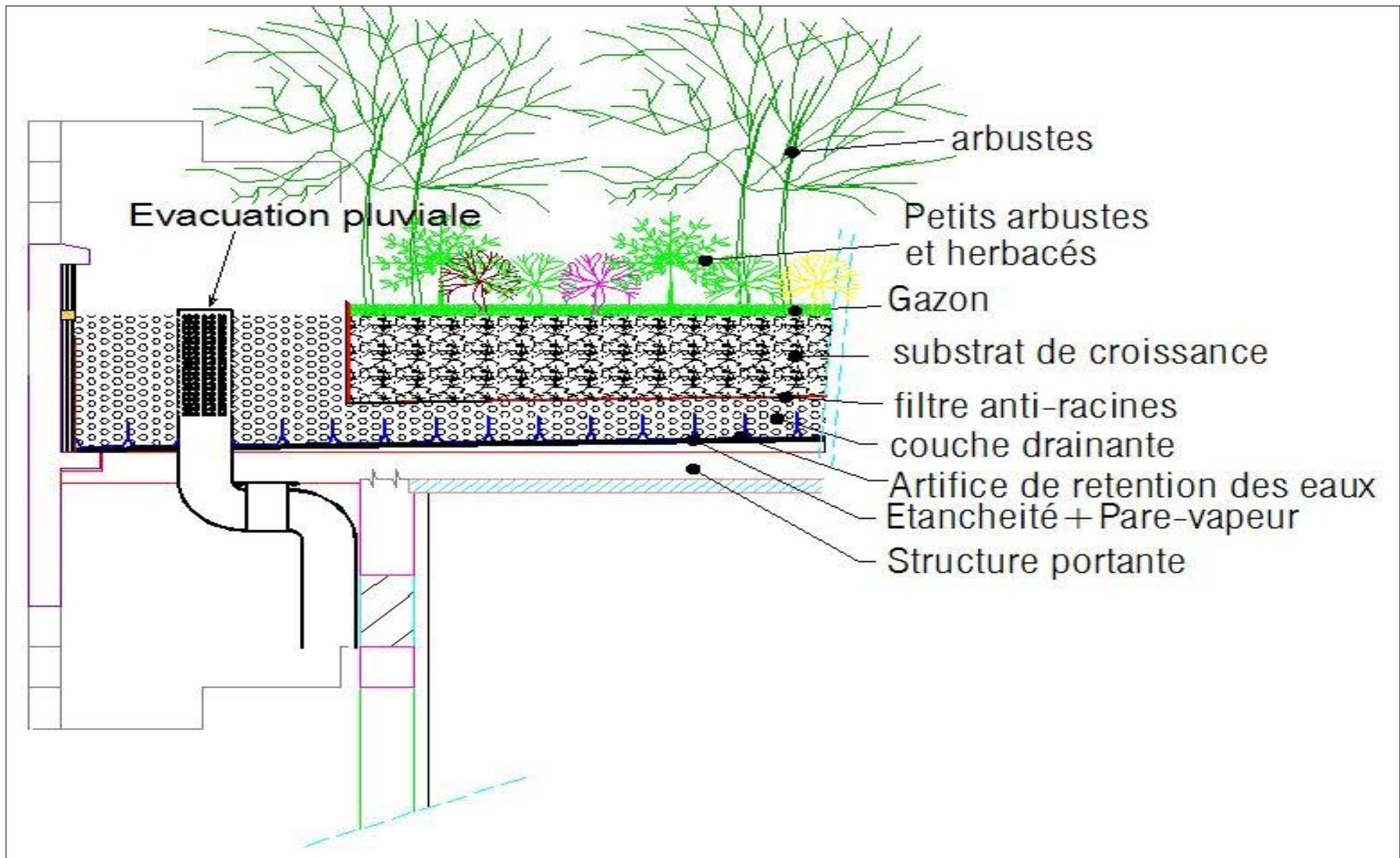
Annexe 1.9 : Coupe porte-à-faux toiture verte extensive

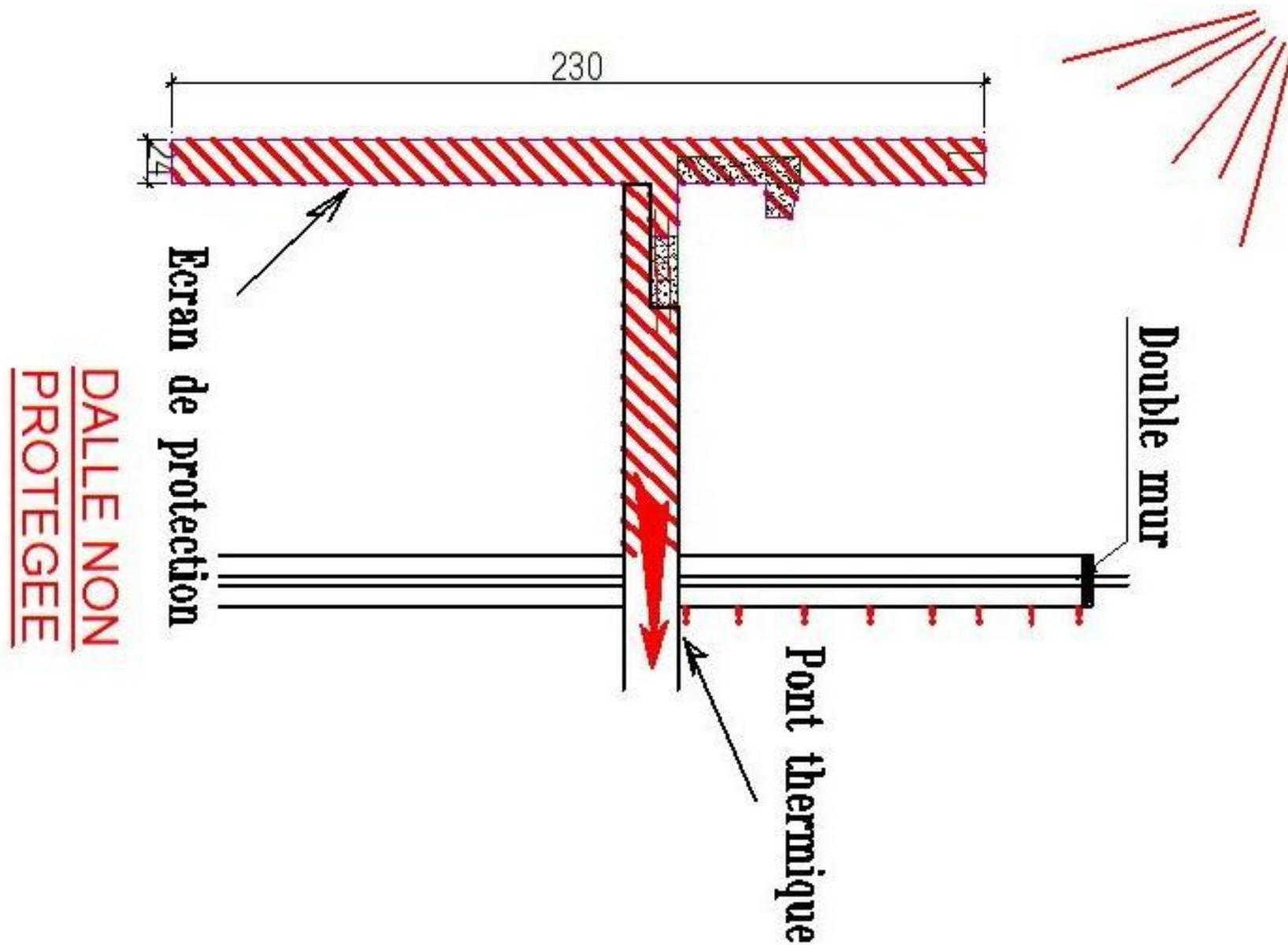


Annexe 1.10 : Coupe porte-à-faux toiture verte semi-intensive

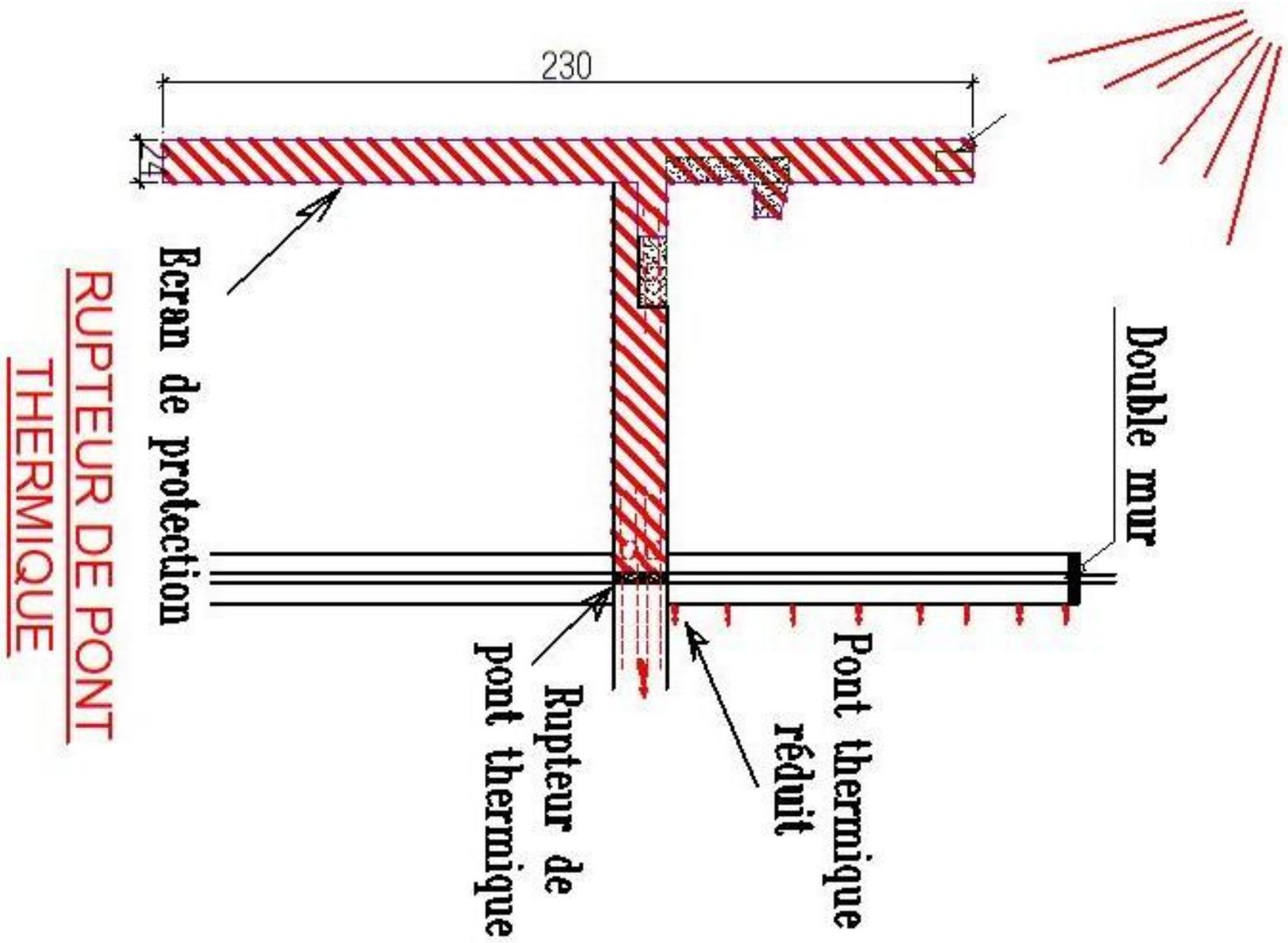


Annexe 1.11 : Coupe porte-à-faux toiture verte intensive

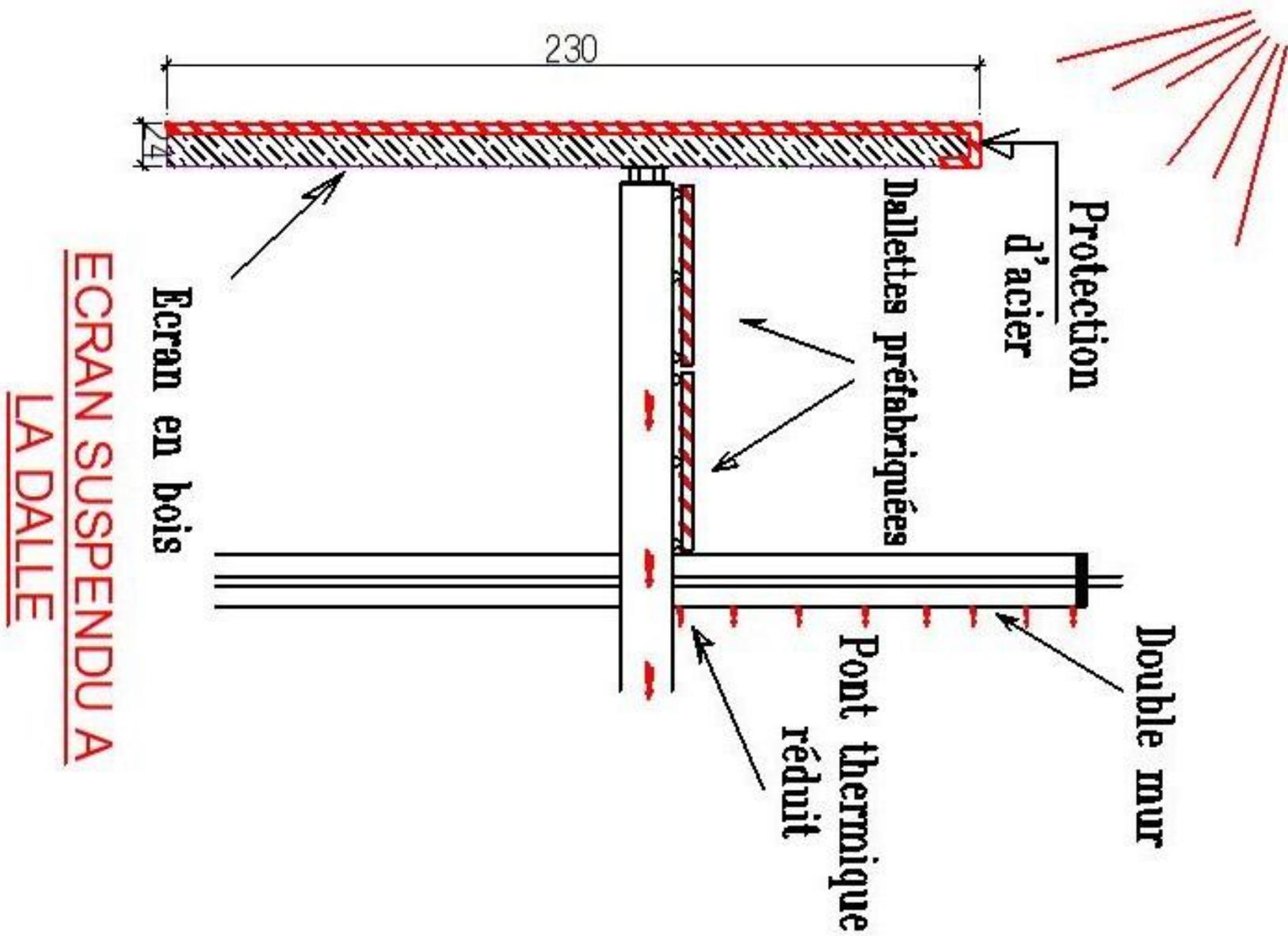




Annexe 1.12 : Pont thermique dalle non protégée



Annexe 1.13 : Pont thermique-protection par rupteur de pont thermique



Annexe 1.13 : Pont thermique-protection par réduction des surfaces de contact

ANNEXES 2 : DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES PORTANTES

Les hypothèses de calcul

Les hypothèses de calculs sont les suivants :

Matériaux utilisés		
Calcul suivant BAEL 91 mod. 99		
Acier	Fe(Mpa)	400
	γ_e	1,15
Béton	fc28(Mpa)	25
	γ_b	1,5
	f _{bu}	14,16666667
	θ	1
	ft28	2,1
	fissuration	Préjudiciable

Les chargements

Ces charges seront affectées de leurs coefficients.

1,35 pour les charges permanentes ;

1,50 pour les charges d'exploitation.

Annexe 2.1 : Dimensionnement de la structure portante (TVE)

❖ Les charges permanentes :

		ELEMENTS	CHARGES RELATIVES ¹	CHARGE REELES (DaN/m ²)
Charges Permanentes	complexe végétale			436
		végétalisation	10 DaN/m ²	10
		substrat	1400 DaN/m ³	168
		filtre anti-racine	1 DaN/m ²	1
		couche de drainage	2700 DaN/m ³	247
		artifice de rétention des eaux	10 DaN/m ²	10
	Complexe d'isolation/étanchéité			502
		couche d'étanchéité	1 DaN/m ²	1
		Couche de pare-vapeur	1 DaN/m ²	1
		Structure portante	2500 DaN/m ³	500
	Charges forfaitaires			15
		charges forfaitaires	15 DaN/m ²	15
	Charges équipements			723
		chemins de circulation	2500 DaN/m ³	100
		Zones stériles	1400 DaN/m ³	252
	Rebords	2500 DaN/m ³	513	
	Garde-corps			

¹ Cahier de prescriptions de poses ECOVEGETAL

❖ **Les charges climatiques :**

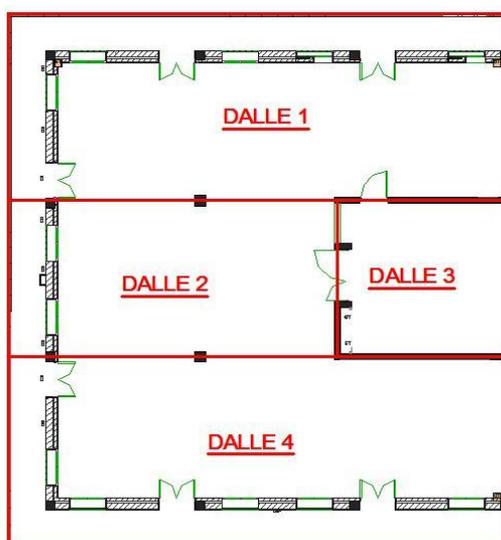
Elles sont les charges descendantes (la pluie) et les charges ascendantes (le vent). Ces dernières on une valeur de **57 DaN/m²**

❖ **Les charges d'exploitation**

Pour les toitures végétalisées (toitures-terrasses techniques ou zones techniques) prendre la valeur suivante: **150 DaN/m²**

1. Modélisation de la dalle

Le toit du bâtiment a été subdivisé en quatre (4) dalles afin de faciliter son dimensionnement. Le calcul des dalles seront fait à l'ELU



2. Calculs des dalles

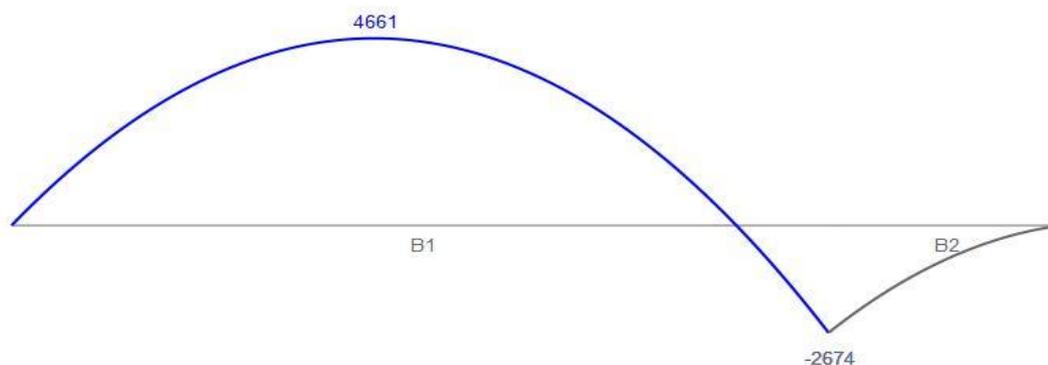
Les moments nous sont donnés par le logiciel « pyBar ». Et la dalle est dimensionnée par les moments maximaux sur la quasi-totalité de la dalle.

Diamètres minimaux à prendre HA12

• **Modélisation de la dalle 1**

▪ **Modèle suivant lx**

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 46.61 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = - 26.74 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 9.7 \text{ cm}^2$ 7 HA14

$A_{sa} = 5.4 \text{ cm}^2$ 7 HA 12

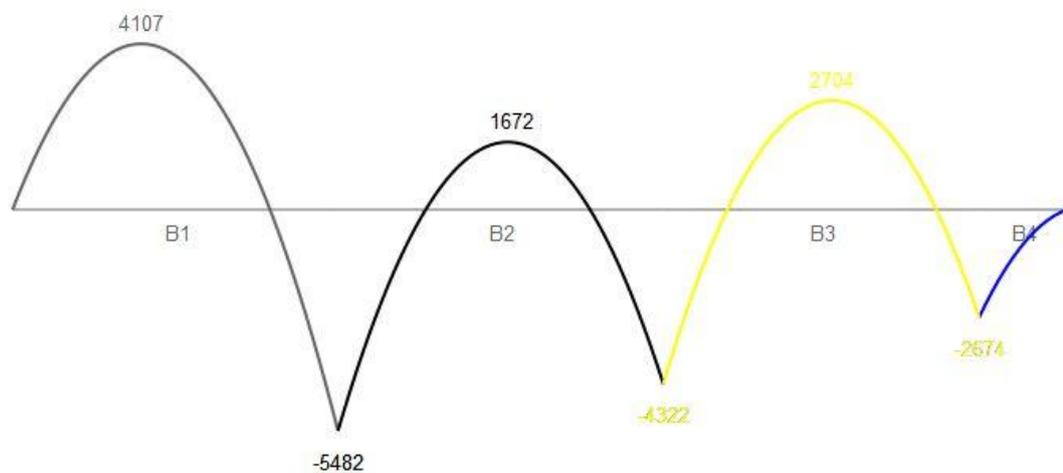
Les espacements sont :

$E_{spt} = 14 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

▪ *Modèle suivant ly*

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 41.07 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 16.72 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut3} = 27.04 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = - 54.82 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = - 43.12 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua3} = - 25.76 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 8.5$ 6 HA 14

$A_{st2} = 3.3$ 6 HA 12

$A_{st3} = 5.4$ 6 HA 12

$A_{sa1} = 11.6$ 6 HA 16

$A_{sa2} = 8.9$ 6 HA 14

$A_{sa3} = 5.2$ 6 HA 12

Les espacements sont :

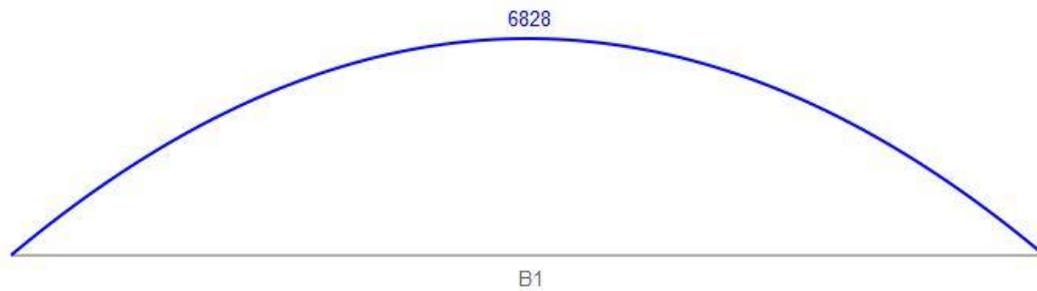
$E_{spt} = 14 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

- Modélisation de la dalle 2

- *Modèle suivant lx*

Echelle :  2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 68.28 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = M_{u \text{ min}} = -10.24 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 14.9$ 8 HA 16

$A_{sa} = 2.6$ 6 HA 12

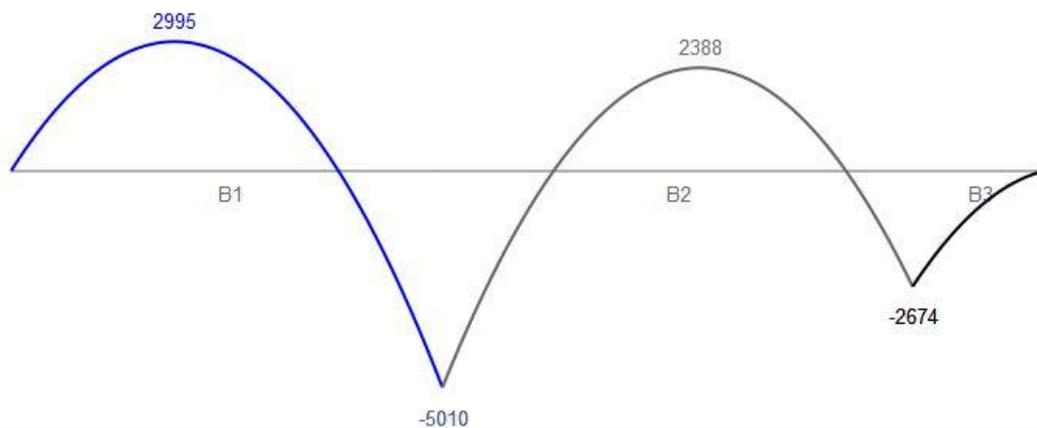
Les espacements sont :

$E_{spt} = 12 \text{ cm}$

$E_{spa} = 16 \text{ cm}$

- *Modèle suivant ly*

Echelle :  2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 29.95 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 23.88 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = M_{u \text{ min}} = -50.10 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = M_{u \text{ min}} = -26.74 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

Ast1 = 6 6 HA 12
Ast2 = 4.8 6 HA 12
Asa1 = 10.5 6 HA 16
Asa 2 = 5.4 6 HA 12

Les espacements sont :

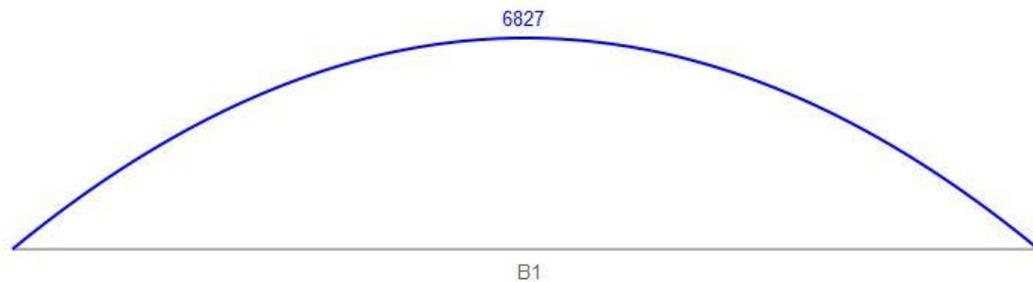
Espt = 14cm

Espa = 14cm

- Modélisation de la dalle 3

- Modèle suivant lx

Echelle :  2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 68.28 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = M_{u \text{ min}} = -10.24 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

Ast = 14.9 8 HA 16
Asa = 2.6 6 HA 12

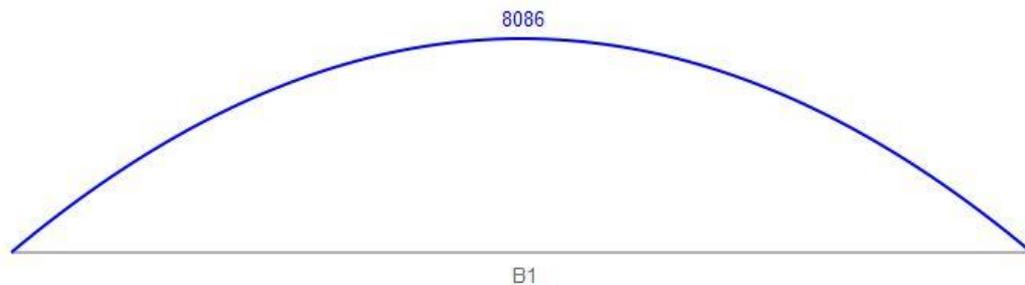
Les espacements sont :

Espt = 12 cm

Espa = 16 cm

- Modèle suivant ly

Echelle :  2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 80.86 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = M_{u \min} = -12.13 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 18.2$ 10 HA 16

$A_{sa} = 2.6$ 6 HA 12

Les espacements sont :

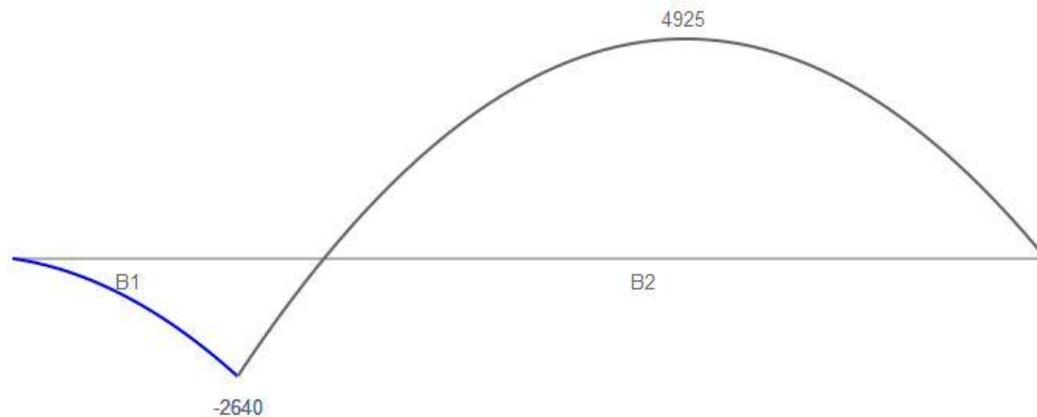
$Espt = 10 \text{ cm}$

$Espsa = 16 \text{ cm}$

- Modélisation de la dalle 4

- Modèle suivant lx

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 49.25 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = -26.4 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 10.3$ 7 HA 14

$A_{sa} = 5.3$ 5 HA 12

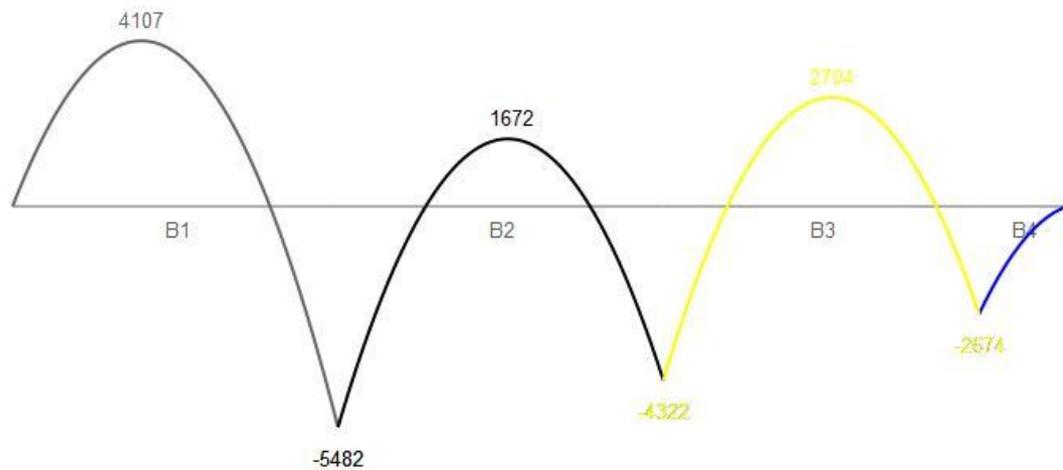
Les espacements sont :

$Espt = 14 \text{ cm}$

$Espsa = 19 \text{ cm}$

▪ Modèle suivant ly

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 41.07 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 16.72 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut3} = 27.04 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = - 54.82 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = - 43.22 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua3} = - 26.75 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 8.5$ 6 HA 14

$A_{st2} = 3.3$ 6 HA 12

$A_{st3} = 5.5$ 6 HA 12

$A_{sa1} = 11.6$ 6 HA 16

$A_{sa2} = 8.9$ 6 HA 14

$A_{sa3} = 5.4$ 6 HA 12

Les espacements sont :

$E_{spt} = 15\text{cm}$

$E_{spa} = 15\text{cm}$

Annexe 2.2 : Dimensionnement de la structure portante (TVS)

❖ Les charges permanentes :

	<u>ELEMENTS</u>	<u>CHARGES RELATIVES</u>	<u>CHARGE REELES (DaN/m²)</u>	
<i>Charges Permanentes</i>	complexe végétal			
		végétalisation	20 DaN/m ²	20
		substrat	1480 DaN/m ³	370
		filtre anti-racines	1 DaN/m ²	1
		couche de drainage	2700 DaN/m ³	247
		artifice de rétention des eaux	10 DaN/m ²	10
	Complexe d'isolation/étanchéité			
		couche d'étanchéité	1 DaN/m ²	1
		Couche de pare-vapeur	1 DaN/m ²	1
		Structure portante	2500 DaN/m ³	500
	Charges forfaitaires			
		charges forfaitaires	15 DaN/m ²	15
	Charges équipements			
		chemins de circulation	2500 DaN/m ³	40
		Zones stériles	1400 DaN/m ³	520
		antenne éventuelle	100 DaN/m ²	100
		Rebords+écran	2500 DaN/m ³	513
	Garde-corps		25	

❖ Les charges climatiques :

Elles sont les charges descendantes (la pluie) et les charges ascendantes (le vent). Ces dernières on une valeur de **57 DaN/m²**

❖ Les charges d'exploitation

Pour les toitures végétalisées (toitures-terrasses techniques ou zones techniques) prendre la valeur suivante: **150 DaN/m²**

1 Calculs des dalles

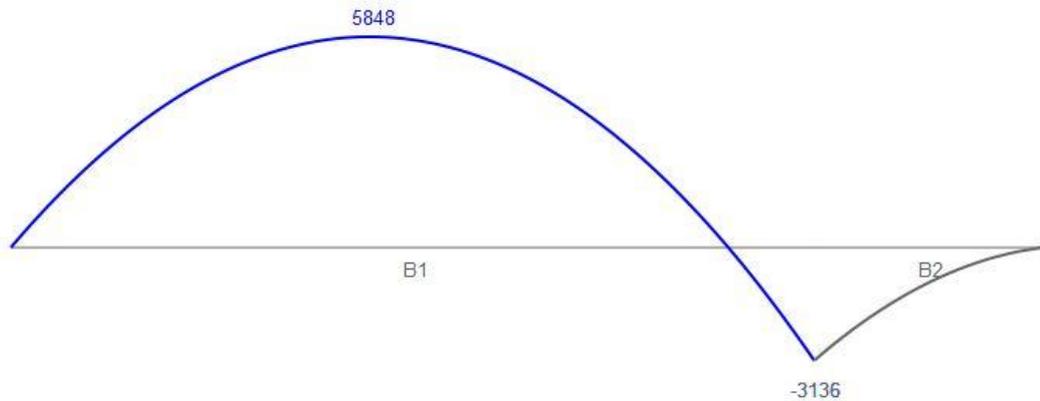
Les moments nous sont donnés par le logiciel « pyBar ». Et la dalle est dimensionnée par les moments maximaux sur la quasi-totalité de la dalle.

Diamètres minimaux a prendre HA12

- Modélisation de la dalle 1

- Modèle suivant lx

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 58.48 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = - 31.36 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 12.5 \text{ cm}^2$ 7 HA16

$A_{sa} = 6.3 \text{ cm}^2$ 7 HA 12

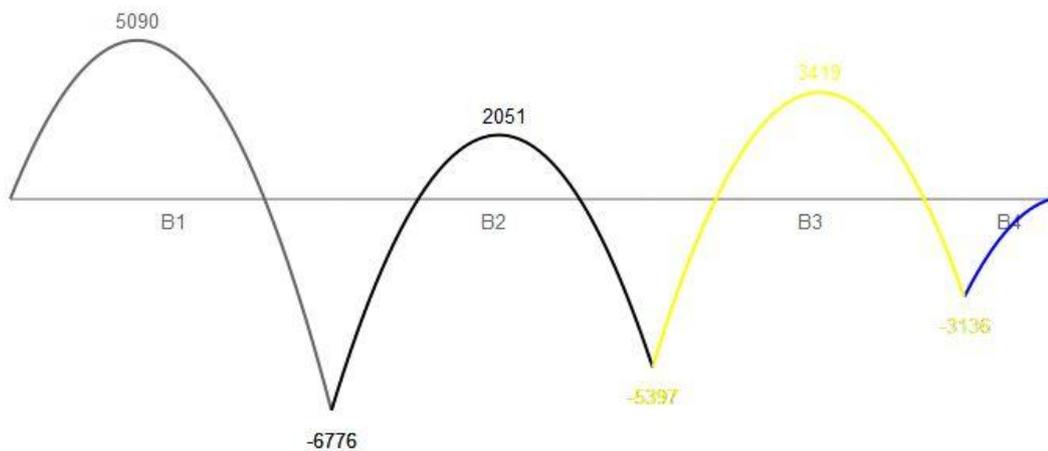
Les espacements sont :

$E_{spt} = 14 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

- Modèle suivant ly

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 50.9 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 20.51 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut3} = 34.19 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = - 67.76 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = - 53.97 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua3} = - 31.36 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 10.7$ 6 HA 16

$A_{st2} = 4.1$ 6 HA 12

$A_{st3} = 6.9$ 6 HA 14

$A_{sa1} = 14.8$ 7 HA 16

$A_{sa2} = 11.4$ 7 HA 14

$A_{sa3} = 6.3$ 7 HA 12

Les espacements sont :

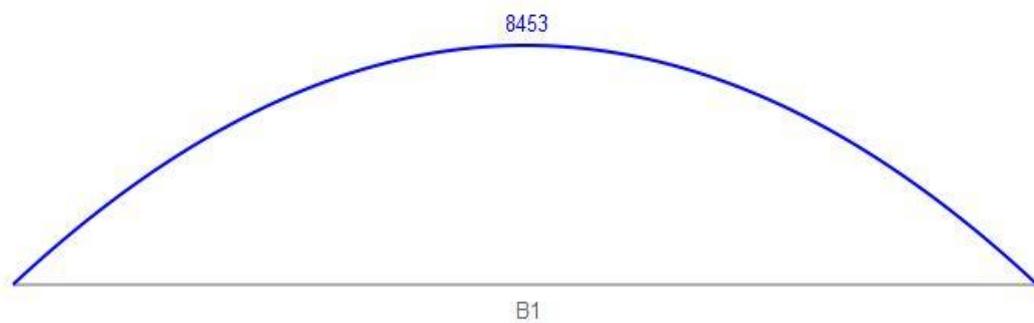
$E_{spt} = 15 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

- Modélisation de la dalle 2

- Modèle suivant lx

Echelle :  2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 84.53 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = M_{u \text{ min}} = - 12.68 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 19.2$ 10 HA 16

$A_{sa} = 2.6$ 7 HA 12

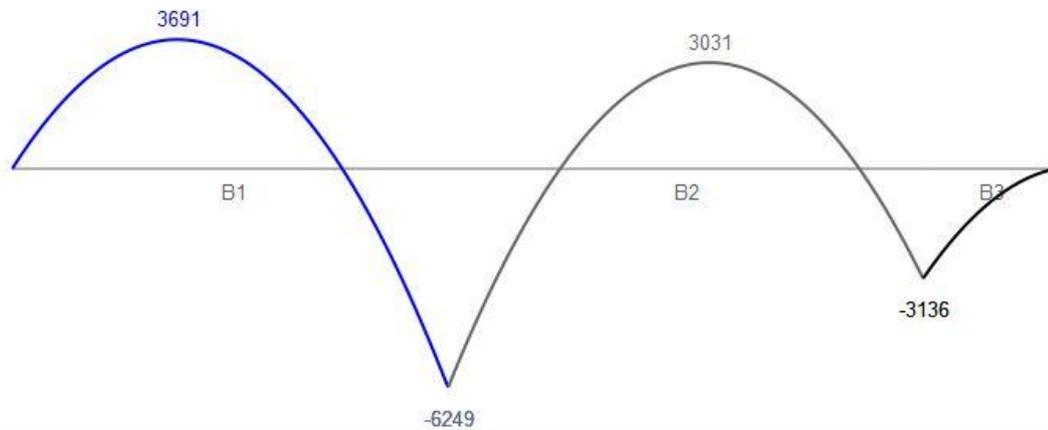
Les espacements sont :

$E_{spt} = 10 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

▪ *Modèle suivant ly*

Echelle : $\frac{2500 \text{ daN.m}}{\text{cm}}$



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 36.91 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 30.31 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = M_{u \text{ min}} = -62.49 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = M_{u \text{ min}} = -31.36 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 7.5$ 6 HA 14

$A_{st2} = 6.1$ 6 HA 12

$A_{sa1} = 13.9$ 6 HA 16

$A_{sa2} = 6.3$ 6 HA 12

Les espacements sont :

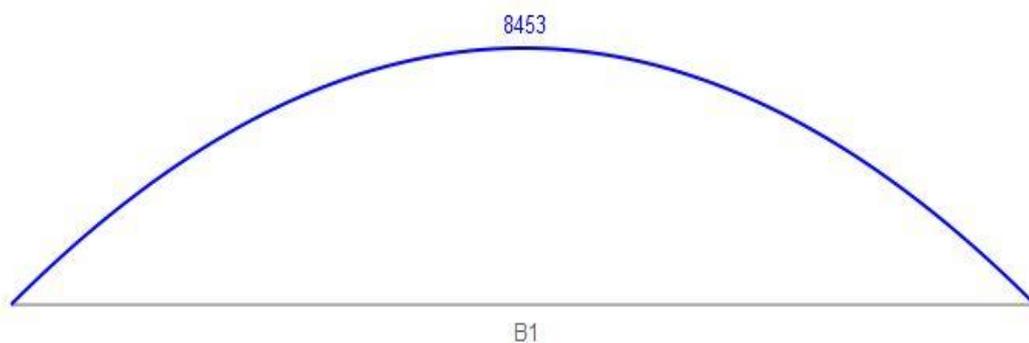
$E_{spt} = 15 \text{ cm}$

$E_{spa} = 15 \text{ cm}$

• Modélisation de la dalle 3

▪ *Modèle suivant lx*

Echelle : $\frac{2500 \text{ daN.m}}{\text{cm}}$



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 84.53 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = -12.68 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 19.2$ 10 HA 16

$A_{sa} = 2.6$ 6 HA 12

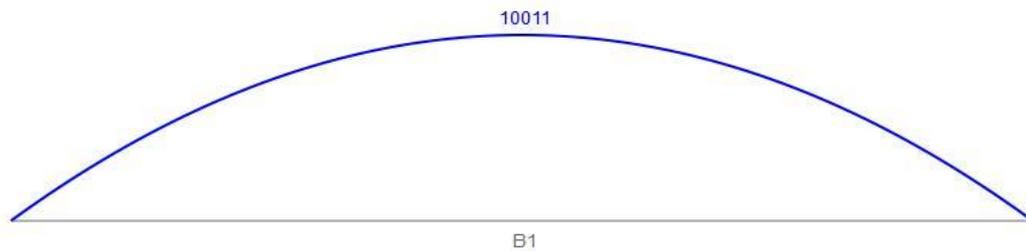
Les espacements sont :

$E_{spt} = 10 \text{ cm}$

$E_{spa} = 16 \text{ cm}$

▪ Modèle suivant l_y

Echelle : 5000 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 100.11 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = -2.9 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 23.8$ 12 HA 16

$A_{sa} = 2.9$ 5 HA 12

Les espacements sont :

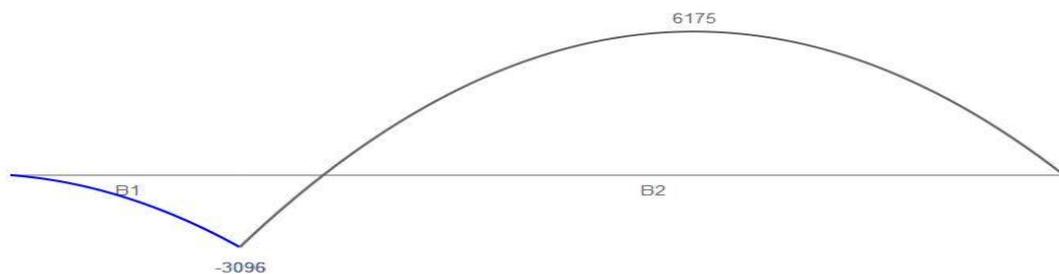
$E_{spt} = 6 \text{ cm}$

$E_{spa} = 19 \text{ cm}$

• Modélisation de la dalle 4

▪ Modèle suivant l_x

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 61.75 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = -30.96 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 13.3$ 6 HA 16

$A_{sa} = 6.3$ 5 HA 14

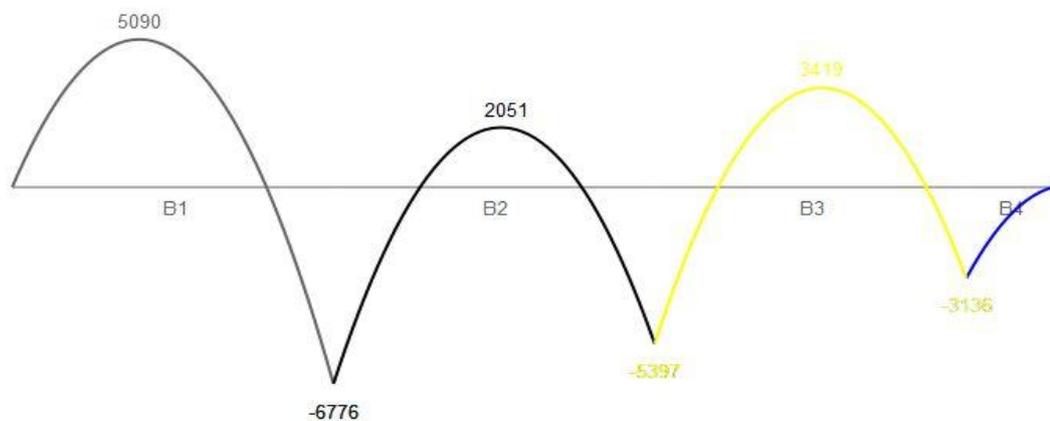
Les espacements sont :

$E_{spt} = 16 \text{ cm}$

$E_{spa} = 19 \text{ cm}$

▪ *Modèle suivant by*

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 50.9 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 20.51 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut3} = 34.19 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = -67.76 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = -53.97 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua3} = -31.36 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 10.7$ 6 HA 14

$A_{st2} = 4.1$ 6 HA 12

$A_{st3} = 6.9$ 6 HA 12

$A_{sa1} = 14.8$ 7 HA 14

$A_{sa2} = 11.4$ 7 HA 12

$A_{sa3} = 6.3$ 7 HA 12

Les espacements sont :

$E_{spt} = 16 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

Annexe 2.3 : Dimensionnement de la structure portante (TVI)

❖ Les charges permanentes :

	<u>ELEMENTS</u>	<u>CHARGES RELATIVES</u>	<u>CHARGE REELES (DaN/m²)</u>
Charges Permanentes	complexe végétal		1041
		végétalisation extensive	20 DaN/m ²
		arbustes (intensif)	60 DaN/m ²
		substrat	1600 DaN/m ³
		filtre anti-racine	1 DaN/m ²
		couche de drainage	2700 DaN/m ³
		artifice de rétention des eaux	20 DaN/m ²
	Complexe d'isolation/étanchéité		1377
		couche d'étanchéité	1 DaN/m ²
		Couche de pare-vapeur	1 DaN/m ²
		forme de pente	2500 DaN/m ³
		Structure portante	2500 DaN/m ³
	Charges forfaitaires		15
		charges forfaitaires	15 DaN/m ²
	Charges équipements		
		chemins de circulation	2500 DaN/m ³
		terrasse de détente	2500 DaN/m ³
		antenne éventuelle	100 DaN/m ³
		Zones stériles	1400 DaN/m ³
		Rebords+écran	2500 DaN/m ³
	Garde-corps	25	

❖ Les charges climatiques :

Elles sont les charges descendantes (la pluie) et les charges ascendantes (le vent). Ces dernières on une valeur de **57 DaN/m²**

❖ Les charges d'exploitation

Pour les toitures végétalisées (toitures-terrasses techniques ou zones techniques) prendre la valeur suivante: **150 DaN/m²**

2 Calculs des dalles

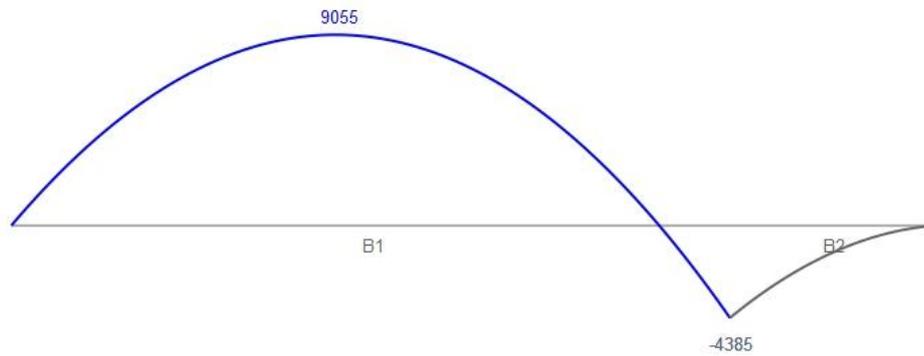
Les moments nous sont donnés par le logiciel « pyBar ». Et la dalle est dimensionnée par les moments maximaux sur la quasi-totalité de la dalle.

Diamètres minimaux a prendre HA10

- Modélisation de la dalle 1

- Modèle suivant lx

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 90.55 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = - 43.85 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 21 \text{ cm}^2$ 7 HA20

$A_{sa} = 9.1 \text{ cm}^2$ 7 HA 14

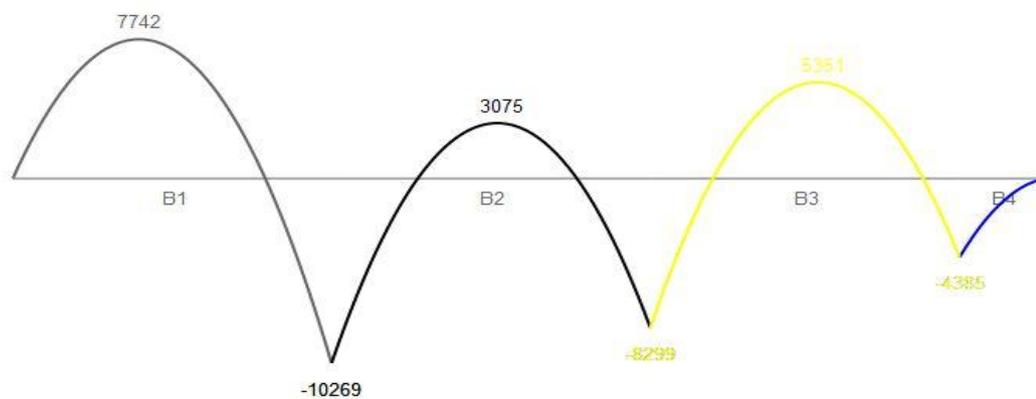
Les espacements sont :

$E_{spt} = 14 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

- Modèle suivant ly

Echelle : 5000 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 77.42 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 30.75 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut3} = 53.51 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = - 102.7 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = - 83.0 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua3} = - 43.9 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 17.3$ 6 HA 20

$A_{st2} = 6.2$ 6 HA 12

$A_{st3} = 11.3$ 6 HA 16

$A_{sa1} = 24.7$ 8 HA 20

$A_{sa2} = 18.8$ 8 HA 20

$A_{sa3} = 9.1$ 8 HA 14

Les espacements sont :

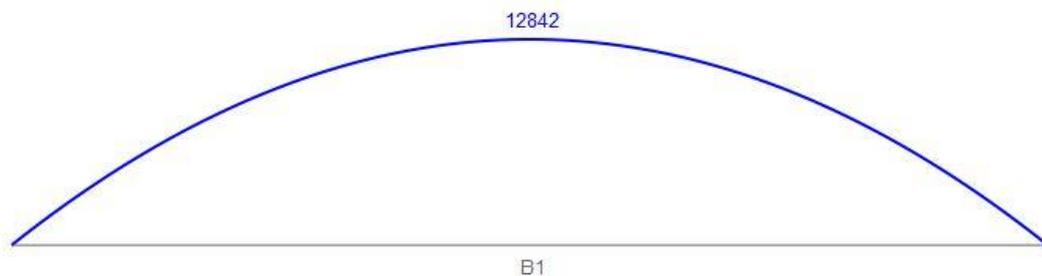
$E_{spt} = 14 \text{ cm}$

$E_{spa} = 12 \text{ cm}$

- Modélisation de la dalle 2

- Modèle suivant l_x

Echelle : 5000 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 128.45 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = M_{u \text{ min}} = -19.5 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 32.9$ 11 HA 20

$A_{sa} = 3.8$ 7 HA 12

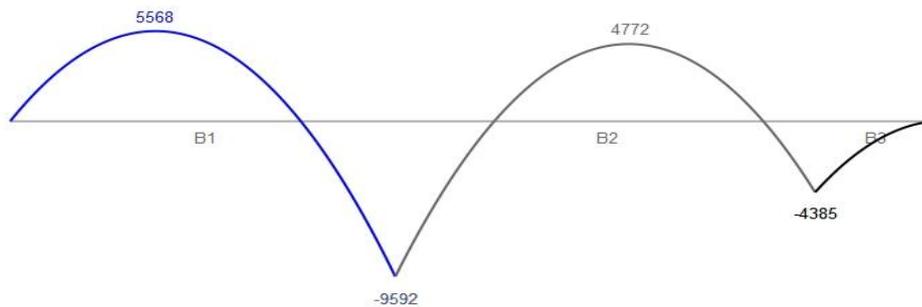
Les espacements sont :

$E_{spt} = 9 \text{ cm}$

$E_{spa} = 14 \text{ cm}$

▪ *Modèle suivant ly*

Echelle : 5000 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 55.68 \text{ KN.m}$

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 47.72 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = M_{u \text{ min}} = -95.92 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = M_{u \text{ min}} = -43.85 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 11.8$ 8 HA 14

$A_{st2} = 10$ 8 HA 14

$A_{sa1} = 22.5$ 8 HA 20

$A_{sa2} = 9.1$ 8 HA 14

Les espacements sont :

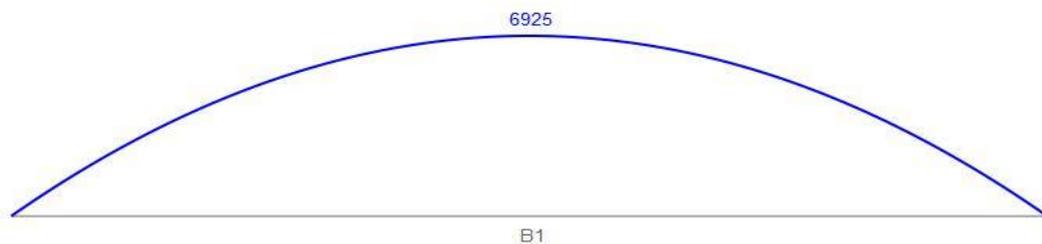
$E_{spt} = 12 \text{ cm}$

$E_{spa} = 12 \text{ cm}$

• *Modélisation de la dalle 3*

▪ *Modèle suivant lx*

Echelle : 2500 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 69.25 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = 10.38 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 15.2$ 8 HA 16

$A_{sa} = 2.6$ 6 HA 12

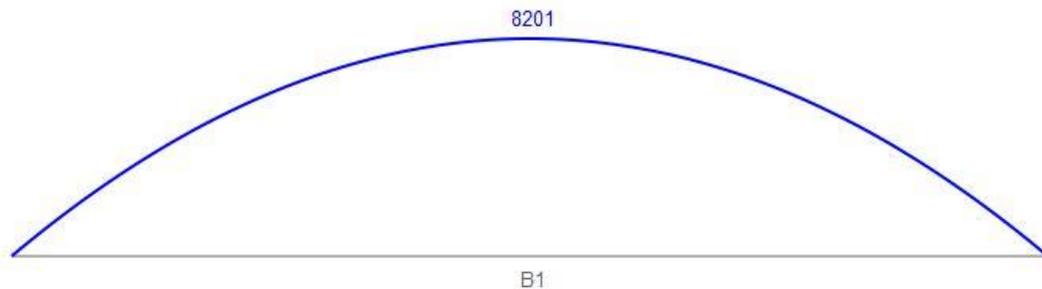
Les espacements sont :

Espt = 11cm

Espa = 16cm

▪ Modèle suivant ly

Echelle : $\frac{2500 \text{ daN.m}}{\text{cm}}$



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 82.01 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = -12.3 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 18.5$ 6 HA 20

$A_{sa} = 2.6$ 5 HA 12

Les espacements sont :

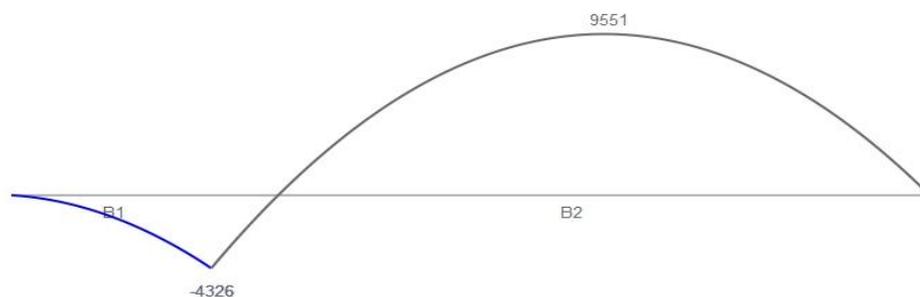
Espt = 16 cm

Espa = 18cm

• Modélisation de la dalle 4

▪ Modèle suivant lx

Echelle : $\frac{5000 \text{ daN.m}}{\text{cm}}$



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut} = 95.51 \text{ KN.m}$

Moment ultime sur appuis $M_{ua} = -43.26 \text{ KN.m}$

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st} = 22.4$ 8 HA 20

$A_{sa} = 8.9$ 6 HA 14

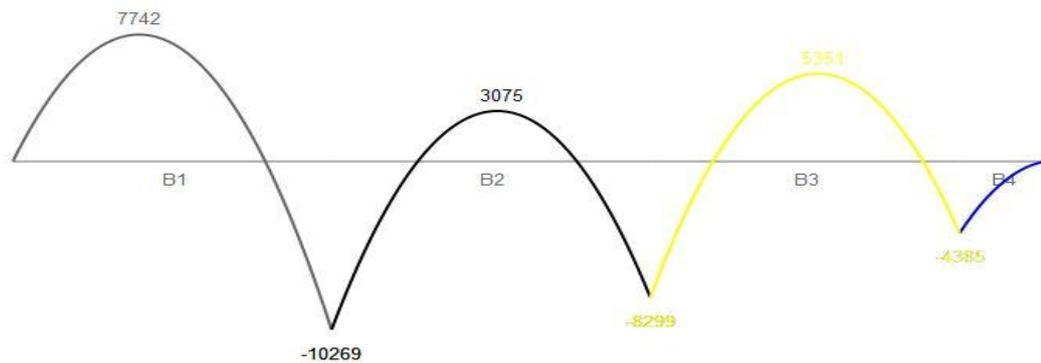
Les espacements sont :

Espt = 16cm

Espa = 18cm

▪ Modèle suivant ly

Echelle : 5000 daN.m



Les moments appliqués :

Moment ultime en travée $M_{ut1} = 77.42$ KN.m

Moment ultime en travée $M_{ut2} = 30.75$ KN.m

Moment ultime en travée $M_{ut3} = 53.51$ KN.m

Moment ultime sur appuis $M_{ua1} = - 102.7$ KN.m

Moment ultime sur appuis $M_{ua2} = - 83.0$ KN.m

Moment ultime sur appuis $M_{ua3} = - 43.9$ KN.m

La section d'aciers par mètre linéaire de dalle est

$A_{st1} = 17.3$ 6 HA 20

$A_{st2} = 6.2$ 6 HA 12

$A_{st3} = 11.3$ 6 HA 16

$A_{sa1} = 24.7$ 8 HA 20

$A_{sa2} = 18.8$ 8 HA 20

$A_{sa3} = 9.1$ 8 HA 14

Les espacements sont :

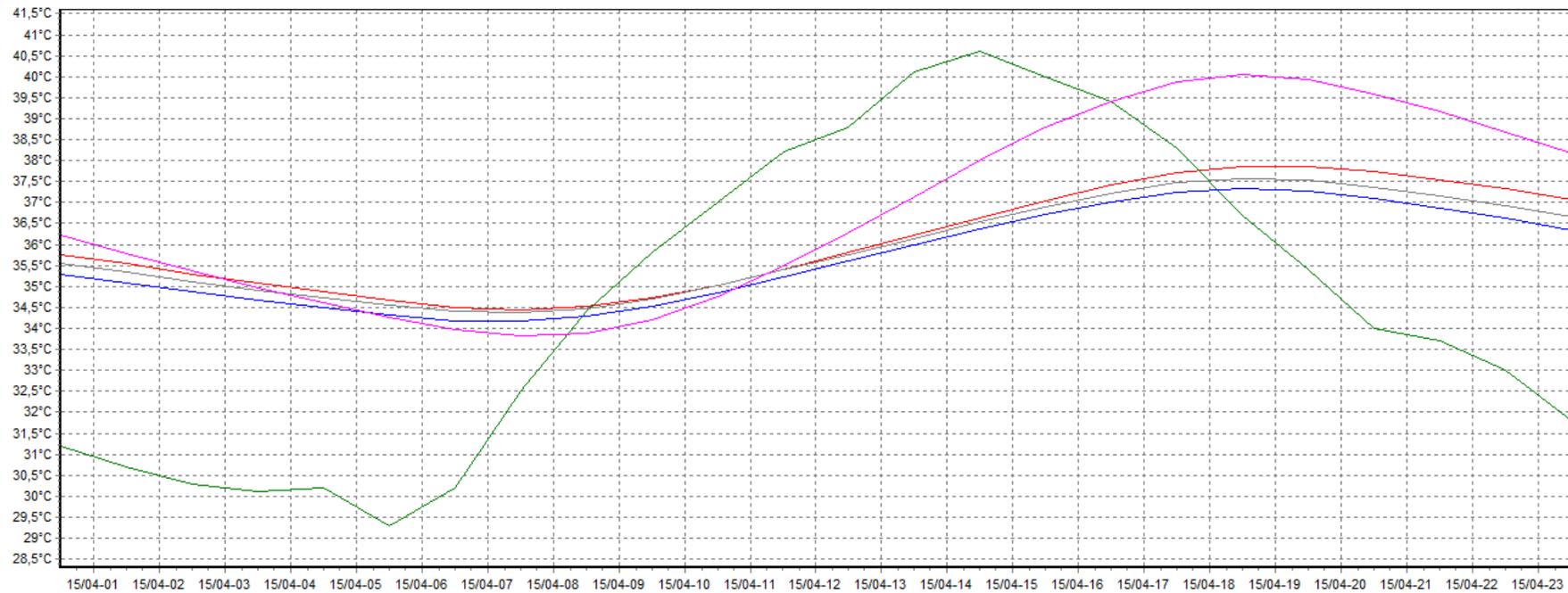
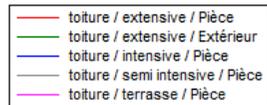
Espt = 14 cm

Espa = 12 cm

ANNEXES 3 : LES SIMULLATIONS SUR COMFIE PLEIADES

Le 15 avril : T°C max :

- Toiture terrasse (20cm de BA) : 40 °C
- Toiture extensive : 37.9 °C
- Toiture semi-intensive : 37.5 °C
- Toiture intensive : 37.3 °C

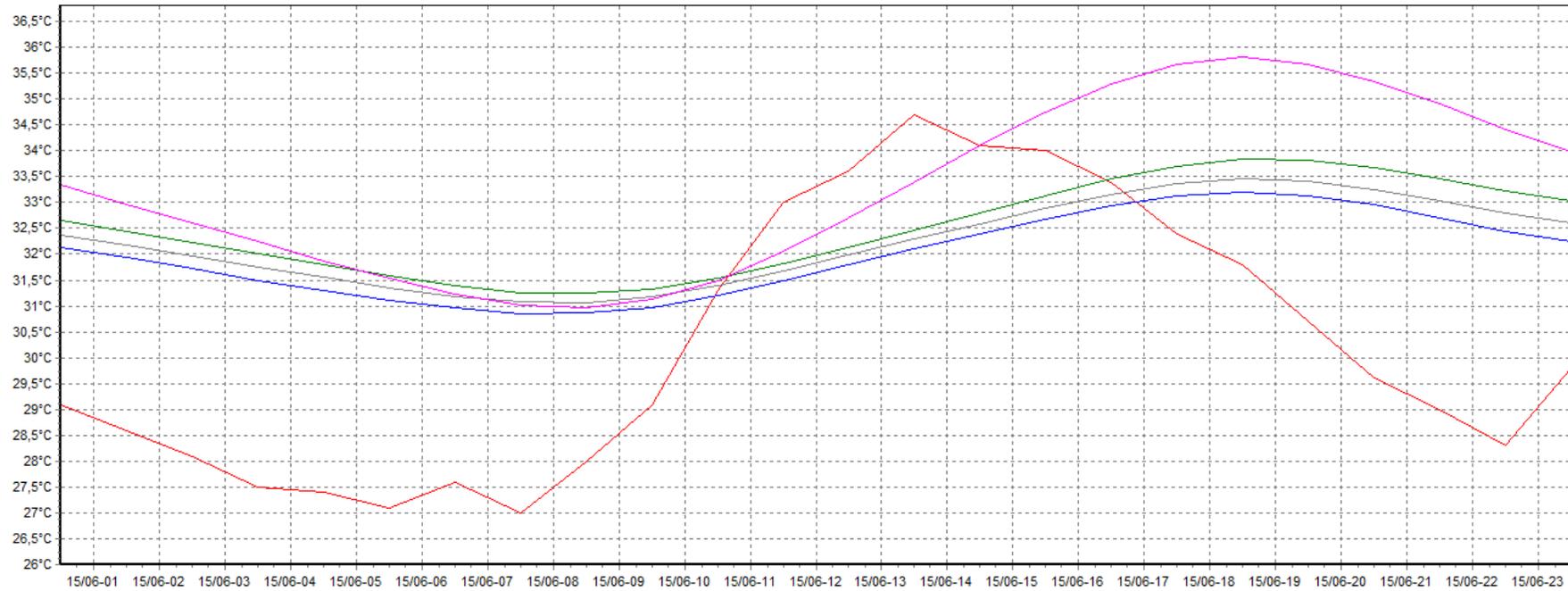


Annexe 3.1 : test N°1 le 15 Avril

Le 15 juin :

- Toiture terrasse : 35.8 °C
- Toiture extensive : 33.8 °C
- Toiture semi-intensive : 33.5 °C
- Toiture intensive : 33.2 °C

— toiture / extensive / Extérieur
— toiture / extensive / Pièce
— toiture / intensive / Pièce
— toiture / semi intensive / Pièce
— toiture / terrasse / Pièce

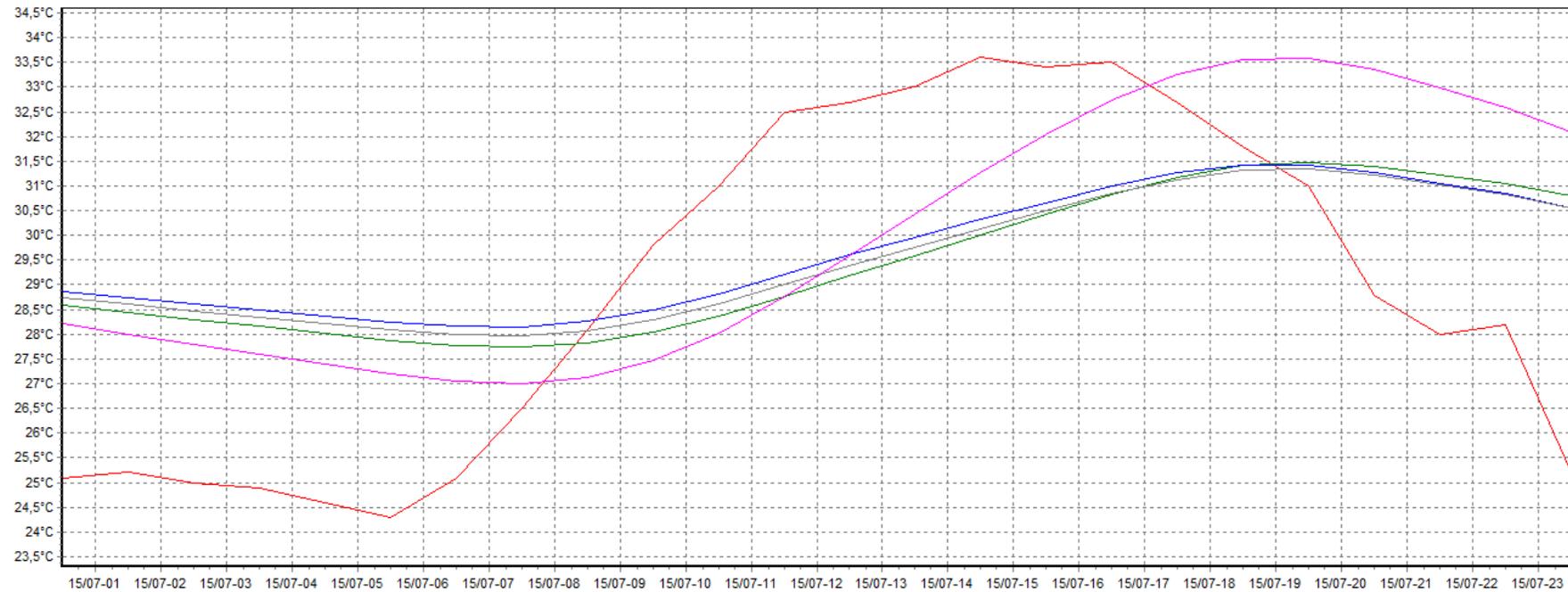


Annexe 3.2 : Test N°2 le 15 Juin

Le 15 Juillet

- Toiture terrasse : 33.6 °C
- Toiture extensive : 31.5 °C
- Toiture semi-intensive : 31.4 °C
- Toiture intensive : 31.4 °C

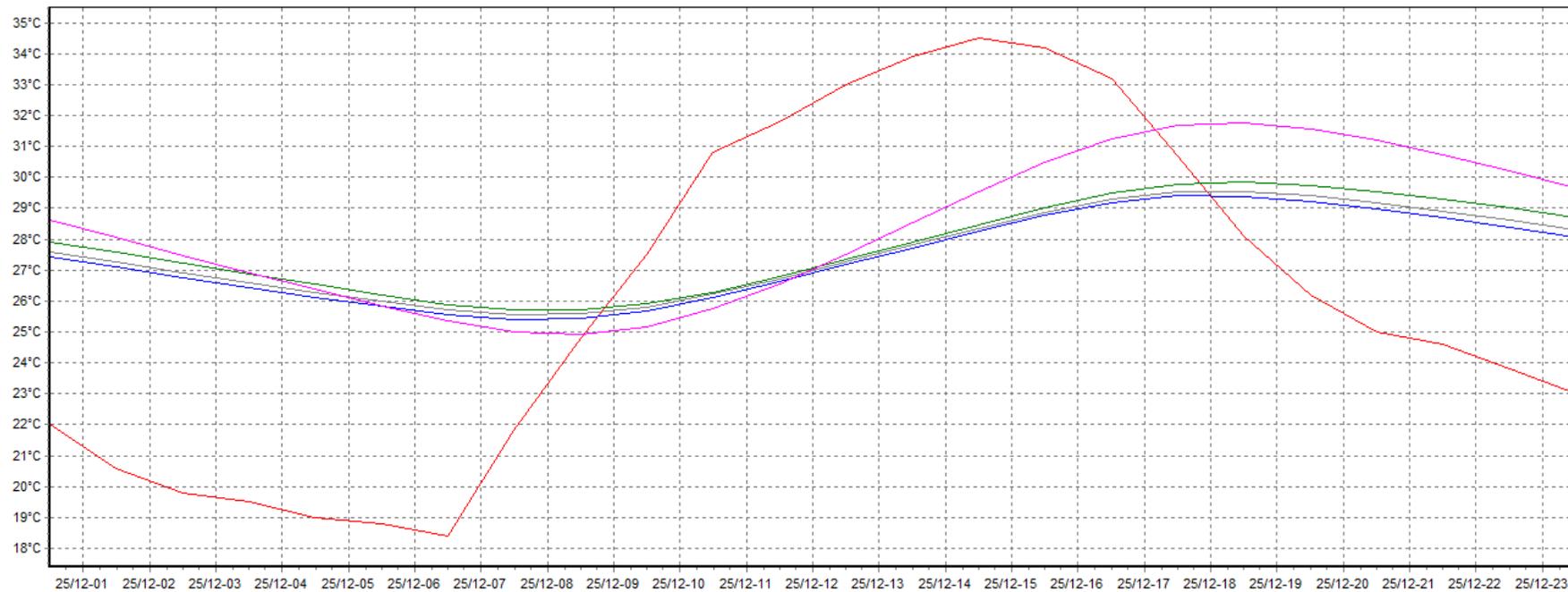
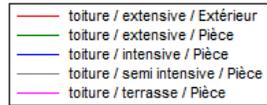
— toiture / extensive / Extérieur
— toiture / extensive / Pièce
— toiture / intensive / Pièce
— toiture / semi intensive / Pièce
— toiture / terrasse / Pièce



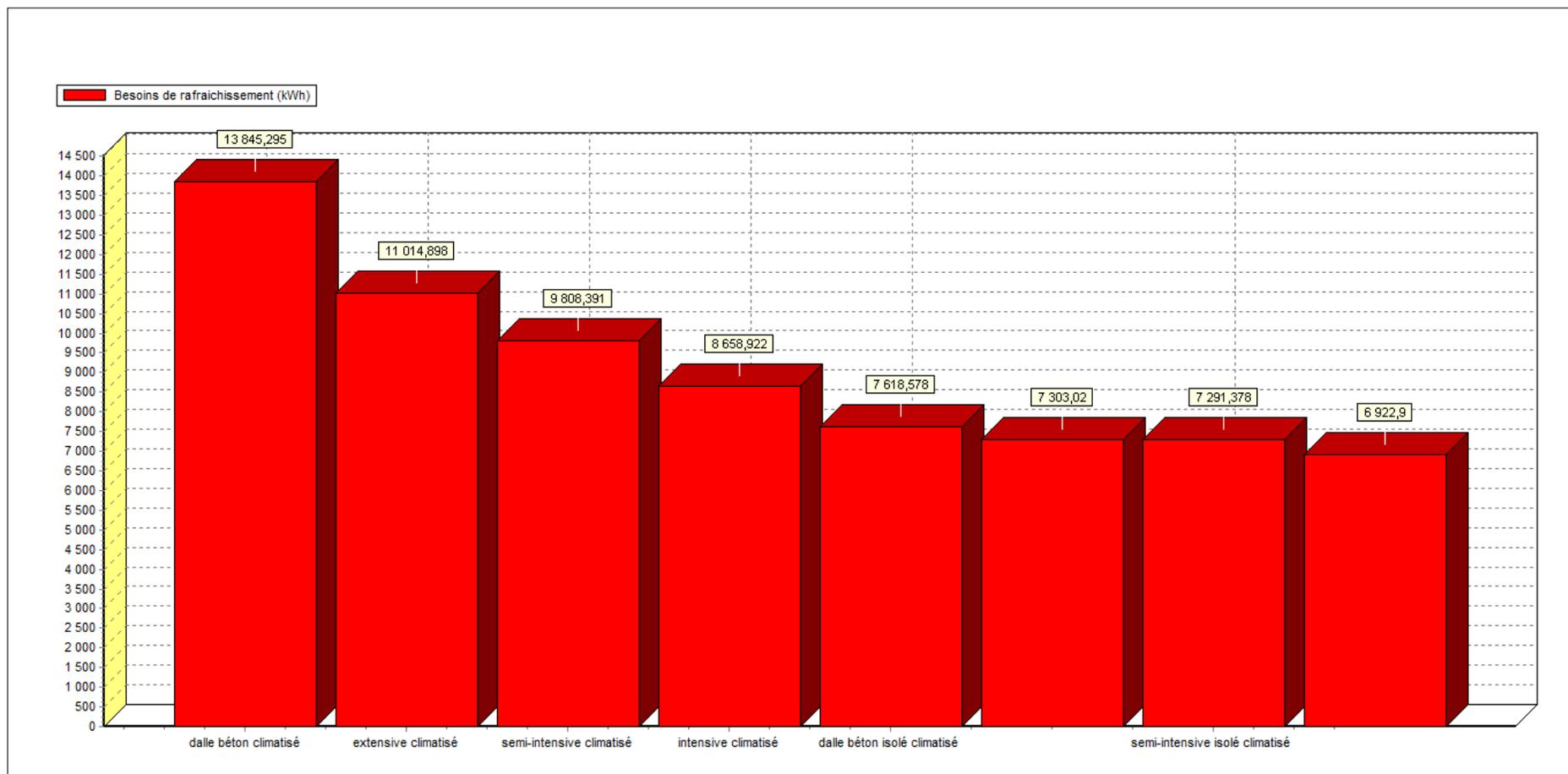
Annexe 3.3 : Test N°3 le 15 Juillet

Le 25 décembre :

- Toiture terrasse : 31.6 °C
- Toiture extensive : 30 °C
- Toiture semi-intensive : 29.5 °C
- Toiture intensive : 29.5 °C



Annexe 3.4 : Test N°4 le 25 Décembre



Annexe 3.5 : Histogramme des besoins en climatisation pour chaque type de toiture

ANNEXES 4 : AVANT METRE ET ESTIMATION DU COUT

Annexe 4.1 : Devis estimatif de la toiture verte extensive

<u>ELEMENTS</u>	<u>UNITES</u>	<u>PRIX UNITAIRES</u>	<u>QUANTITE</u>	<u>COUT TOTAL</u>	<u>CARACTERISTIQUES</u>
complexe végétale				<u>2 503 268,65</u>	
végétalisation	m ²	500	224,02	112010	Gazon
substrat	m ³	15000	28,0416	420624	Substrat monocouche Végétoit MS
filtre anti-racines	m ²	1250	239,27	299086,25	Géotextile
couche de drainage	m ³	11500	33,8256	388994,4	agrégats de granite
artifice de rétention des eaux	m ²	3250	394,63	1282554	grille munie de réservoirs collectant l'eau (30%)
Complexe d'isolation/étanchéité				<u>11 825 385,00</u>	
couche d'étanchéité	m ²	3000	359,57	1078710	face-alu Asphalte (bitume)
forme de pente	m ³	75000	49,329	3699675	mortier en béton
Structure portante	m ³	125000	56,376	7047000	Maçonnerie en BA
Charges équipements				<u>510 713,50</u>	
chemins de circulation	m ³	75000	0,4825	36187,5	Dallettes en Maçonnerie B25
Zones stériles	m ³	11500	4,524	52026	agrégats de granite
entrées d'eaux PVC 125mm, 6m	6m	11000	35	385000	PVC 125mm, 6m
coude PVC 125mm		2500	15	37500	PVC 125mm, 90°
TOTAL (FCFA)				<u>14 839 367,15</u>	
Imprévus				10%	
<u>TOTAL TOITURE VERTE EXTENSIVE (FCFA)</u>				<u>16 323 303,87</u>	

Annexe 4.2 : Devis estimatif de la toiture verte semi-intensive

<u>ELEMENTS</u>	<u>UNITES</u>	<u>PRIX UNITAIRES</u>	<u>QUANTITE</u>	<u>COUT TOTAL</u>	<u>CARACTERISTIQUES</u>
complexe végétal	m ²			<u>3 261 685,90</u>	
végétalisation	m ²	2000	200	400000	gazon + 1 idzoria+ 1 jasmin grimpant
substrat	m ³	15000	58,41	876150	Substrat monocouche Végétoit MS
filtre anti-racine	m ²	1250	251,19	313987,5	Géotextile
couche de drainage	m ³	11500	33,8256	388994,4	agrégats de quartz ou de granite
artifice de rétention des eaux	m ²	3250	394,63	1282554	grille munie de réservoirs collectant l'eau
Complexe d'isolation/étanchéité				<u>13 264 200,00</u>	
couche d'étanchéité	m ²	3000	369,35	1108050	Face-alu bitume Asphalte
forme de pente	m ³	75000	49,33	3699750	mortier en béton
Structure portante	m ³	150000	56,376	8456400	Maçonnerie en BA
Equipements				<u>692 207,50</u>	
chemins de circulation	m ³	75000	0,4825	36187,5	Dallettes en Maçonnerie
Zones stériles	m ³	11500	12,48	143520	agrégats de quartz ou de granite
émergence d'antenne	m ³	75000	1,2	90000	Dalle en maçonnerie
entrées d'eaux PVC 125mm, 6m	6m	11000	35	385000	PVC 125mm, 6m
coude PVC 125mm	-	2500	15	37500	PVC 125mm, 90°
TOTAL (FCFA)				<u>17 218 093,40</u>	
Imprévus				10%	
<u>TOTAL TOITURE VERTE SEMI-INTENSIVE (FCFA)</u>				<u>18 939 902,74</u>	

Annexe 4.3 : Devis estimatif de la toiture verte intensive

<u>ELEMENTS</u>	<u>UNITES</u>	<u>PRIX UNITAIRES</u>	<u>QUANTITE S</u>	<u>COUT TOTAL</u>	<u>CARACTERISTIQUES</u>
Complexe végétal				<u>4 096 568,00</u>	
Végétalisation courante	m ²	2000	173	346000	gazon + 1 idzoria+ 1 jasmin rampant
Végétalisation dense	m ²	1500	8	12000	4 bordures + 1 jasmin
Buissons terrasse	m	1000	15	15000	5 bordures
Arbustes	-	4000	6	24000	washingtonien (palmier)
Substrat	m ³	15000	95,84	1437600	Substrat monocouche Végétoit MS
Filtre anti-racines	m ²	1250	264,87	331090	feutre géotextile
Couche de drainage	m ³	11500	56,376	648324	agrégats de quartz ou de granite
Artifice de rétention des eaux	m ²	3250	394,63	1282554	grille munie de réservoirs collectant l'eau
Complexe d'isolation/étanchéité				<u>16 156 350,00</u>	
Couche d'étanchéité	m ²	3000	393,8	1181400	Face-alu bitume Asphalte
Forme de pente	m ³	75000	49,33	3699750	mortier en béton
Structure portante	m ³	200000	56,376	11275200	Maçonnerie en BA
Equipements				<u>851 075,00</u>	
Chemins de circulation	m ³	75000	1,305	97875	Dallettes en Maçonnerie
Terrasse de détente	m ³	11500	1,8	20700	Dalle en maçonnerie
Emergence d'antenne	m ³	75000	1,2	90000	Dalle en maçonnerie
Zones stériles	m ³	11000	20	220000	agrégats de quartz ou de granite
Entrées d'eaux	6m	11000	35	385000	PVC 125mm, 6m
Coude PVC 125mm, 90°	-	2500	15	37500	PVC 125mm, 90°
TOTAL (FCFA)				<u>21 103 993,00</u>	
Imprévus				10%	
<u>TOTAL TOITURE VERTE INTENSIVE (FCFA)</u>				<u>23 214 392,30</u>	