Travail de Fin d'Etudes

Végétalisation sur structure bois

Béline COSSOU

L'école de l'aménagement durable des territoires

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE

Liberté
Égalité
Fraternité

Tutrice de stage : Magali Mulot, cheffe de projet DGALN/DHUP/QC2

Président de jury : Stéphane HANS, chercheur en Génie Parasismique

Expert : Julien LAMOULIE, ingénieur au FCBA

Date d'édition : 03 / 09 /2020

Résumé

La végétalisation des toitures sur structure bois est aujourd'hui assez rare à observer en France. Elle possède pourtant de nombreux avantages à l'échelle du bâtiment et à celle du quartier.

Le bois est un matériau intéressant techniquement pour ses propriétés mécaniques, sa flexibilité, sa légèreté, et sa facilité de mise en œuvre en préfabrication. Depuis toujours utilisé dans la construction, le dernier siècle a permis de développer de nombreuses nouvelles techniques de travail du bois, avec la colle (lamellé collé, panneau de particules etc…), le cintrage, la préfabrication, les assemblages etc… Un regain récent d'intérêt pour le bois s'explique aussi par ses avantages écologiques, concernant le stockage carbone et la préservation des forêts.

La végétalisation des toitures est aussi une technique ancestrale. Utilisée à l'origine sur les maisons en rondins au nord de l'Europe, elle permettait de rajouter de l'inertie à la structure, la stabiliser face au vent et garantir une isolation thermique. Longtemps délaissée, la végétalisation est remise au goût du jour en raison du confort et des services qu'elle apporte. A l'échelle du quartier, elle retient les eaux pluviales et permet de limiter le risque d'inondations. L'évapotranspiration des plantes permet ensuite de fixer certains polluants présents dans l'air urbain, et a un effet rafraîchissant vis-à-vis des îlots de chaleur. Sur ce dernier point, le bois permet aussi de lutter contre les îlots de chaleur car sa faible inertie lui permet de se rafraîchir rapidement la nuit. La végétalisation permet aussi de réintroduire la biodiversité et les espaces verts en ville, ce qui intéresse de plus en plus d'habitants désireux d'améliorer leur cadre de vie. Cela en fait aussi une solution qui participe à l'atteinte de l'objectif de préservation de la biodiversité du Ministère de la transition écologique. A l'échelle du bâtiment, la végétalisation joue un rôle de régulateur thermique sous certaines conditions. Les études effectuées concernant les apports thermiques de la végétalisation démontrent qu'en général, elle permet d'économiser de l'énergie en comparaison avec un toit classique non isolé.

S'il est intéressant de combiner la végétalisation et la structure bois, c'est d'abord pour pouvoir combiner tous les avantages des deux techniques que nous venons de citer. Les aspects environnementaux prenant de plus en plus d'importance dans le milieu de la construction, il est essentiel de se pencher sur ces nouvelles manières de faire, pour allier le confort de l'habitant à sa sécurité et à l'impact environnemental des bâtiments. La végétalisation et la structure bois sont deux procédés qui ont aujourd'hui beaucoup de cachet, et donnent une image positive et agréable au bâtiment.

Aujourd'hui, les techniques courantes ne permettent pas d'effectuer de la végétalisation intensive des toitures sur structure bois. Cela en raison de la surcharge importante générée par la végétalisation et mal supportée par le bois. En effet, alors qu'une végétalisation très légère implique environ 30 kg/m^2 de charges supplémentaires, une toiture intensive dépasse les 350 kg/m^2 de charges supplémentaires. Ainsi, si l'on considère une structure poteaux-poutres dimensionnée à l'ELU, couvrant 12mx12m avec un poteau à chaque coin du carré, on constate que l'ajout d'une toiture jardin implique d'utiliser environ 2,5 fois plus de bois en structure que si la toiture était nue. Ainsi, non seulement les toitures intensives sont chères en elles même par le prix du complexe de végétalisation, mais elles impliquent d'augmenter la quantité de bois de charpente, et comme aucune technique courante ne préconise cette technique, on imagine aussi des surcoûts d'assurance.

Toutes ces contraintes à la mise en place de végétalisation de toiture sur structure bois empêchent son développement, d'autant plus chez les particuliers. Pour pallier à ces problématiques, il est important de mettre en évidence les réels avantages de cette combinaison. La multiplication d'études sur les impacts thermiques et environnementaux de la végétalisation et de la structure bois devraient avoir un rôle important à jouer dans cette valorisation. Un autre levier possible pour permettre de généraliser ce type de construction serait la mise en place d'aides financières ou règlementaires incitant leur développement.

Summary

The greening of roofs on a wooden structure is now quite rare to see in France. However, it has many advantages at the scale of the building and the neighborhood.

Timber is a technically interesting material for its mechanical properties, its flexibility, its lightness, and its ease of use in prefabrication. Always used in construction, the last century has allowed the development of many new techniques of woodworking, with glue (glued laminated timber, particle board etc ...), bending, prefabrication, assemblies etc ... A recent re-interest in timber can also be explained by its ecological advantages, concerning carbon storage and forest preservation.

The greening of roofs is also an ancestral technique. Originally used on log houses in northern Europe, it added inertia to the structure, stabilized it against the wind and guaranteed thermal insulation. Neglected during a long time, greening has been brought up to date because of the comfort and services it provides. At the neighborhood scale, it retains rainwater and limits the risk of flooding. The evapotranspiration of the plants then helps to fix some pollutants present in the urban air, and has a cooling effect for heat islands. On this last point, wood also helps to fight against heat islands because its low inertia allows it to cool down quickly at night. Greening also makes it possible to reintroduce biodiversity and green spaces in the city, which is the wish of more and more residents who want to improve their living environment. This is also a solution that contributes to achieve the objective of preserving biodiversity of the Ministry of Ecological Transition. At the building scale, revegetation is a thermal regulator under some conditions. Studies carried out on the thermal contributions of revegetation show that in general, it saves energy compared to a conventional uninsulated roof.

If it is interesting to combine the vegetation and the wooden structure, it is first of all to be able to combine all the advantages just mentioned of the two techniques. As environmental aspects are increasingly important in the construction industry, it is essential to look into these new ways of doing, to combine the comfort of the inhabitant with their safety and the environmental impact of buildings. The greening and the wooden structure are two processes which today have a lot of character, and give a positive and pleasant image to the building.

Today, current techniques do not allow intensive greening of roofs on wooden structures. This is due to the significant overload generated by the vegetation and not well supported by timber. Indeed, while very light greening involves around 30 kg / m^2 of additional loads, an intensive roof exceeds 350 kg / m2 of additional loads. If we consider a beam-column structure dimensioned at the Eurocodes, covering 12mx12m with a column at each corner of the square, one sees that the addition of a garden roof implies using about 2.5 times more timber structure than without greening. Thus, intensive roofs are expensive due to the price of the greening complex, but they increase the quantity of structural timber, and because no current technique recommends that, one can also imagine additional costs with insurance.

All these constraints to the installation of greening roofs on a wooden structure prevent its development, especially for little constructors. To overcome these problems, it is important to highlight the real advantages of this combination. The proliferation of studies on the thermal and environmental impacts of greening and using timber should have an important role to play in this enhancement. Another possibility to make possible the generalization of this type of construction would be the establishment of financial or regulatory aid to encourage their development.

Remerciements

Ce stage a été effectué entièrement pendant la pandémie de coronavirus 2020. Pendant le confinement qui a été une période difficile dans le milieu de la construction, il n'a pas été aisé de trouver un organisme d'accueil pour mon travail de fin d'études. J'ai malgré tout réussi à construire et mener ce travail avec des personnes intéressantes et attentionnées. Tout cela ne se serait pas fait sans :

Magali Mulot, cheffe de projet au sein de la DGALN, qui a encadré ce travail de fin d'études avec beaucoup d'efficacité. Ses conseils m'ont d'abord aidé à orienter le sujet d'études, puis sa présence tout le long de mon stage m'a permis d'avancer dans mes recherches et d'obtenir des contacts. Je la remercie sincèrement pour sa sympathie et sa confiance en moi dès le début du stage.

Stéphane Hans, professeur à l'ENTPE, qui a su m'accompagner dans ma recherche de stage, et qui a aussi été disponible tout au long du TFE.

Julien Lamoulie, ingénieur au sein du FCBA, qui m'a grandement aidé dans mes recherches par le partage de son expérience professionnelle. Les entretiens qu'il m'a accordés m'ont permis de beaucoup avancer dans la compréhension des techniques actuelles et des problématiques qui se posent.

Sophie Rousset-Rouvière, déléguée générale de l'Adivet, qui a su montrer de l'intérêt pour mon projet, et qui m'a beaucoup aidé par ses partages de documents et de connaissances.

Lise Boussert, membre du CSFE, qui elle aussi m'a accordé du temps à partager son point de vue et ses expériences en tant que professionnelle dans le domaine.

Je remercie également tous les membres du QC2, qui ont su m'accueillir au sein de leur groupe malgré le télétravail. En particulier, je remercie David Delcros qui a suivi mes études avec intérêt, et Laure Trannoy pour sa relecture et ses conseils de rédaction.

Enfin, je remercie mes parents et mes frères pour m'avoir soutenue tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Table des matières

I) Enjeux de l'utilisation de la structure bois et de la végétalisation des toitures, et problématiques posées par la combinaison des deux procédés. 10
1. Le bois 11
a. Généralités sur le matériau et son comportement mécanique 11
b. Histoire de l'architecture 15
c. Le marché en France 19
2. Végétalisation 20
a. Avantages de la végétalisation 20
b. Historique et marché en France 22
3. Végétalisation sur structure bois 24
a. Différents types de végétalisation et problèmes pour leur mise en place sur structure bois 24
b. Présentation de bâtiments et projets existants utilisant la végétalisation sur structure bois 27
II) Surcharge : Un dimensionnement de structure à adapter et des coûts liés 38
1. Introduction au dimensionnement 39
a. Présentation des éléments de charpente et du dimensionnement à l'Eurocode 39
b. Présentation du programme de dimensionnement 40
2. Modèles de simulation et résultats 42
a. Plaques 42
b. Structure complète 44
c. Solutions constructives 49
3. Piste potentielle d'optimisation du dimensionnement : prise en compte du climat 53
4. Etude sismique 55
a. Introduction aux principes généraux du Génie Parasismique 55
b. Risque sismique de la végétalisation 55
III) Humidité et chaleur : les risques et les atouts de la végétalisation sur structure bois 59
1. L'eau : Un danger pour le bois 60
a. Présentation des risques 60
b. Etanchéité des toitures terrasses 61
2. Bénéfices sur le climat extérieur 63
a. Problématique des îlots de chaleur 63
b. La végétalisation absorbe les radiations et rafraîchit l'air ambiant 64
c. Autres avantages liés à la capture de l'humidité par la végétalisation 65
3. Conséquences sur le confort intérieur 66

a. Performances isolantes de la végétalisation 66
b. Les effets de la structure bois 73
4. Leviers pour inciter à la végétalisation 75
1. Annexe 1 : Valeurs caractéristiques des bois 84
2. Annexe 2 : Organigramme : Principe de vérification à l'Eurocode 85
3. Annexe 3 : Boucle de dimensionnement VBA 86
4. Annexe 4 : Classe de service [1] 87
5. Annexe 5 : Catégorie de bâtiments 88
6. Annexe 6 : Classe de résistance des panneaux KLH 89
7. Annexe 7 : Caractéristiques techniques de la salle d'expérimentation de l'étude énergétique [40] [50] .. 90
8. Annexe 8 : Résultat complet du calcul de charpente avec poteaux 91
9. Annexe 9 : Plans des modèles 92

Table des illustrations

Figure 1 : Composition d'un tronc [1] 11
Figure 2 : Directions du matériau [1] 11
Figure 3 : Formule imagée de la fabrication du bois [1] 12
Figure 4 : ACV des différents matériaux de construction, chiffres de l'ADEME 2014 [6] 13
Figure 5 : La maison en rondins finlandaise ; (Source : Maison de bois, Architecture Scandinaves, Thérèse et Jean Marie bresson [10]) 15
Figure 6 : Carte du mode d'utilisation traditionnel du bois dans la construction en France 16
Figure 7 : Photographies du Savill Building (copyright Glen Howells Architects [12]) 17
Figure 8 : Photographies de la halle sportive de Tarnos (copyright ALC architectes [13]) 18
Figure 9 : Photographies de la résidence Brock Commons (pendant et après le chantier) (copyright Acton Ostry [14]) 18
Figure 10 : Origine du bois des constructions françaises en 2018 (données issues de [18]) 19
Figure 11 : Photographies : pôle Bienvenüe à Champs sur Marne à gauche ; école d'art de Singapour à droite (sources google images) 21
Figure 12 : Photographie d'un relief du palais Sennachérib à Ninive (source Arte [56]) 22
Figure 13 : Photographie d'une ferme Islandaise, Tommy Bee, 2008, (source Wikipédia [55]) 22
Figure 14 : Illustrations d'une partie du projet cité Wagner (images de l'Atelier Ott-Collin [29][30]) 27
Figure 15 : Photographies du Naturoptère de Sérignan-du-Comtat (photographies Arch'eco [51] [52]) 27
Figure 16 : Extension en ossature bois et végétalisation dans un village balnéaire (source Adivet ; photographies Isochape [65]) 28
Figure 17 : Photographie du toit de la maison (copyright Yoann Alexandrowitsh [20]) 29
Figure 18 : Photographies du restaurant scolaire de Noisiel (source Adivet ; photographies Dynergis [26][27]) .. 29
Figure 19 : Photographie de l'école maternelle de Rosny-Sous-Bois (source ecovegetal.com [43]) 30
Figure 20 : Photographies du restaurant de Metz (Images de KL-Architectes [23]) 30
Figure 21 : Photographies des maisons à Oignies (source Adivet ; photographies XDrône - Etienne Demester [24] [25]) 31

Figure 22 : Photographie de la maison au Cheix-sur-Morge (Photographie de Fernand Ribeiro [28])..... 31
Figure 23 : Photographie de la maison passive de Toulouse (copyright Stéphane Brugidou [68])..... 32
Figure 24 : Photographie et photographie de maquette du Spiral Garden (photographies Kaori Ichikawa [31] [32])
..... 33
Figure 25 : Photographies de la maison des associations de Trangé (copyright A2A architectes [69])..... 33
Figure 26 : Représentations du futur marché couvert de Saint Dizier (Images de Christophe Aubertin et Aurélie Husson [46])..... 34
Figure 27 : Type de végétalisation des exemples français 35
Figure 28 : Raisons invoquées de végétalisation des exemples 35
Figure 29 : Images de synthèse de l'immeuble "Aurore", dessiné par l'architecte Kengo Kuma [39] 36
Figure 30 : Image de synthèse du village des JO 2024; crédit photo Secteur E_Groupement Nexity SA-Eiffage Immobilier IDF [38] 36
Figure 31 : Maître d'ouvrage des exemples français..... 36
Figure 32 : Photographie d'un toit terrasse en bois en construction (source google images [33]) 39
Figure 33 : Photographies de panneaux OSB et CLT 39
Figure 34 : Diagrammes des efforts des panneaux en fonction du nombre de travées par panneau 42
Figure 35 : Schéma d'une plaque sur deux appuis..... 43
Figure 36 : Résultats de calculs pour les plaques..... 43
Figure 37 : Dessin du système pour m=4 44
Figure 38 : Coupes des différentes situations..... 44
Figure 39 : Résultats pour la structure complète, quantité totale de bois utilisé (m^3) en fonction de la charge de végétalisation..... 46
Figure 40 : Paramètres des courbes de résultats pour la structure complète : Ordonnée à l'origine (m^3) et coefficient directeur (m^5/kg) en fonction du nombre de poteaux par m^2. 47
Figure 41 : Paramètres des courbes de résultats pour la structure complète : Ordonnée à l'origine (m^3) et coefficient directeur (m^5/kg) en fonction du nombre de poteaux par m^2 ; représentation schématique de l'allure des courbes..... 48
Figure 42 : Naturoptère dans le Vaucluse ; Agence d'Architecture Arch'eco en association avec Yves Perret (sources [51] [52])..... 49
Figure 43 : Marché couvert de saint Dizier ; Architectes Christophe Aubertin et Aurélie Husson (source [46])..... 49
Figure 44:Restaurant universitaire de Metz ; Agences MiLLieux Architecture et KL Architectes (source [23])..... 49
Figure 45 : Coupes du système avec les jambes de force pour m=2 et m=3 50
Figure 46 : Résultats de calculs pour la charpente complète avec les jambes de force. Quantité minimale de bois à utiliser (m^3) en fonction de la charge de végétalisation. 51
Figure 47 : Paramètres des courbes de résultats pour la structure complète avec les jambes de force : Ordonnée à l'origine (m^3) et coefficient directeur (m^5/kg) en fonction du nombre de poteaux par m^2. 52
Figure 48 : Circuit de l'eau dans un toit végétalisé 54
Figure 49 : Période propre de la structure dimensionnée à l'Eurocode en fonction de la charge de végétalisation.
..... 56
Figure 50 : Schéma de la structure pour m=4 avec 10 étages 57
Figure 51 : Dimensionnement à l'Eurocode du cas m=4 pour plusieurs étages ; quantité de bois totale (m3) en fonction de la charge de végétalisation (kg/m2)..... 57
Figure 52 : Période propre de la structure en bois en fonction de la charge de végétalisation en toiture et dépendant du nombre d'étages. 58
Figure 53 : Photographie de mérule pleureuse 60
Figure 54 : Solutions de mise en oeuvre de l'étanchéité des toitures (schémas issus d'un document du cofidab [67])..... 61

Figure 55 : Coupe schématique de visualisation des températures en 2008 pour une nuit de canicule (type été 2003) [47] 63
Figure 56 : Schémas de répartition d'énergie entre un toit végétalisé et un toit en bitume noir. Chiffres issus d'une étude Berlinoise de 2000 [44], pourcentages d'énergie journalière moyenne en Wh. 64
Figure 57 : Evapotranspiration annuelle pour des toits végétalisés intensifs, semi-intensifs et extensifs [40] 65
Figure 58 : Besoins d'énergie durant les périodes de chauffage et de refroidissement pour les trois différents types de végétalisation sur la salle technique de son Gulbenkian [40] 67
Figure 59 : Besoins d'énergie en périodes de chauffage et de refroidissement (axes) et utilisation d'énergie annuelle (taille des bulles) (kWh/m2/an) pour les trois types de toits végétalisés sur la salle technique de son. [38] 67
Figure 60 : Besoins d'énergie pour période de chauffage (a) et période de refroidissement (b), avec XPS l'épaisseur du polystyrène. [40] 68
Figure 61 : Economies d'énergie d'un toit végétalisé en comparaison avec un toit blanc [50] 68
Figure 62 : Economies d'énergie d'un toit végétalisé en comparaison avec un toit noir [50] 69
Figure 63 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et la climatisation (kWh/m^2/an) en fonction de l'épaisseur d'isolant (cm) ; climat océanique [63] 70
Figure 64 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et la climatisation, 10cm d'isolant ; différents climats [63] 71
Figure 65 : Comportement des bâtiments bois CLT et béton pendant une période de fortes chaleurs correspondant aux conditions de la canicule de 2003 (température dans une chambre à coucher : chambre n°2 T3 101) (source étude Woodeum Pouget [8]) 74

Table des tableaux

Tableau 1 : Calcul de portée théorique [1] 14
Tableau 2 : Les différents types de végétalisation [20][21][22] 24
Tableau 3 : Liste des exemples 34
Tableau 4 : Calcul pour modélisation de charpente 45
Tableau 5 : Lecture Figure 60 72

Introduction

Dans le contexte actuel où l'impact environnemental de nos bâtiments prend de l'importance aux yeux des habitants, des constructeurs, et des politiques, on se tourne peu à peu vers l'utilisation de techniques et de matériaux capables de limiter cet impact. L'utilisation du béton armé dont la fabrication (notamment lors de la cuisson du clinker qui sert à la fabrication du ciment) dégage beaucoup de CO_2, est un sujet en recherche d'améliorations. Plusieurs alternatives existent aujourd'hui en termes de bétons écologiques, comme ceux utilisant du ciment à base de laitier, un déchet de métallurgie capable de remplacer le clinker. Une autre alternative au béton est l'utilisation de matériaux biosourcés et géosourcés. Parmi eux, le bois utilisé depuis longtemps dans la construction, présente des performances mécaniques intéressantes en traction en en compression. De plus il est assimilable au béton dans sa capacité de préfabrication en usine. Il est aujourd'hui beaucoup apprécié pour sa légèreté qui permet entre-autre de créer des extensions et des surélévations aux bâtiments déjà existants.

Le bois est aussi très flexible. Cela constitue un avantage dans le milieu du génie parasismique car il est capable de reprendre de grandes déformations sans se casser. En revanche, cela empêche les structures en bois de porter des charges trop lourdes, et cela est un inconvénient pour la végétalisation des toitures.

La végétalisation des toitures pourtant, présente de nombreux bénéfices thermiques et environnementaux compatibles avec ceux du bois, qui pourraient contribuer à améliorer le confort en ville. En effet, en plus d'avoir un rôle esthétique agréable, la végétalisation des toitures permettrait de lutter contre les îlots de chaleur, de fixer certains polluants, et d'éviter les inondations dues aux fortes pluies.

Dans ce rapport nous vous proposons d'abord de nous pencher sur les enjeux de la végétalisation sur structure bois. Pour cela nous traiterons l'historique et la place dans le marché des deux procédés, puis nous verrons quelles sont les préconisations actuelles, illustrées par quelques exemples d'ouvrages existants.

Ensuite, nous tenterons d'évaluer sur des structures simples, quel est le surcoût en terme de quantité de bois, engendré par la mise en place d'une végétalisation de toiture. Nous analyserons aussi quelles sont les différentes alternatives qui permettraient de faire des économies à ce niveau.

Enfin, nous creuserons avec un peu plus de précision quels sont les risques et les avantages thermiques à combiner la végétalisation des toitures et la structure bois. Pour cela, nous comparerons plusieurs résultats d'études effectuées sur l'action sur le climat intérieur et extérieur, du bois et de la végétalisation. Nous conclurons cette étude par les différentes préconisations qui découleront de nos résultats d'analyse.

I) Enjeux de l'utilisation de la structure bois et de la végétalisation des toitures, et problématiques posées par la combinaison des deux procédés.

1. Le bois

a. Généralités sur le matériau et son comportement mécanique

○ *Biologie*

Un tronc de bois est constitué essentiellement du duramen et de l'aubier. L'Aubier étant la partie encore « en croissance » de l'arbre, il est plus ou moins imprégnable et peu résistant aux larves et aux champignons. La figure ci-dessous montre la coupe transversale d'un chêne, à savoir que l'aubier n'est pas toujours différenciable par sa couleur selon l'essence de l'arbre. (1)

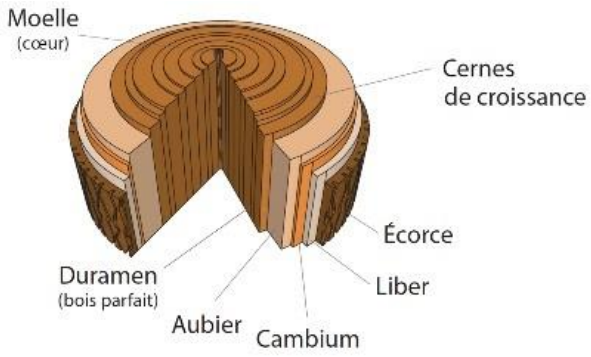


Figure 1 : Composition d'un tronc (1)

Le bois est un matériau anisotrope, et ce comportement est expliqué par sa composition microscopique. En effet, son mode de croissance en fait un matériau « orienté » dans lequel on distingue trois directions. (2)

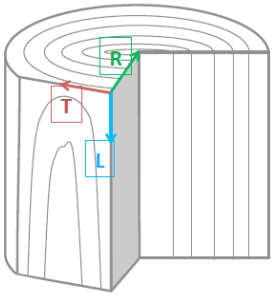


Figure 2 : Directions du matériau (1)

La direction longitudinale correspond à l'axe du tronc (de la branche ou de la racine), la direction tangentielle est tangente aux cernes de croissance, enfin la direction radiale est perpendiculaire aux deux autres directions et passe par le centre biologique de l'arbre.

L'arbre utilise un processus de croissance dans lequel le bois joue un rôle essentiel de conducteur de sève. Les racines récupèrent l'eau et les sels minéraux présents dans la terre et les transforment en sève brute. La sève brute monte par le tronc jusqu'aux feuilles. Ces dernières captent la lumière et le CO_2 et utilisent la sève brute dans leur processus de photosynthèse pour créer la sève élaborée.

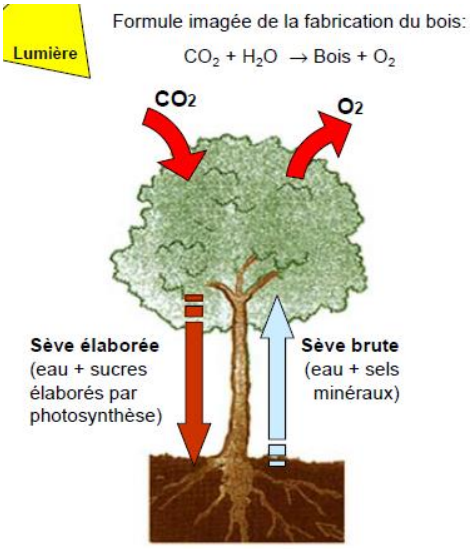


Figure 3 : Formule imagée de la fabrication du bois [(1)]

Le bois est alors constitué de cellules conductrices de sève brute. Les systèmes de conduction sont différents selon la variété d'arbre, et vont avoir un impact important sur ses propriétés physiques et mécaniques.

Ces différences de système de conduction s'expliquent par une nécessité de performance en terme de débit de sève (loi de Poiseuille [(2)(3)]), liée à une nécessité de protection face aux températures extrêmes (embolies hivernales). Ainsi, on peut vulgariser ces stratégies en disant que les feuillus utilisent peu de gros vaisseaux pour conduire la sève, alors que les résineux utilisent beaucoup de petits vaisseaux. Les résineux sont en conséquence plus poreux et plus légers que les feuillus. La masse volumique moyenne d'un résineux communément utilisé en construction va de 350 à 520 kg/m^3 selon la classe de résistance, tandis que celle d'un feuillus issu de forêt tempérée varie de 570 à 960 kg/m^3. [(4)]La résistance mécanique d'un bois augmentant avec sa masse volumique, les feuillus sont en moyenne plus résistants que les résineux.

- *Ecologie*

Pour réaliser sa photosynthèse, l'arbre utilise du dioxyde de carbone et de l'eau pour produire du bois et du dioxygène. On estime que pour produire 1m3 de bois, un arbre consomme entre 800 et 1000 kg de dioxyde de carbone et relâche entre 500 et 600 kg d'oxygène. De plus, l'écosystème forestier stocke du carbone dans les arbres sur pieds mais aussi dans le sol. Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, cela fait donc du bois un matériau doublement intéressant puisque, d'une part, la préservation des forêts est bénéfique pour la biodiversité, et d'autre part, l'exploitation du bois permet de stocker du dioxyde de carbone.

Selon les chiffres de 2014 donnés par l'ADEME [(6)], le coût total de l'exploitation du bois, comprenant le tronçonnage, le débardage, le sciage, le transport etc.… s'élève alors à 36,6 kg de CO_2 par tonne de bois.

Le bois reste le matériau le moins cher en termes d'émissions de CO_2, quel que soit son mode d'exploitation.

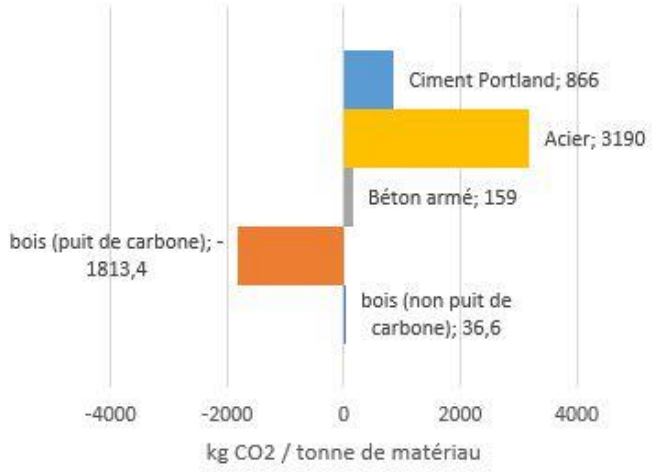


Figure 4 : ACV des différents matériaux de construction, chiffres de l'ADEME 2014 [6]

Le bois est considéré comme un puits de carbone s'il répond à deux conditions. D'abord la forêt dont il est issu doit être replantée, sinon le carbone stocké par l'arbre est seulement déplacé. La deuxième condition concerne la durée de vie de l'objet fabriqué. En effet, un élément de charpente dont la durée de vie dépasse le siècle peut être considéré comme un puits de carbone, ce qui est plus discutable pour un élément de mobilier incinéré au bout de 20 ans.

A condition qu'ils proviennent de forêts exploitées durablement, l'impact carbone du bois est donc estimé à 36,6 kg_CO_2/t émis pour 1850 kgCO_2/t stocké. L'impact du bois reste donc bien négatif malgré les émissions dues à la production [6].

Selon une étude menée par carbone 4, [5] construire en bois plutôt qu'en béton permettrait de supprimer en moyenne 55% à 60% des émissions de CO_2 liées au gros œuvre du bâtiment. Selon eux, la filière nécessiterait en revanche des investissements conséquents pour être capable de substituer les matériaux actuels (comme le béton) par le bois. Ces investissements viseraient entre autres la plantation, les outils de transformation, mais aussi la communication et la coordination entre les acteurs, pour lever des freins culturels. L'étude estime que la substitution coûterait environ 40€ par tonne de CO_2 évitée.

Le bois est aussi vertueux en écologie car sa production et son exploitation ne génèrent pas de déchets. Les chutes peuvent être utilisées dans la fabrication de panneaux de process (panneaux de fibres, de particules, OSB). Hors du domaine de la construction et de la menuiserie, le bois peut être valorisés énergétiquement pour le chauffage, dans les industries de papier/carton etc... mais aussi tout simplement en compostage.

Le bois est renouvelable et biosourcé. Une exploitation durable des forêts peut garantir une production constante de cette ressource pour un temps illimité. Afin de s'assurer de la bonne exploitation de la forêt dont le bois est issu, plusieurs certifications existent. Les deux les plus connues sont FSC et PEFC. Dans les deux cas, ces certifications garantissent du bois originaire de forêts exploitées durablement, mais FSC demande un engagement déjà concrétisé alors que PEFC s e base sur un engagement d'amélioration.

Enfin, une étude récente menée par le bureau d'études Woodeum a démontré que le bois dans la construction permettait de lutter contre les îlots de chaleur en ville [8]. En effet, le désavantage du béton lors des épisodes de chaleur est qu'il rayonne la nuit la chaleur qu'il a absorbée le jour. Le bois lui, dispose d'une inertie plus faible et n'emmagasine pas la chaleur de cette sorte. Une habitation en bois disposant d'un isolant adapté serait donc plus confortable à vivre en été. A l'échelle urbaine, la construction bois permettrait ainsi de lutter contre les îlots de chaleur, ce qui constitue un avantage en termes d'écologie mais aussi de santé publique.

- *Comportement mécanique et classification*

Le comportement mécanique du bois est appréhendé selon différentes classes de résistance. «C» désignant un résineux, «D» un feuillus et «GL» un lamellé collé, l'appellation est suivie de la résistance maximale en flexion du bois. Pour les lamellés collés, elle est aussi suivie de «c» ou «h» selon si les lamelles sont homogènes (h) ou panachées (c). Les bois ont aussi un classement d'aspect qui prend en compte les fissures, les flèches, les fentes ou autres défauts qui peuvent apparaître sur la pièce. Les valeurs correspondant aux résistances des différentes classes de bois sont données en annexe 1.

Un des atouts principaux qui font du bois un matériau de construction intéressant est sa légèreté par rapport à ses capacités mécaniques. En effet, à titre d'exemple, une poutre de 3m de long capable de supporter 20 t pèse 60 kg en épicéa, 80 kg en acier et 300 kg en béton armé. Cet avantage permet notamment de construire beaucoup de surélévations dans le milieu du bâtiment, et est aussi intéressant en zone sismique. Sa légèreté implique cependant de porter une attention particulière à l'ancrage au sol du bâtiment, pour qu'il ne s'arrache pas au vent.

Une autre caractéristique du bois est son module d'Young faible (allant jusqu'à 300MPa pour les bois lamellés collés (voir Annexe 1)), qui traduit un module d'élasticité élevé. Cette flexibilité est utile pour créer des formes architecturales originales ou créer des structures peu fragiles face aux aléas sismiques.

Le bois est aussi le matériau avec la plus grande portée théorique. En effet, la figure ci-dessous montre les résultats de calcul de portée maximale pouvant être atteinte par une poutre sur deux appuis, supportant uniquement son poids propre, et de hauteur h=1m.

PORTEE MAXIMUM / POUTRE SUR DEUX APPUIS/SOUS POIDS PROPRE/				
Matériaux	Résistance en flexion	densité/valeur moyenne	h	**Portée Max**
	Mpa	*kg/m3*	1	*m*
Bois C24	24	0,5		**81**
Acier S235	235	7,8		**64**
Chene	55	0,67		**106**
Bambou	80	0,65		**129**
Verre trempé	150	2,5		**90**
Béton non armé	2,5	2,5		**12**
Béton armé/section d'armature égale à0,5%		2,5		***25***

Tableau 1 : Calcul de portée théorique [1]

Enfin, comme mentionné précédemment, les propriétés d'un bois dépendent directement de son organisation microscopique. Les valeurs de résistance dépendent donc de l'orientation du bois, de sa densité, mais aussi du mode de croissance de l'arbre.

Par exemple, si un arbre est tordu, les cellules seront plus serrées d'un côté : l'arbre va se mettre en tension d'un côté pour supporter son poids, ce qui va créer un déséquilibre dans sa structure microscopique. Il est donc essentiel d'éviter cela en sylviculture en élaguant et en éclaircissant la forêt pour ne pas avoir d'arbres penchés. La résistance mécanique de l'arbre est aussi reliée à sa vitesse de croissance, qui est directement reliée au climat. Autant de facteurs qui nous montrent que les valeurs de résistance sont très variables. [2][9]

b. Histoire de l'architecture

Le bois a été utilisé par les hommes depuis la préhistoire, alors qu'ils l'utilisaient en ossature pour construire des abris nomades. [11] Les premières constructions en bois ont été retrouvées en Mésopotamie sous la forme de huttes tunnels ou huttes tentes. Ces ossatures relativement fines et liées par des cordes végétales ou des liens animaux servaient de structure à l'habitat. L'enveloppe était ensuite assurée par des végétaux, de la boue, du cuir animal ou plus tard du tissu, selon les régions et les matières premières disponibles. Ce système de tentes est encore utilisé aujourd'hui dans de nombreuses tribus nomades, comme à titre d'exemple, pour la construction des yourtes Sibériennes.

Le début de l'agriculture et la sédentarisation de l'homme lui ont donné l'opportunité de construire des habitats plus nécessiteux en termes de temps et de moyens mais aussi plus confortables. Plusieurs catégories de bâtiments naissent alors. Certains n'utilisent plus que le bois pour la toiture, préférant des matériaux plus disponibles et efficaces en compression pour les murs. D'autres continuent d'utiliser le bois comme cage de contraintes et effectuent le remplissage avec d'autres matériaux. Enfin, certains se tournent vers le bois pour régler à la fois les problèmes de structure et d'enveloppe, ce qui donna lieu par exemple aux maisons en rondins empilés. Ce choix dépend bien entendu encore une fois de la ressource environnante.

La végétalisation de toiture a fait sa première apparition sur structure bois. La surcharge importante qu'elle implique (notamment à saturation en eau) était justement utilisée pour stabiliser la structure, et compenser la légèreté du bois.

Ces habitations sont très connues aujourd'hui, ce sont les maisons en rondins. Elles se retrouvent essentiellement dans les paysages nordiques tels la Russie ou la Laponie, qui ont deux caractéristiques singulières : d'abord l'abondance de la ressource avec la proximité des forêts, ensuite des sols trop durs pour ficher le bois. Les premières constructions de ce type dateraient de 2500 av JC, lorsque l'homme a commencé à se sédentariser.

Le principe est assez simple, il repose sur l'empilement de rondins, encastrés entre eux par un système d'encoches. Les troncs sont idéalement posés sur un socle en pierre afin de créer une rupture de capillarité, et protéger le bois de l'humidité. De même, les avancées de toit protègent les parois des intempéries. Les jours éventuels apparaissant entre les troncs sont bouchés avec de la terre et de la mousse pour isoler au maximum l'intérieur de l'habitat. Le bois est alors utilisé à la fois comme structure et comme enveloppe, pour ses propriétés de résistance à la compression et d'isolation. [10]

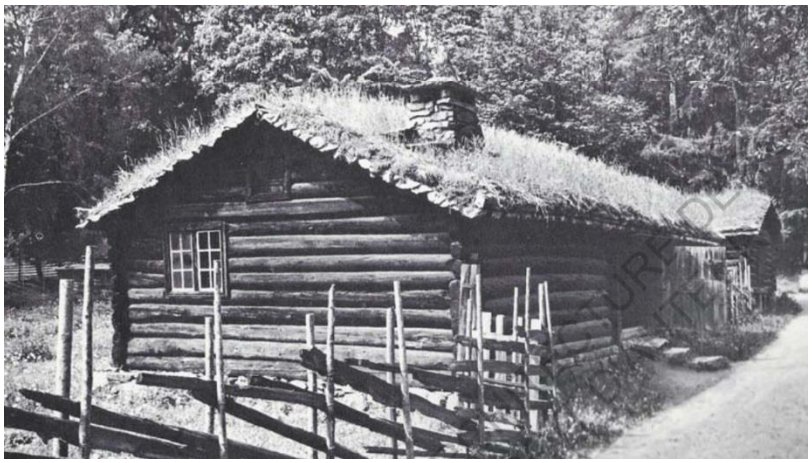


Figure 5 : La maison en rondins finlandaise ; (Source : Maison de bois, Architecture Scandinaves, Thérèse et Jean Marie bresson [10])

Le système fonctionne ainsi uniquement en compression, c'est pourquoi la surcharge de la toiture est intéressante. Elle permet de tasser la maison et de resserrer les jours. L'augmentation de la masse totale de la structure permet aussi de stabiliser la maison face au vent, et compense ainsi l'impossibilité de ficher des pieux ou des fondations. Enfin, les propriétés isolantes de la toiture végétalisée sont extrêmement appréciées dans ces pays au climat glacial.

L'histoire de l'architecture française ne comprend pas de traditions de végétalisation, en revanche le bois était utilisé dans la construction sur tout le territoire. Parfois utilisé comme simple charpente, et parfois comme enveloppe, les techniques de construction des maisons traditionnelles utilisent toujours le bois.

La carte suivante a été élaborée à partir de données recueillies sur internet, principalement sur des sites de tourisme et de visites, vantant l'architecture traditionnelle de chaque département.

Nous remarquons d'abord que quelle que soit la région, le bois est toujours utilisé pour la charpente des maisons en France. Dans les régions au climat méditerranéen, on peut éventuellement observer quelques cabanes faites entièrement en pierre sèche (toit compris), mais elles étaient réservées à des annexes agricoles. Cette méthode de construction ne permet effectivement pas de couvrir de larges surfaces et était réservée aux cabanes de bergers, tandis que les maisons s'offraient le luxe d'une charpente en bois.

La première catégorie de maisons observées en France n'utilise donc le bois que pour la charpente de la toiture. Ces maisons sont majoritaires sur le territoire.

Figure 6 : Carte du mode d'utilisation traditionnel du bois dans la construction en France

Viennent ensuite les maisons à colombages, où le bois est aussi utilisé pour la structure du mur, et donc régit la structure globale de la maison. Ces structures en cage sont ensuite remplies par un hourdage (par exemple en bauge, torchis ou briques) qui joue un rôle de remplisseur et de raidisseur du mur. Cette technique massivement employée pendant le moyen-âge et la renaissance, n'a laissé de son passage que les maisons les

plus solides. Les extraits les plus concentrés se retrouvent alors dans les traditions normandes, alsaciennes, et basques, mais on peut aussi en observer dans certains centres-villes isolés.

La troisième et dernière catégorie de maisons utilise à la fois le bois comme structure en comme enveloppe. Ces maisons se retrouvent dans les montagnes de l'est, des Alpes du Sud jusqu'au massif des Vosges. La plupart du temps, le bois n'est pas utilisé sur toute la maison et la partie inférieure est en pierre. Lorsque le bois est utilisé sur l'ensemble de la construction, la pierre est quand même utilisée au niveau des fondations pour créer une rupture de capillarité, et protéger le bois de la pouriture.

Le bois a été très tôt utilisé en préfabrication, depuis la naissance de la technique du pan de bois (colombages). [(15)] En effet, le charpentier traçait l'épure et préparait les pièces et les assemblages durant l'hiver. Chaque panneau était monté au sol, numéroté, puis démonté pour le stockage. Cette opération pouvait prendre plusieurs hivers. Une fois la « charpenterie » terminée et les murs de soubassement construits, le montage définitif de la carcasse prenait peu de temps. La préfabrication des maisons en bois a donc été utilisée bien avant l'industrialisation de la filière.

L'influence du Taylorisme et du Fordisme dans les années 1920 a cependant permis d'apporter de nouvelles réponses à la construction, avec l'idée nouvelle de la « machine à habiter », c'est-à-dire la fabrication industrielle et systémique. [(10)] La construction préfabriquée s'est développée en Europe dans les années 1940. Elle a permis notamment de développer de nouveaux systèmes d'assemblage métalliques.

Même si le bois est utilisé en préfabrication, il perd rapidement sa légitimité face au béton armé qui se développe de manière exponentielle. Ce développement a pour origine les propriétés mécaniques du béton armé qui permettent de construire de grands ensembles en montant très haut ; la facilité de construction et la disponibilité des ressources qui permettent de construire vite ; et enfin et surtout le bas coût de ce matériau. Cependant, la préfabrication est encore aujourd'hui très associée à ces grands ensembles en béton armé construits dans l'après-guerre, et renvoie l'image de ces petits logements uniformes et de mauvaise qualité. Le bois bénéficie donc d'une image de luxe et d'unicité en comparaison avec le béton armé.

Aujourd'hui, les progrès techniques permettent de grandes innovations en structure bois. La préfabrication est toujours le moyen le plus adapté et le plus répandu, mais elle est accompagnée par des calculs numériques d'optimisation. La conception assistée par ordinateur a révolutionné le monde de la construction. Cela permet de construire des structures toujours plus légères et aériennes. Enfin, les pièces en lamellé collé et les techniques d'assemblage et de cintrage permettent d'obtenir une grande variété de dimensions et de formes que l'on ne pouvait pas obtenir avec le simple découpage des troncs.

A titre d'exemple, voilà trois bâtiments contemporains réalisés en structure bois, et présentant un panel non exhaustif des techniques actuelles de travail du bois :

- *Savill Building (2006)* [(12)]

Figure 7 : Photographies du Savill Building (copyright Glen Howells Architects [(12)])

Réalisé par les architectes Glen Howells et Buro Happold et par les ingénieurs Stephen Haskins, Simon Robinson, et Martin Waters. Localisé dans le grand parc de Windsor en Grande Bretagne, ce pavillon a été entièrement réalisé avec du bois local. La structure est représentative du principe de gridshell (littéralement « coquille en grille ») qui permet de couvrir de grandes surfaces sans poteaux intermédiaires, le bâtiment fait ici 10m de long. La grille est ici supportée par une structure acier : des poteaux soutenant une poutre qui fait le tour du périmètre du bâtiment.

- *Halle sportive de Tarnos (2015)* [13]

Figure 8 : Photographies de la halle sportive de Tarnos (copyright ALC architectes [13])

Ce projet a été réalisé par l'agence ALC architectes, à Tarnos dans les Landes. Couvrant 950 m^2 de surface au sol, il démontre habilement l'intérêt d'utiliser le bois. Ses capacités en portance et en flexibilité permettent d'obtenir des formes cintrées originales tout en laissant des parois transparentes à la lumière. Ce projet a été réalisé avec du bois local puisqu'il s'agit uniquement de pin des landes. Il est ainsi fait à partir de 34 m^3 de bois massif en pin maritime et 42 m^3 de bois lamellé collé en pin maritime.

- Résidence étudiante Brock Commons (2017) [14]

Figure 9 : Photographies de la résidence Brock Commons (pendant et après le chantier) (copyright Acton Ostry [14])

Réalisé par la firme d'architectes Acton Ostry pour l'université de Colombie-Britannique au Canada, la Brock Commons Tallwood House est aujourd'hui le plus haut bâtiment existant en bois. La structure est composée d'un rez-de-chaussée et d'espaces servants (cages d'escaliers et d'ascenseurs) en béton. Les 17 étages en bois prennent ensuite appui sur ce socle de béton, et sont très simplement réalisés par un système de poteaux lamellé collés, plans libres et façades rideaux. L'immeuble est ensuite couvert et isolé par des panneaux préfabriqués. L'immeuble a ainsi pu être monté en seulement quatre mois.

Ces trois exemples aux échelles très différentes forment une liste non exhaustive des manières actuelles d'utiliser le bois. Il est choisi pour ses capacités de flexibilité et de portée, pour sa légèreté et pour sa facilité de mise en œuvre en préfabrication.

c. Le marché en France

○ *Origine de la matière première*

Selon le rapport d'activité 2018 de l'Office National des Forêts (ONF) [16], il y a aujourd'hui 18,4 millions d'hectares de forêt en France Métropolitaine (soit 184 000 km^2), dont le quart est géré par l'ONF, ce qui la place en quatrième position Européenne concernant les surfaces de forêt, après la Russie, l'Espagne, et la Finlande. Avec les départements d'outremer, elle compte alors 246 640 km^2 de surface forestière [17] ce qui la fait remonter en troisième position. La forêt recouvre 36,76% du territoire Français. La France est alors le seizième pays européen comptant le plus grand pourcentage de surface boisée, les trois premiers étant la Suède, la Finlande et la Slovénie.

La conclusion de cette analyse est le fort potentiel de la France dans la production de bois, tant au niveau de la métropole, mais aussi en outremer ou les cultures de bois exotiques plus recherchés sont alors possibles. La limite est que l'analyse prend en compte les forêts peu exploitables dans le cadre de la construction bois, comme les forêts méditerranéennes.

D'après l'enquête nationale de la construction bois 2019 (données de 2018) [18], 43% des achats de bois de construction passent par un réseau de distribution, 40% par des scieries Françaises, et 17% par des scieries étrangères, principalement Allemandes. Cette proportion varie fortement selon la taille de l'entreprise. Ainsi, les entreprises plus grandes sont plus enclines à se servir directement dans les scieries que les petites entreprises. Avec l'origine du bois vendu dans les réseaux de distribution, qui s'estime à 50% de bois français pour les négociants et 60% pour les coopératives, on peut alors estimer l'origine globale du bois dans le marché de la construction français.

Voilà ci-dessous le résultat de l'analyse, avec en bleu le bois Français et en jaune le bois étranger.

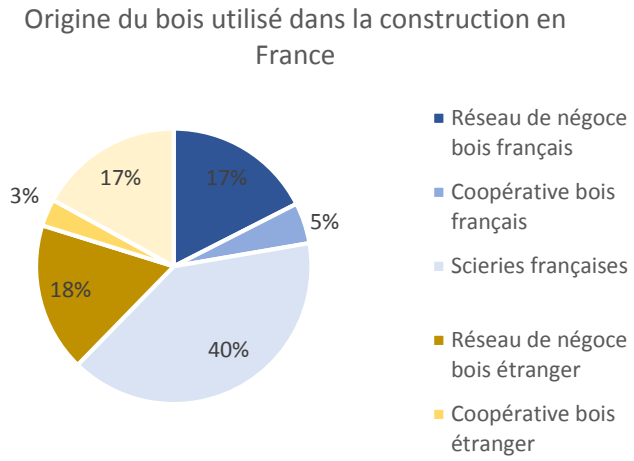


Figure 10 : Origine du bois des constructions françaises en 2018 (données issues de [18])

En considérant que les scieries traitent uniquement du bois local, on aurait alors environ 62% du bois utilisé dans la construction prélevé en France, et les 38% restants issus de l'étranger et principalement de l'Allemagne.

Ces chiffres sont étonnants comptes tenus de la capacité forestière supérieure en France. En 2014, l'observatoire économique France Bois Forêt a émis un rapport comparant les filières forêt-bois en France et en Allemagne.[19] La conclusion est que la filière bois allemande valorise une ressource résineuse très supérieure

en volume et en qualité à la ressource française. Elle a été constituée depuis 1945 de manière à être adaptée aux besoins de l'industrie. La forêt française majoritairement feuillue est alors moins productive que la forêt allemande résineuse, composée principalement d'épicéas et d'autres résineux de taille moyenne. Les autres constats concernent essentiellement la politique et l'économie de gestion des forêts. Les charges réduites sur les achats de bois, le personnel et l'énergie permettent également de rendre les coûts de production très compétitifs.

- *Situation actuelle du marché de la construction bois*

Tous les deux ans, l'Observatoire National de la construction bois réalise une enquête sur les chiffres et les activités réalisées par les métiers du bois.[18] Selon ces rapports, le marché de la construction bois s'annonce prometteur. En 2018, les entreprises présentes sur ce marché ont réalisé un chiffre d'affaire de 1,9 milliards d'euros HT, ce qui représente une hausse de 13% par rapport à la situation de 2016.

La part de constructions bois dans le marché du logement est aussi en légère hausse puisqu'elle passe de 5,9% en 2016 à 6,3% en 2018. Ces 6,3% de construction représentent concrètement 14 955 maisons individuelles, et 10 700 logements collectifs.

La part du marché du bois représente entre 4% et 25% des constructions selon le type de bâtiment. Elle est en légère augmentation depuis 2014 pour les logements et depuis 2012 pour les bâtiments non résidentiels, mais suit beaucoup la tendance du marché global. En revanche, les extensions et surélévations en bois connaissent une hausse importante depuis 2012, et ne suivent pas la tendance globale, ce qui montre un intérêt certain pour ces constructions. (source : compilation de l'enquête 2018 avec les précédentes, et regard sur l'évolution de la situation sur plusieurs années)

2. Végétalisation

a. Avantages de la végétalisation

Utilisée depuis l'antiquité mais délaissée pendant longtemps, les toitures végétalisées reviennent aujourd'hui très à la mode. Ce retour s'explique par l'urgence climatique, le besoin des habitants d'un retour de la nature en ville, mais aussi par une mise en œuvre qui s'est améliorée avec les nouvelles technologies.

Les toitures végétalisées impactent leur environnement à différentes échelles, et présentent de nombreux avantages :

- *Impacts sur le confort intérieur et la structure :*

- Impact thermique : L'isolation est améliorée, la création d'ombre qui réduit la température de surface des façades ou des toitures. De plus, l'évaporation de l'humidité entraîne un abaissement de la température. Cela agit directement sur le confort des habitants et les besoins énergétiques du bâtiment.

- Impact acoustique : L'isolation acoustique est améliorée car les épaisseurs de substrat et les végétaux absorbent les ondes sonores. Cela agit donc aussi directement sur le confort des habitants. Cet impact est cependant assez faible et est encore en étude [59].

- Impact mécanique/financier : La végétalisation protège l'étanchéité des toits et augmente leur durée de vie. Cette protection chimique et mécanique va jusqu'à doubler la longévité de l'étanchéité. De plus, on a pu observer un cas où la végétalisation a permis d'abaisser la pente du toit d'une maison, et de faire des économies sur l'enveloppe.

- Impact structurel : Dans le cas particulier des bâtiments nécessitant une charge importante pour les tenir en place (type maisons en rondins vue précédemment), la végétalisation a un rôle structurel important. Pour les autres bâtiments, nous verrons que la surcharge est plutôt contraignante, surtout pour les structures à ossature bois.

- Autres impacts : La végétalisation d'une toiture induit parfois la création de terrasses accessibles, ce qui donne des possibilités de créer des espaces récréatifs et de détente, ou de développer de l'agriculture urbaine dans le cas de la végétalisation intensive.

o *Impacts sur l'environnement extérieur, le quartier et la ville :*

- Impact sur la gestion des eaux : Le substrat stocke l'eau pluviale, et l'effet retard limite les inondations dues à la surcharge des réseaux d'évacuation.

- Impacts sur la qualité de l'air : Les toits végétalisés sont des zones d'évapotranspiration et d'humidification de l'air ambiant dans les villes, ce qui fixe les polluants et joue un rôle de filtre pour les particules fines. De plus, le processus de photosynthèse des végétaux réduit les émissions ambiantes de CO_2. Il est cependant important de porter une attention particulière aux choix des plantes pour éviter de gêner les habitants allergiques au pollen.

- Impact sur le climat : L'évapotranspiration rafraîchit l'air ambiant et fournit une lutte contre les îlots de chaleur.

- Impact écologique : La végétalisation contribue à la réintégration de la biodiversité en ville. Directement par la plantation de la flore et indirectement par la création de refuges pour la faune (oiseaux, insectes…).

- Impact esthétique : C'est actuellement une des raisons principales pour lesquelles les toits sont végétalisés. A noter que l'impact esthétique est aussi financier puisqu'il fait augmenter le prix du foncier, et joue sur l'image « écologique » du bâtiment.

Voici deux photographies de végétalisation à grande échelle qui démontrent le fort impact paysager que la végétalisation de toiture peut apporter :

Figure 11 : Photographies : pôle Bienvenüe à Champs sur Marne à gauche ; école d'art de Singapour à droite (sources google images)

b. Historique et marché en France

Figure 12 : Photographie d'un relief du palais Sennachérib à Ninive (source Arte [56])

L'image ci-dessus est une représentation des fameux jardins suspendus de Babylone, l'une des sept merveilles du monde. [56] Leur date de construction se situerait entre le VIIème siècle av JC et le IIIème siècle av JC, date des premiers écrits les mentionnant. Selon certaines sources, ils auraient en réalité été situés à Ninive, en Assyrie. De nombreux écrits détaillent ces terrasses somptueuses, construites par un roi pour sa femme. Ces jardins auraient été remplis de plantes luxuriantes, d'aromates et d'arbres. Leur construction aura donc nécessité de nombreuses prouesses techniques, notamment pour les systèmes d'arrosage en hauteur, certains écrits mentionneraient d'ailleurs l'existence d'un précurseur à la vis d'Archimède. Ces jardins sont possiblement les premières toitures-jardins, en tout cas, ce sont ceux qui font rêver les artistes.

Les toitures végétalisées sont beaucoup utilisées dans certaines constructions traditionnelles nord-européennes, islandaises et scandinaves. [55] Le mélange de terre et d'herbe était utilisé pour l'isolation et la protection des charpentes. De solides charpentes étaient nécessaires pour supporter ces toitures, elles étaient protégées par des tuiles de bois ou des écorces de bouleau. La végétalisation permettait d'assurer l'isolation à l'eau, à l'air mais permettaient aussi d'assurer une protection contre le feu. Les murs étaient en bois ou en pierre selon les régions. Dans le cas des maisons en rondin, nous avons vu que la végétalisation permettait aussi de rajouter de l'inertie à la structure pour la rendre résistante au vent. Voilà ci-dessous la photographie d'une ferme à Skogasafn en Islande.

Figure 13 : Photographie d'une ferme Islandaise, Tommy Bee, 2008, (source Wikipédia [55])

Cette ferme traditionnelle comporte des murs porteurs en pierre qui assurent en partie le support de la charpente, et certaines façades en bois. La végétalisation participe à l'isolation, au maintien des structures, ainsi qu'à l'intégration paysagère et peut être au camouflage des maisons.

Dans les années 1920, l'arrivée du béton armé et du modernisme font apparaître les toits plats. L'architecte Le Corbusier, symbole du modernisme, formule en 1927 les « Cinq points d'une architecture nouvelle ». Parmi eux, le toit terrasse constitue un élément essentiel du mouvement. Ce renouveau marque la fin des toits en pente traditionnels, et rend accessible la toiture, afin de restituer à l'habitant l'espace pris au sol.

Dans les années 1970 – 80, des préoccupations naissent en raison de la dégradation de la qualité de vie en ville [53]. La pollution et la raréfaction des espaces verts ont ravivé l'intérêt des toitures végétalisées. Les progrès techniques réalisés dans ce domaine ont également permis une renaissance de la végétalisation des toitures. Les membranes d'étanchéité anti-racinaires, les processus de croissance et les substrats légers sont autant d'éléments essentiels qui permettent une végétalisation pérenne, sous condition d'entretien régulier.

La végétalisation extensive a été mise au point pour la première fois en Allemagne, au milieu des années 80. [54] L'essor de la végétalisation des toitures y est porté par une volonté politique qui se traduit par des obligations et des subventions. Les villes sont surtout intéressées par le potentiel de rétention d'eau de la végétalisation. Ainsi, la ville de Berlin prend en charge 60% des coûts d'une toiture végétalisée, et la ville de Stuttgart impose la végétalisation à toutes les toitures terrasses des nouveaux immeubles industriels. Des mesures similaires sont adoptées dans de nombreuses villes partout dans le monde, comme en Suisse avec des subventions, ou au Japon avec une réduction de taxes [54]. 80 à 90% des toitures végétalisées Allemandes sont extensives [53], car c'est la végétalisation la plus légère et qui engendre le moindre coût.

En France, la végétalisation des toitures présente un certain retard par rapport à ses voisins Européens (Allemagne Suisse et Autriche) qui ont présentent des politiques environnementales plus marquées. Elle se développe plus rapidement depuis 2004, en raison des démarches de labellisation (HQE etc…) et la prise de conscience environnementale [54].

Plusieurs subventions et obligations permettent aujourd'hui d'inciter la végétalisation en France. Depuis le 1er mars 2017, la Loi pour la Reconquête de la biodiversité (article 86A) oblige les nouvelles constructions de bâtiments commerciaux à intégrer sur leurs toitures des procédés de production d'énergie renouvelables ou un système de végétalisation. Adoptée le 8 novembre 2019, la loi énergie-climat étend cette exigence à un tiers des surfaces commerciales à partir de 1 000 m^2.

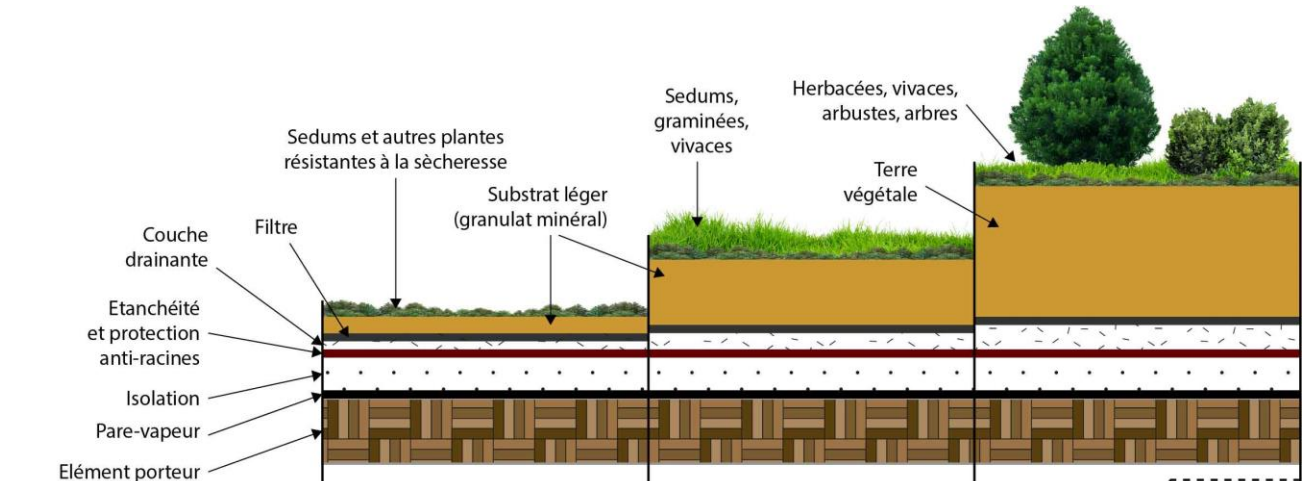
Les autres mesures sont observables à des échelles plus réduites. Certaines régions permettent des subventions à la végétalisation dans un cadre bien déterminé. La région Ile-de-France aide la végétalisation (pour certains bénéficiaires précis comme des établissements publics ou des bailleurs sociaux) à un taux de 20 €/m^2 avec un maximum de 100 000 €. Cette aide contribue au Plan Vert de la Région, qui soutient la création de nouveaux espaces verts en ville. Certaines Agences de l'eau, comme celle de Seine Normandie, subventionnent aussi la végétalisation pour lutter contre l'imperméabilisation des sols et améliorer la gestion des eaux de pluie. Enfin, des subventions ou obligations peuvent être présentes à l'échelle des communes ou des communautés de communes. Les toitures végétalisées bénéficient d'un droit non opposable permettant leur installation en toute circonstance (article L.111-6-2 du code de l'urbanisme ; source [57]), ce qui favorise leur utilisation, notamment face à des plans locaux d'urbanisme qui refusent les toitures plates pour des raisons paysagères.

Si les subventions locales sont assez rares sur le territoire, on observe par la multiplication des études, que les communes s'intéressant à la végétalisation sont de plus en plus nombreuses. Actuellement, l'Adivet développe des actions auprès des politiques pour les sensibiliser aux services écosystémiques de la végétalisation du bâti. Ces actions ont pour but de les inciter à mettre en place des outils (subventions ou obligations) qui favoriseront le développement de la végétalisation. [58]

3. Végétalisation sur structure bois

a. Différents types de végétalisation et problèmes pour leur mise en place sur structure bois

o *Types de végétalisation*



		Extensif	Semi-intensif	Intensif	Jardins
Cas général	Epaisseur de substrat	4 à 12 cm (>8cm de préférence)	12 à 30 cm	> 30 cm	
	Pente maximale (admise par les RP)	20%	5%		
	Accessibilité	Réservée à l'entretien	Possible si dimensionnement adapté		Régulière
	Charge induite gorgé d'eau	60 à 180 kg/m²	150 à 350 kg/m²	> 350 kg/m²	> 600 kg/m²
	Entretien et arrosage	Arrosage nécessaire au démarrage ; Ensuite dépend du climat, de la nature du substrat et des plantes			
		Désherbage 1 à 2 fois par an	Désherbage 2 à 4 fois par an	Désherbage et taille réguliers	Entretien très régulier
	Coût du système de végétalisation	25 à 150 €/m²	100 à 250 €/m²	> 200 €/m²	
Sur structure bois	Document de référence	Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées ; Adivet ; dépot légal juillet 2018		Pas de document spécifique *	
	Pente minimale	3 %			

* Les règles professionnelles prévoient les végétalisations extensives, semi-intensives et intensives sur support béton. Sur support bois, la végétalisation intensive n'est pas admise par les règles professionnelles. Le DTU 43.3 traite des toitures en élément porteurs en bois et panneaux dérivés du bois avec revêtements d'étanchéité, mais il ne traite pas spécifiquement les cas de végétalisation, et est donc peu adapté pour dimensionner des toitures végétalisées.

Tableau 2 : Les différents types de végétalisation [20][21][22]

Le tableau ci-dessus résume les principales caractéristiques des différents types de végétalisation de toiture. La difficulté de les adapter sur du bois vient essentiellement de la surcharge importante du substrat gorgé d'eau. En effet, si le bois est léger, il est aussi très flexible, et son dimensionnement est limité par les conditions de flèche. Les toitures intensives pèsent au-dessus de 350 kg/m^2 et les toitures jardins dépassent parfois les 600 kg/m^2. En l'absence de solutions adaptées, elles engendreraient des surcoûts importants pour la structure porteuse.

De plus, le bois craint l'humidité. Un bois exposé à l'eau en continu ne pourrit pas (exemple pieux à Venise) mais l'exposition cyclique à l'humidité et à l'air est dangereuse. Si le procédé d'étanchéité de la toiture végétalisée n'est pas parfait, cela pourrait entraîner une dangereuse humidification de la structure en bois. Nous parlerons de ce risque éventuel dans une des parties suivantes.

- *Documentation normes et cadrages*

En France, des documents normatifs définissent les modalités de calculs et de dimensionnement des bâtiments et des ouvrages d'art. Ces normes sont validées par des comités d'experts, elles permettent de définir des méthodes et des coefficients de sécurité à respecter pour assurer les ouvrages. Ces techniques sont dites « techniques courantes » lorsqu'elles sont validées par la Commission Prévention Produit (C2P). L'utilisation de ces techniques n'est pas obligatoire mais elle rentre en jeu dans l'assurabilité du bâtiment.

Chaque constructeur doit être assuré par une assurance responsabilité civile décennale, qui le couvre selon les clauses du contrat, pour les malfaçons accidentelles dont il serait jugé responsable. L'assurance responsabilité civile décennale fonctionne sur une zone géographique délimitée et pendant les dix années suivant chaque ouvrage construit par le constructeur. C'est donc elle qui fournit la garantie décennale.

Les maîtres d'ouvrages eux, sont assurés par une assurance dommage ouvrage. Si une malfaçon est constatée, l'assurance dommage ouvrage permet d'avancer les frais de réparation au maître d'ouvrage, pour qu'il puisse réparer le dégât au plus vite. Ensuite, cette assurance se charge de mener l'enquête pour savoir quel constructeur est à l'origine de la malfaçon. Elle pourra ainsi faire appel à la garantie décennale, c'est-à-dire demander à la responsabilité civile décennale du constructeur de rembourser le prix des travaux de réparation.

La nécessité du respect des techniques dites « courantes » intervient dans le contrat de l'assurance responsabilité civile décennale du constructeur. En effet, les clauses du contrat stipulent la plupart du temps que le constructeur doit avoir utilisé des techniques courantes pour être couvert par l'assurance. Si le constructeur décide d'utiliser une technique nouvelle, il va devoir faire des démarches supplémentaires pour être assuré. Il peut ainsi essayer de faire valider sa technique comme technique courante, ou demander une extension de l'assurance pour un ouvrage particulier. Cette extension sera plus ou moins chère selon le risque, d'où l'intérêt pour le constructeur de démontrer la viabilité de sa technique. Pour cela, il peut faire appel à des experts extérieurs à son entreprise pour leur demander d'effectuer des avis techniques expérimentaux. Dans les deux cas, ces démarches demandent du temps et de l'argent supplémentaire au constructeur. Si le constructeur utilise une technique non courante et qu'il n'avait pas prévenu son assurance, cette dernière peut se retourner contre lui en cas de sinistre.

L'assurance responsabilité civile décennale du constructeur et l'assurance dommage-ouvrage du maître d'ouvrage sont obligatoires en France. Tout cela explique la difficulté et le risque encouru par le fait de construire avec des techniques « non courantes ».

Les techniques validées par la C2P sont des documents techniques unifiés (DTU), des avis techniques (AT), ou des règles professionnelles (RP). Par exemple, le DTU 43.4 sert au dimensionnement et l'étanchéité des toitures en éléments porteurs en bois. En structure bois, nous avons aussi l'Eurocode 5 qui permet de dimensionner poutres poteaux etc… Les Eurocodes sont des normes Européennes, comportant des annexes ou des coefficients propres aux pays. Ce sont des documents largement adoptés dans le milieu de la construction, en effet la plupart des logiciels de dimensionnement fonctionnent aux Eurocodes. Le dimensionnement aux Eurocodes garantit l'assurabilité du bâtiment.

Ni le DTU 43.4, ni l'Eurocode 5 ne mentionnent de spécificités à prendre en compte dans le cas des toitures végétalisées sur support bois, ils sont donc peu adaptés pour leur dimensionnement. Le DTU 44.1 traite spécifiquement le cas des toitures végétalisées sur support béton, mais l'équivalent bois n'existe pas. Ce type de solution constructive n'est donc couvert par aucun Eurocode ni DTU. Ainsi, avant 2018, si l'on désirait assurer un bâtiment en structure bois et végétalisé, il était probablement nécessaire de demander des avis techniques expérimentaux.

En 2018, des règles professionnelles concernant les toitures végétalisées ont été proposées par l'Adivet (association française des toitures et façades végétales) en collaboration avec des professionnels du milieu [21]. Ces règles ont été validées par la Fédération Française du Bâtiment (FFB), la Commission Prévention Produits (C2P) ainsi que l'Agence Qualité Construction (AQC). En raison des contraintes que nous avons vues précédemment, les règles professionnelles prévoient la végétalisation extensive et semi-intensive sur support bois, acier et béton mais la végétalisation intensive sur support béton uniquement. Ainsi, elles enlèvent le flou présent pour la végétalisation extensive et semi-intensive sur structure bois, mais il n'y a toujours aucun document prévu pour la végétalisation intensive sur structure bois.

L'inconvénient de cette limitation aux toitures extensives est qu'elles sont moins efficaces que les toitures intensives à de nombreux niveaux. Leur capacité d'isolation thermique et acoustique diminue avec la diminution d'épaisseur du substrat. Leur possibilité de réduction des îlots de chaleur en ville reste à démontrer, et leur rôle quant à la réintroduction de la biodiversité est plutôt faible, la liste des espèces implantables étant limitée par la faible épaisseur du substrat. De plus, l'esthétique est aussi impactée, surtout en hiver où l'on obtient généralement des pelouses rases et brunes.

A savoir que la végétalisation des façades par bardage rapporté ne comporte aucune règle professionnelle, quel que soit le support. La végétalisation de façade est donc encore plus compliquée à mettre en place que la végétalisation de toiture. L'Adivet travaille actuellement sur un document de ce type [58].

b. Présentation de bâtiments et projets existants utilisant la végétalisation sur structure bois

○ *Cité Wagner, Mulhouse, Haut Rhin (2008)*

Figure 14 : Illustrations d'une partie du projet cité Wagner (images de l'Atelier Ott-Collin [29][30])

Ce projet a été construit en 2008 par l'Atelier Ott-Collin, architectes pour Mulhouse Habitat. Il consistait en la rénovation d'un quartier d'habitat social en maintenant la densité de population. Les bâtiments offrent des modes d'habitation diversifiés, du logement collectif à la maison individuelle. Les bâtiments sont réalisés en briques, avec des attiques en ossature bois, supportant parfois des toitures végétalisées. Les toitures sont inaccessibles et extensives, donc plutôt légères. L'utilisation du bois pour les attiques permet ici de diminuer la surcharge totale qui va s'appliquer au rez-de-chaussée. Le projet a été construit sur 0,75ha de terrain, avec une emprise bâtie de 2 820m², pour un coût de construction supérieure à 5 millions d'euros HT.

○ Centre pédagogique le Naturoptère à Sérignan-du-Comtat, Vaucluse (2009)

Figure 15 : Photographies du Naturoptère de Sérignan-du-Comtat (photographies Arch'eco [51] [52])

Le Naturoptère a été conçu par l'agence d'architecture Arch'Eco en association avec Yves Perret, pour la commune de Sérignan du Comtat. Il couvre une surface de 1100 m^2, pour des travaux qui ont coûté 1,92 M€ HT/m^2. Il a été construit en matériaux mixtes, dont du bois, du béton, du chanvre et de la brique. L'isolation est aussi en fibre de bois et liège.

Deux volontés ont été suivies dans ce projet, celle de proposer un bâtiment fonctionnant dans le respect de l'environnement, et celle de procurer un confort d'été optimal. Pour le travail du rapport à la nature, les choix d'utiliser des matériaux biosourcés et de végétaliser le toit ont été essentiels. Le bâtiment s'intègre ainsi dans le paysage environnant et joue un rôle éducatif par sa structure même. Un parcours extérieur permet d'observer le toit végétalisé non accessible, qui a été couvert par des plantes succulentes adaptées à la sècheresse.

Le type de végétalisation n'est pas mentionné, mais le choix des plantes et la non accessibilité de la toiture laissent supposer une toiture extensive. Pour soutenir cette toiture, les matériaux des murs travaillant en compression jouent un rôle essentiel (béton, brique etc…). On remarque aussi quelques procédés constructifs du bois, solidifiant la charpente, tels les aisseliers visibles sur la première photographie. Concernant le confort d'été, il est aussi assuré par les matériaux à forte inertie, la végétalisation de toiture, et les avancées de toit.

- *Extension à Hardelot, Pas de Calais (2012)*

Figure 16 : Extension en ossature bois et végétalisation dans un village balnéaire (source Adivet ; photographies Isochape [65])

Cette extension en ossature bois a été imaginée par l'Architecte Nicolas Huret pour un maître d'ouvrage particulier, possédant une maison traditionnelle sur la côte d'opale, à une soixantaine de kilomètres de Calais [65]. Elle couvre une surface de 85 m^2.

Le propriétaire souhaitait réaliser une extension rompant avec l'architecture traditionnelle du lieu, mais le PLU interdisait les toitures plates. La végétalisation a ici été choisie pour faire valider le permis de construire en toit plat, donc pour des raisons à la fois esthétiques et économiques. La végétalisation est extensive et a été réalisée avec la pose de cassettes pré-végétalisées. Un témoignage actuel du propriétaire relève sa satisfaction vis-à-vis de l'ouvrage. Il explique que l'entretien nécessite deux passages annuels et qu'il n'arrose jamais la toiture : « Il faut juste accepter que les plantes rougissent lorsqu'elles manquent d'eau » précise-t-il. Aucune information vis-à-vis d'une disposition particulière pour l'utilisation de la structure bois n'a été précisée dans l'article.

- *Maison en rondins, Ardèche (2013)*

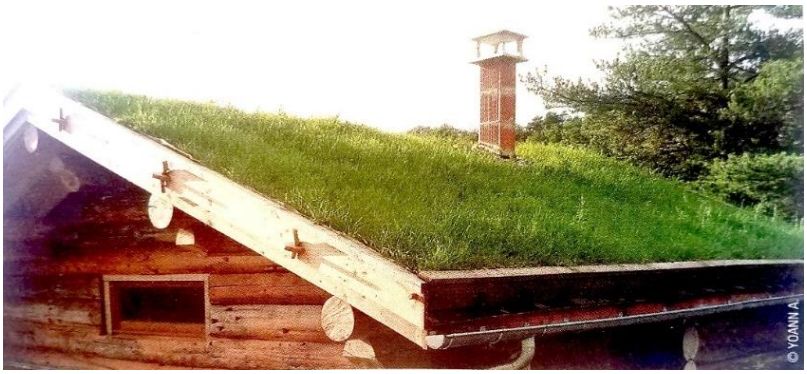


Figure 17 : Photographie du toit de la maison (copyright Yoann Alexandrowitsh [20])

Comme nous l'avons vu précédemment, la végétalisation sur structure bois a vu son origine dans les pays nordiques, sur les chalets en rondins. La végétalisation permet en effet de tasser la maison et de lui donner de l'inertie pour résister face au vent. Aujourd'hui cette méthode est encore utilisée. En 2013, dans l'Ardèche, Yoann a choisi cette méthode de construction pour des raisons esthétiques, et techniques [20]. Il témoigne de la difficulté de dimensionnement du système. Son toit est pentu de 20% à 40%, il a été couvert par 20 cm de terre et une prairie, on peut donc parler de végétalisation semi-intensive. La végétalisation s'est implantée quasiment seule avec les végétaux présents à proximité, ce qui implique une prairie rase et moins mise en valeur en été. Beaucoup d'éléments ont été directement fabriqués et/ou montés par le propriétaire, le tout a quand même coûté environ 5 000 € TTC pour couvrir 180m² de toiture.

- *Restaurant scolaire à Noisiel, Seine-et-Marne (2013)*

Figure 18 : Photographies du restaurant scolaire de Noisiel (source Adivet ; photographies Dynergis [26][27])

Ce projet de restaurant scolaire a été réalisé par l'agence c+o architectes pour la ville de Noisel en 2013. Le toit couvre 500m² et réalise des vagues pour des pentes allant de 20% à 120%, cela facilite le drainage de l'eau. La végétalisation est extensive et la toiture est inaccessible. Les plaques pré-cultivées ont été directement posées sur la membrane d'étanchéité, elles sont maintenues par un réseau d'arrêts qui empêche le glissement du complexe. Les plaques sont arrosées par un système automatique, qui empêche la couverture de régresser en cas de sécheresse.

- *Ecole Maternelle de Rosny-Sous-Bois, Seine-Saint-Denis (2013)*

Figure 19 : Photographie de l'école maternelle de Rosny-Sous-Bois (source ecovegetal.com [43])

Cette école maternelle a été construite sur pas moins de 2000 m^2 et a coûté 5 800 000 €. Elle a été conçue par les architectes de la ville, pour la ville de Rosny-sous-bois. Elle est entièrement réalisée en bois et en paille porteuse, avec pour but d'avoir une empreinte carbone la plus faible possible. Le toit de 900 m^2 est une toiture jardin. Cela signifie que le système mesure entre 25 et 35 cm d'épaisseur et pèse au-dessus de 270 kg/m^2 à saturation. La toiture est également accessible. Cet exemple démontre l'intérêt d'utiliser d'autres matériaux que le bois pour supporter des charges lourdes. En effet, si la charpente est en bois, les murs travaillent en compression avec la paille porteuse.

- *Restaurant universitaire Metz, Moselle (2013)*

Figure 20 : Photographies du restaurant de Metz (Images de KL-Architectes [23])

Ce restaurant universitaire a été imaginé et conçu par les agences d'architectes MiLLieux Architecture et KL Architectes pour le rectorat Nancy-Metz. [23] Il a été construit entre 2009 et 2013 sur une surface de 1800 m² et avec un budget HT de plus de 4 millions d'euros. Le toit végétalisé est ici entièrement supporté par la structure bois. Cette dernière est d'ailleurs sublimée à l'intérieur, avec des jeux de formes pour les poteaux, qui permettent de supporter des charges importantes tout en gardant des pièces fines. Les poteaux ressemblent alors à des arbres, ajoutant à la volonté d'intégration dans le paysage naturel par le choix de formes organiques. La forme du toit et le choix de la flore l'intègrent parfaitement dans le paysage extérieur, le bâtiment devient une colline, masquant toutes les émergences techniques du restaurant.

Si ce bâtiment a de grands attraits esthétiques, le choix (forcé ou non) de la végétalisation extensive comporte de nombreux désavantages. D'abord, l'accès au toit n'est autorisé que pour son entretien. Cela peut être dommage pour un bâtiment comme celui-ci, dont le toit crée une colline en pente douce qui pourrait être accessible, mais aussi et surtout pour les bâtiments en ville où les espaces verts sont précieux. Ensuite, de nombreuses études ont finalement prouvé que la végétalisation extensive était moins efficace en termes d'accueil de biodiversité, d'isolation thermique, et de baisse de la température par évapotranspiration, par rapport à la végétalisation intensive. La végétalisation de la toiture est ici principalement utilisée à des fins esthétiques.

- *Maisons individuelles passives Oignies, Pas-de-Calais (2014)*

Figure 21 : Photographies des maisons à Oignies (source Adivet ; photographies XDrône - Etienne Demester [24] [25])

Inauguré en 2014, ce projet de 35 maisons individuelles a été conçu par l'agence d'architecture R2D2, pour Le maître d'ouvrage Pas-de-Calais-Habitat. Il couvre une surface de 5889 m² pour un budget de 5,98M€ HTVA. Ici, le toit végétalisé a été choisi pour des questions d'intégration paysagère. En effet, ce quartier résidentiel se trouve à proximité d'une ancienne friche minière classée monument historique (en arrière-plan sur la première image), et est aussi visible depuis la voirie. L'architecture choisie s'adapte donc au paysage industriel par le choix des formes et des matériaux notamment, et tente de suivre le concept de « vivre dans un parc » [25]. Les maisons sont en ossature bois, et disposent à la fois d'une toiture et d'une façade végétalisées. La façade végétalisée est constituée de plantes grimpantes, ce qui limite la surcharge. La toiture est en pente très légère, ce qui a tendance à retenir l'eau plus longtemps, la limite de la surcharge est assurée par un choix de végétalisation extensive et l'inaccessibilité du toit. Le toit couvre un espace de garage et un local non isolés. La végétalisation n'est donc pas choisie pour ses propriétés énergétiques. L'étanchéité a été réalisée par le complexe CITYFLOR, qui est composé d'une double couche bitumineuse.

- *Résidence principale au Cheix-sur-Morge, Puy-de-Dôme (2014)*

Figure 22 : Photographie de la maison au Cheix-sur-Morge (Photographie de Fernand Ribeiro [28])

Cette maison a été conçue et réalisée par l'architecte Fernand Ribeiro entre 2012 et 2014, pour une famille. La volonté des maîtres d'ouvrages était de construire une maison confortable et économe en énergie, et leur conscience écologique les a poussé à l'utilisation de matériaux écologiques. La maison couvre une surface de RDC de 55,4 m², pour un coût total de travaux (sans les finitions et la végétalisation) de 164 531 € HT.

La maison n'est pas totalement passive, mais elle a bénéficié d'une étude durant les premières années après sa construction, le toit végétal n'était pas encore présent à ce moment-là (pour des raisons de budget). Elle présenté d'excellents résultats en termes d'économie d'énergie [20], en revanche son manque d'inertie l'a rendue peu confortable en été. Elle a été entièrement construite en bois, de l'ossature à l'isolation. La toiture végétalisée n'est pas visible depuis le sol. Il s'agit d'une végétalisation extensive réalisée sur une toiture froide ventilée sur bac acier, et formée d'environ 6 cm de pouzzolane [20]. Le bac acier est protégé de la pouzzolane par une nappe de protection Delta MS. La végétalisation a été choisie pour deux raisons, d'une part, cela permettait d'abaisser la pente de la toiture à 3% par rapport à une couverture en tuiles, ce qui a réduit la surface de l'enveloppe du bâtiment et permis de faire des économies. D'autre part, cela répond à la demande des communes d'installer des systèmes d'infiltration et de rétention des eaux de pluie.

- *Maison passive à Toulouse, Haute Garonne (2016)*

Figure 23 : Photographie de la maison passive de Toulouse (copyright Stéphane Brugidou [68])

Ce projet a été entièrement élaboré par l'entreprise Seuil Architecture (maîtrise d'œuvre et maîtrise d'ouvrage). L'objectif était de construire une maison passive mixant les programmes. La conception de l'espace a été gérée de manière à optimiser les temps de trajet.

La maison est construite sur un rez-de-chaussée en béton et briques de terre cuite, typiques de la région toulousaine. Ce rez-de-chaussée supporte une toiture jardin-potager (visible sur la photographie) et deux autres étages entièrement en bois. La structure bois supporte aussi un toit végétalisé, extensif cette fois, permettant d'améliorer les performances thermiques du bâtiment. En effet, un des objectifs principaux des architectes était de développer une maison autonome, capable de réguler les apports énergétiques par la ventilation naturelle et les performances thermiques de son enveloppe. Aucune étude spécifique capable de démontrer le bon fonctionnement de ces processus sur cette maison n'a été trouvée.

- *Spiral Garden sur l'île d'Awagi au Japon (2017)*

Figure 24 : Photographie et photographie de maquette du Spiral Garden (photographies Kaori Ichikawa [31] [32])

Ce projet se démarque fortement de ceux que nous avons pu observer jusqu'à présent. La maison a été réalisée pour une famille sur en 2017, dans la région de Hyogo au Japon, par l'agence d'architecture Ryuichi Ashizawa Architect and associates. Le toit est soutenu par une charpente en bois, et les murs sont constituées d'une ossature bois (treillis en bambou) et d'un remplissage en terre. L'inspiration de cette forme est venue de la demande d'une maison qui pourrait « grandir avec la famille ». La toiture est une toiture jardin accessible ce qui implique de fortes surcharges, et qui est n'est pas prévu par les règles professionnelles en France. La maison a été entièrement conçue pour s'adapter à l'environnement extérieur. Le jardin en spirale fait varier l'exposition au soleil et le taux d'humidité, et l'eau est évacuée dans un étang au bas de la spirale. Les murs en terre permettent de contrôler la chaleur et réguler l'humidité produite. La surface de la maison est de 101,85m^2. [31] [32] On peut comparer cet ouvrage avec le précédent puisqu'il utilise le bois en charpente mais le substitue à d'autres matériaux meilleurs en compression pour les murs. A noter que dans les deux exemples, le bois a été substitué par d'autres matériaux biosourcés et géosourcés.

- *Maison des associations de Trangé (2018)*

Figure 25 : Photographies de la maison des associations de Trangé (copyright A2A architectes [69])

Cette maison des associations entièrement en bois couvre 614 m^2 dans la commune de Trangé (72). Elle a été construite pour la commune, par l'Atelier 2A Architectes, et a été certifiée bâtiment à énergie positive (BEPOS). Ici, le bois et la végétalisation ont été combinés pour des raisons d'intégration paysagère et d'esthétique intérieure, mais aussi pour ce que ces procédés apportent techniquement. Le bois est notamment utilisé au niveau du plafond pour ses propriétés acoustiques, tandis que la toiture végétalisée a été aussi choisie pour sa capacité de rétention des eaux pluviales.

- Marché couvert de Saint Dizier (2019)

Figure 26 : Représentations du futur marché couvert de Saint Dizier (Images de Christophe Aubertin et Aurélie Husson [46])

Le marché couvert de Saint Dizier n'a pas encore été construit. Nous vous présentons ici le projet lauréat d'un concours d'architecture de 2019. Le projet a été conçu par les architectes dplg Christophe Aubertin et Aurélie Husson, pour la ville de Saint Dizier dans la Haute-Marne. Ce projet est une étape du renouvellement urbain d'un quartier d'habitat social, entamé par la ville en 2004. La halle couvre 1200m2 et les travaux sont estimés à 2,7M€. La toiture est plate (pente 4%) avec un support bois, 20cm d'isolant et une végétalisation extensive de 15cm. Etant donné l'épaisseur du substrat de 15cm, on pourrait presque considérer cela comme de la végétalisation semi-intensive. Les piliers du marché sont constitués d'arcades en bois, qui font travailler le bois en compression. De plus, les jeux de formes avec l'hyperstructure découpent les puits de lumière, la ventilation, et fournissent aussi un travail pour améliorer l'acoustique du bâtiment.

- *Synthèse des projets existants*

Voici un tableau résumant les principales caractéristiques des 11 exemples cités précédemment. Bien qu'ils forment une liste non exhaustive de ce qui existe, ils permettent de deviner les tendances et les usages de la végétalisation sur structure bois.

Nom de l'exemple	Année	Maître d'ouvrage	Type toiture	Structure en bois pur ou mixte	Pays	Raisons principales
Cité Wagner	2008	public	extensive	bois	France	Non connu
Naturoptère Vaucluse	2009	public	extensive	mixte	France	Esthétique
Extension à Hardelot	2012	particulier	extensive	bois	France	Esthétique
Maison en rondin de Yoann	2013	particulier	semi-intensive	bois	France	Structurelle
Restaurant universitaire de Metz	2013	public	extensive	bois	France	Non connu
Restaurant scolaire de Noisel	2013	public	extensive	bois	France	Esthétique
Ecole Maternelle de Rosny sous bois	2013	public	intensive	mixte	France	Création jardin
Maisons Oignies	2014	public	extensive	bois	France	Esthétique
Résidence à Cheix sur Morge	2014	particulier	extensive	bois	France	Economique et gestion des eaux
Maison passive à Toulouse	2016	particulier	extensive	bois	France	Energétique et création jardin
Spiral Garden	2017	particulier	intensive	mixte	Japon	Création jardin
Maison des associations de Trangé	2018	public	extensive	bois	France	Gestion des eaux et esthétique
Marché couvert de Saint Dizier	2019	public	extensive	bois	France	Non connu

Tableau 3 : Liste des exemples

La végétalisation sur structure bois est plutôt rare, en France mais aussi à l'étranger. Lorsqu'elle est choisie, c'est souvent de la végétalisation extensive assez fine (voir graphe ci-dessous), qui va donc avoir peu de bénéfices en termes d'isolation thermique ou de biodiversité.

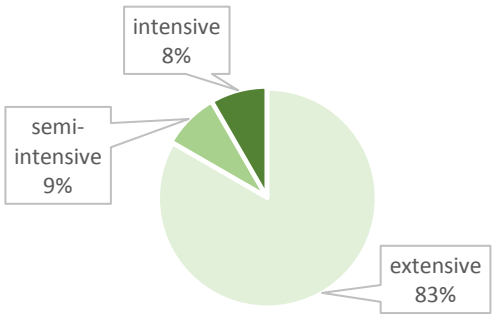


Figure 27 : Type de végétalisation des exemples français

Concernant la végétalisation sur tous types de structures, aucune étude statistique n'a été menée, mais on considère approximativement que la végétalisation extensive représente 80% du marché, la semi intensive 15% et l'intensive 5%. [58] Compte tenu du peu d'exemples que l'on possède sur structure bois, on constate finalement que la tendance est peu différente de celle observée sur toutes structures. De manière générale, les végétalisations intensives et semi intensives sont utilisées assez rarement par rapport à la végétalisation extensive, mais ce sont aussi des techniques actuellement en progression.

Lorsque le choix de la végétalisation est justifié, les architectes évoquent surtout des raisons esthétiques (voir figure ci-dessous), la volonté d'aménager un espace supplémentaire accessible, et parfois des préoccupations locales (rétention des eaux pluviales sur le territoire de la collectivité). Les toits végétalisés sur structure bois ne sont donc pas généralement choisis pour leurs autres avantages, à savoir l'isolation thermique et acoustique, la lutte contre les ilots de chaleur etc…

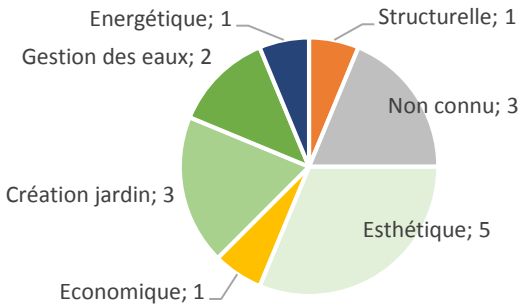


Figure 28 : Raisons invoquées de végétalisation des exemples

Aucun projet n'a été trouvé combinant une construction de grande hauteur en bois avec de la végétalisation, hormis des immeubles en ossature bois où quelques arbustes sont plantés en pots pour sublimer le dessin d'architecte, ou des immeubles luxuriants de végétalisation dont la façade est en bois mais l'ossature est réalisée en béton armé. Les projets sont ainsi vendus en pré-conception avec des visuels très « vert », intégrant beaucoup de végétalisation dans les images de synthèse, c'est un point d'attention à garder pour ne pas tomber dans le green-washing. Ci-dessous deux exemples de projets jouant sur les images pour promouvoir l'attention portée à l'environnement :

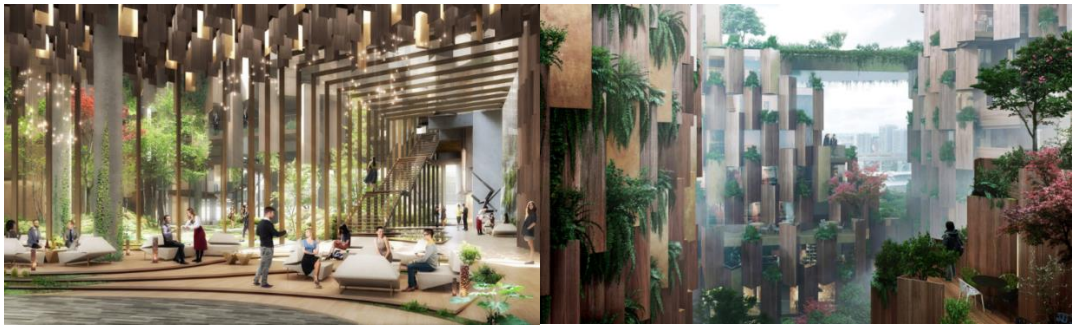


Figure 29 : Images de synthèse de l'immeuble "Aurore", dessiné par l'architecte Kengo Kuma [39]

Figure 30 : Image de synthèse du village des JO 2024; crédit photo Secteur E_Groupement Nexity SA-Eiffage Immobilier IDF [38]

S'il est important de se méfier du réel impact écologique de ces projets, ils démontrent tout de même une préoccupation grandissante pour l'intégration de la nature en ville via les bâtiments. Ainsi, un Maître d'ouvrage souhaitant un bâtiment exemplaire environnementalement parlant, appréciera associer une structure bois (stockant du carbone) avec une végétalisation de l'enveloppe (bénéfique sur d'autres aspects et notamment la biodiversité).

Comme indiqué dans la figure ci-dessous, le plus souvent, les exemples trouvés sont des constructions de maîtrise d'ouvrage publiques. Cela tendrait à démontrer que l'efficacité par rapport aux surcoûts et aux risques engendrés n'est pas encore pleinement reconnue par les entreprises privées, et qu'il existe une volonté d'exemplarité des donneurs d'ordres publics par rapport à l'environnement. Certains particuliers privés qui décident de se construire leur maison optent pour la végétalisation, malheureusement, même en étant bricoleur, les coûts des matériaux sont notables (exemples : maison en Ardèche [20] et résidence principale à Cheix sur Morge [28]). L'Adivet recommande cependant de faire toujours appels à des professionnels, notamment pour que l'étanchéité se fasse sans désordres.

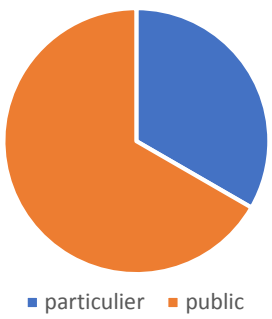


Figure 31 : Maître d'ouvrage des exemples français

Les exemples du Spiral Garden, de l'école maternelle et de la cité Wagner démontrent l'intérêt que l'on peut avoir à mixer les matériaux sans s'acharner à vouloir réaliser un bâtiment entièrement en bois. La cité Wagner utilise le bois pour ses derniers étages afin de réduire la surcharge sur le bâtiment entier, mais les étages inférieurs sont réalisés avec des murs porteurs en brique, un matériau utile pour sa bonne résistance à la compression. De même, le Spiral Garden et l'école maternelle utilisent des murs en terre et en paille, qui ont aussi des capacités intéressantes en compression, ce qui permet de reprendre plus facilement la surcharge de la charpente soutenant la végétalisation. Ces matériaux en compression ont aussi une faible empreinte environnementale, ce qui les rend aussi intéressants que le bois pour remplacer le béton (ex : stockage carbone de la paille).

Enfin le Spiral Garden au Japon et l'école maternelle prouvent que le bois est tout de même capable de supporter de fortes charges. L'exemple du Spiral Garden est intéressant car il s'affranchit des règles professionnelles Françaises et des Eurocodes. En revanche, il existe depuis 2017, ce qui laisse peu de recul quant à la véritable durabilité du bâtiment.

II) Surcharge : Un dimensionnement de structure à adapter et des coûts liés

1. Introduction au dimensionnement

a. Présentation des éléments de charpente et du dimensionnement à l'Eurocode

Un toit terrasse classique est généralement composé de panneaux OSB reposant sur un solivage et des poutres porteuses, comme présenté sur la photographie ci-dessous.

Figure 32 : Photographie d'un toit terrasse en bois en construction (source google images [33])

Deux types de panneaux sont actuellement couramment utilisés, les panneaux OSB (à gauche sur l'image) et les panneaux CLT (à droite sur l'image).

Figure 33 : Photographies de panneaux OSB et CLT

OSB vient de l'anglais Oriented Strand Board. Il est fait de plusieurs lamelles longues et orientées constituées de copeaux de bois liés par une résine (4). CLT vient de l'anglais Cross Laminated Timber. Il est lui constitué de bois lamellé collé dont les couches sont croisées. Afin de supporter les surcharges liées à l'accès et la végétalisation, les panneaux CLT sont préférés aux panneaux OSB. En effet, ils sont plus rigides, autoporteurs, et les épaisseurs disponibles sont plus grandes. Ils ne seront donc pas utilisés pour les mêmes usages. Les panneaux disponibles à la vente sont en général entre 6mm et 30mm d'épaisseur pour les panneaux OSB, alors que les panneaux CLT sont disponibles entre 60mm et 360mm d'épaisseur. En plus d'être plus résistant, le contreplaqué est aussi moins nocif pour l'environnement, mais il est aussi bien plus cher [34].

Ces panneaux ont été développés entre 1996 et 1999 par la société KLH Massivholz GmbH en collaboration avec l'université technique de Graz (Autriche), et ont commencé à être utilisés dans la construction tout de suite après. Les panneaux KLH sont donc une référence, et ont bénéficié de nombreux avis techniques par le CSTB. [35]

Les dimensionnements des éléments en bois se font en suivant les prescriptions données dans l'Eurocode 5 à l'ELU et l'ELS. L'ELU désigne l'Etat de Limite Ultime, c'est-à-dire la limite de dimensionnement à respecter pour que l'élément de bois ne casse pas sous la charge appliquée. L'ELS désigne lui l'Etat Limite de Service, c'est-à-dire la limite de dimensionnement à respecter pour que l'élément de bois ne soit pas inutilisable sous la charge appliquée. Ici cela se résume à des conditions de flèches limites. L'Eurocode donne ainsi les

procédés de calculs de vérification des ELU et des ELS, et les modes de détermination des coefficients de sécurité en fonction du type de matériau et des contraintes extérieures.

Toujours dans une problématique d'optimisation économique, les pièces de bois sont généralement dimensionnées de manière à utiliser le moins de matière possible tout en vérifiant les conditions limites à l'ELU et à l'ELS.

b. Présentation du programme de dimensionnement

o *Principe de codage*

Afin d'évaluer l'influence de la surcharge sur la quantité de bois utilisée, on propose un programme excel, basé sur les vérifications de l'Eurocode, donnant les sections minimales de poutres et de poteaux, capables de supporter une charge donnée. On pourra ainsi évaluer plus facilement l'influence de la surcharge d'un toit végétalisé sur des modèles simplifiés, et essayer de savoir s'il est possible d'envisager de la végétalisation intensive sur de la structure bois.

Le programme excel fonctionne comme détaillé dans l'organigramme en Annexe 2. Une feuille excel permet de vérifier une section en fonction des charges appliquées et des paramètres du poteau ou de la poutre. Une boucle écrite en code VBA permet ensuite d'obtenir les dimensions minimales acceptables pour des paramètres donnés (Annexe 3).

Le principe est assez simple : On donne au programme la charge soutenue par la pièce en bois, ses caractéristiques techniques et ses conditions d'utilisation. On donne aussi les dimensions de la plus petite section que l'on souhaite vérifier et le pas de vérification. La boucle augmente les dimensions de la section et s'arrête lorsque les critères ELU et ELS sont vérifiés.

Ici, nous faisons du prédimensionnement, nous n'effectuerons que des calculs dont le but est de nous donner une idée approximative sur les sections nécessaires pour une charge donnée. L'ELS n'est pas vérifié en prédimensionnement, il est plus précis que l'ELU et demande aussi des données plus précises sur l'usage des pièces. Nous allons donc effectuer uniquement les calculs à l'ELU.

o *Définitions des paramètres*

Cette partie a pour but d'expliciter le choix des paramètres choisis pour les prédimensionnements.

Paramètres extérieurs :

Les classes de service sont définies par l'Eurocode en fonction du niveau d'humidité ambiant (voir Annexe 4). Généralement, on se place en classe de service 2 pour le calcul des toitures végétalisées [70]. Comme l'on considère que la charpente se situe dans l'intérieur chauffé du bâtiment, on se place ici dans la classe de service 1.

Les catégories des bâtiments définissent leur usage et les charges d'exploitation qui vont en résulter (voir Annexe 5). On décide ici de se placer dans la catégorie A, c'est-à-dire celle qui correspond au résidentiel.

Compte tenu de la catégorie du bâtiment, l'Eurocode préconise les charges variables à prendre pour les toitures. Soit 150 daN/m^2 si le plancher est accessible, et 80 daN/m^2 s'il ne l'est pas. En outre, les règles professionnelles d'Adivet indiquent que la charge variable à prendre en compte pour une toiture végétalisée non accessible est de 100 daN/m^2. Pour se placer dans le pire cas, on décide de considérer que la toiture est accessible, et on prendra donc 150 daN/m^2 de charge variable. En outre, les charges variables de neige et de vent ne sont pas prises en compte dans cette étude.

La charge permanente elle, variera dans l'étude, puisque la végétalisation à saturation en eau est considérée comme une charge permanente et que l'on veut justement regarder son impact sur le dimensionnement.

Paramètres des matériaux :

Les paramètres du bois constituant les solives, les poutres porteuses et les poteaux sont donnés par les normes NF EN 14080 dans le cas des poutres lamellé-collé, et NF EN 338 dans le cas des poutres en bois massif. (voir Annexe 1)

On choisit de travailler avec du lamellé collé car la procédure de fabrication permet d'obtenir des sections et des longueurs de poutres plus importantes qu'avec le bois massif dont les dimensions sont limitées par la taille de l'arbre.

On choisit donc du GL24h pour les éléments de poutres et poteaux. GL24h signifie qu'il s'agit d'un bois lamellé collé homogène de résistance en flexion 24 MPa. Cette classe de résistance est très commune et couramment utilisée, d'où le choix.

Concernant les panneaux, on va s'appuyer ici sur les propriétés données dans les Documents Techniques d'Application du CSTB sur les panneaux de la société KLH. A ce jour, plusieurs documents ont été validés puis remplacés (voir ci-dessous) :

Avis technique 3/02-379 (du 22/11/2002)

-> Annulé et remplacé par :

Avis technique 3/06-477 (du 10/01/2007)

-> Annulé et remplacé par :

Avis technique 3+5/12-731 (du 3/06/2014)

-> Annulé et remplacé par :

Avis technique 3+5/12-731_V1 (du 20/12/2016)

-> Annulé et remplacé par :

Avis technique 3.3/12-731_V2 (du 12/12/2017)

-> Annulé le 15/11/2019

Bien que le dernier avis technique (soit le numéro 3.3/12-731_V2 du 12/12/2017) ait été annulé récemment, nous allons utiliser ses données faute de document de remplacement. On a ainsi les valeurs de résistance à prendre en compte pour un panneau KLH (voir Annexe 6). Les calculs seront effectués à l'Eurocode 5, comme pour une poutre, en fonction de ces valeurs.

2. Modèles de simulation et résultats

a. Plaques

Les panneaux constituent les premiers éléments à dimensionner. Ils vont uniquement supporter la charge de la végétalisation. Afin de réduire la flèche de ces éléments, ainsi que les efforts qui s'exercent au niveau des jointures, on les dispose habituellement sur plusieurs solives. Le dimensionnement strict des panneaux nécessite donc le calcul d'une structure hyperstatique.

La formule des 3 moments[36], nous permet de comparer les diagrammes d'efforts des grands panneaux reposant sur plusieurs solives, avec des petits panneaux couvrant une seule travée. Après calculs et application de la formule des 3 moments pour des panneaux de une, deux et trois travées de longueur L (Annexe 7), on obtient les diagrammes d'efforts ci-dessous, avec le moment en rose et l'effort tranchant en vert.

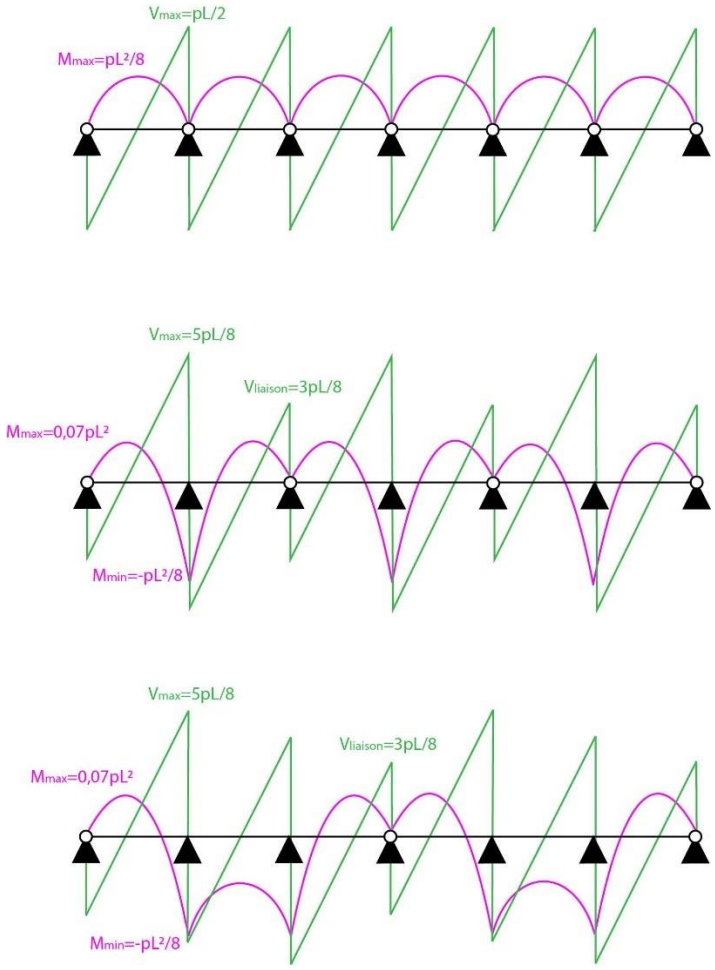


Figure 34 : Diagrammes des efforts des panneaux en fonction du nombre de travées par panneau

On peut faire plusieurs constatations en observant ces figures. D'abord il ne sert à rien de regarder au-delà de trois travées car le schéma obtenu pour trois travées se répètera. La valeur maximale de l'effort tranchant est légèrement augmentée au niveau des appuis intermédiaires, mais diminue aux niveaux des appuis de liaison, ce qui allège les contraintes pour les attaches. Ensuite, on remarque que le moment maximal ne change pas (en valeur absolue), en revanche multiplier les travées permet de diminuer le moment à mi travée, et ainsi la flèche des panneaux.

Comme nous effectuons uniquement les vérifications à l'ELU, les conditions de flèche ne sont pas prises en compte. On utilisera donc ici uniquement les valeurs d'effort maximales. La longueur des panneaux et le nombre de solives qu'ils couvrent n'auront donc que peu d'influence sur le prédimensionnement à l'ELU. Afin de faciliter les calculs, on décide donc de se ramener au cas isostatique (premier diagramme), et de considérer que les panneaux reposent uniquement sur deux solives placées à leurs bouts.

Afin d'évaluer le coût matériel d'une surcharge en surface, on propose d'abord de travailler avec une plaque carrée en bois sur deux appuis. Le but est d'évaluer l'épaisseur de plaque nécessaire en fonction de la charge appliquée, pour estimer l'impact qu'aura la surcharge sur les dimensionnements.

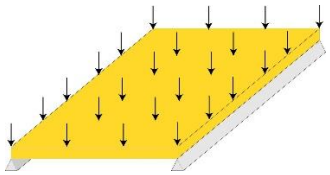


Figure 35 : Schéma d'une plaque sur deux appuis

Les paramètres choisis sont un bâtiment de catégorie A et de classe de service 1. On considère qu'il s'agit de panneaux KLH. Le programme de dimensionnement ELU fonctionne comme pour une poutre, on ne fait simplement pas varier sa largeur qui est fixée à 1m. Les données rentrées en paramètres sont en Annexe 6. On obtient le graphique ce dessous, chaque courbe correspondant à une longueur de plaque en mètres.

Les courbes obtenues nous permettent d'obtenir une quantité approximative de bois nécessaire pour couvrir une surface donnée, en fonction de l'écart des appuis disponibles. On remarque que pour supporter ces surcharges, on a intérêt à rapprocher au maximum les appuis des panneaux, ce qui est intuitif. Cette étude est peu pertinente si elle est réalisée seule car elle ne prend pas en compte le dimensionnement des appuis et des autres constituants . En revanche, à partir de ce résultat concernant une seule plaque, on va pouvoir dimensionner plusieurs plaques puis une charpente entière avec ses appuis, ce qui permettra de prendre aussi en compte le coût matériel des appuis.

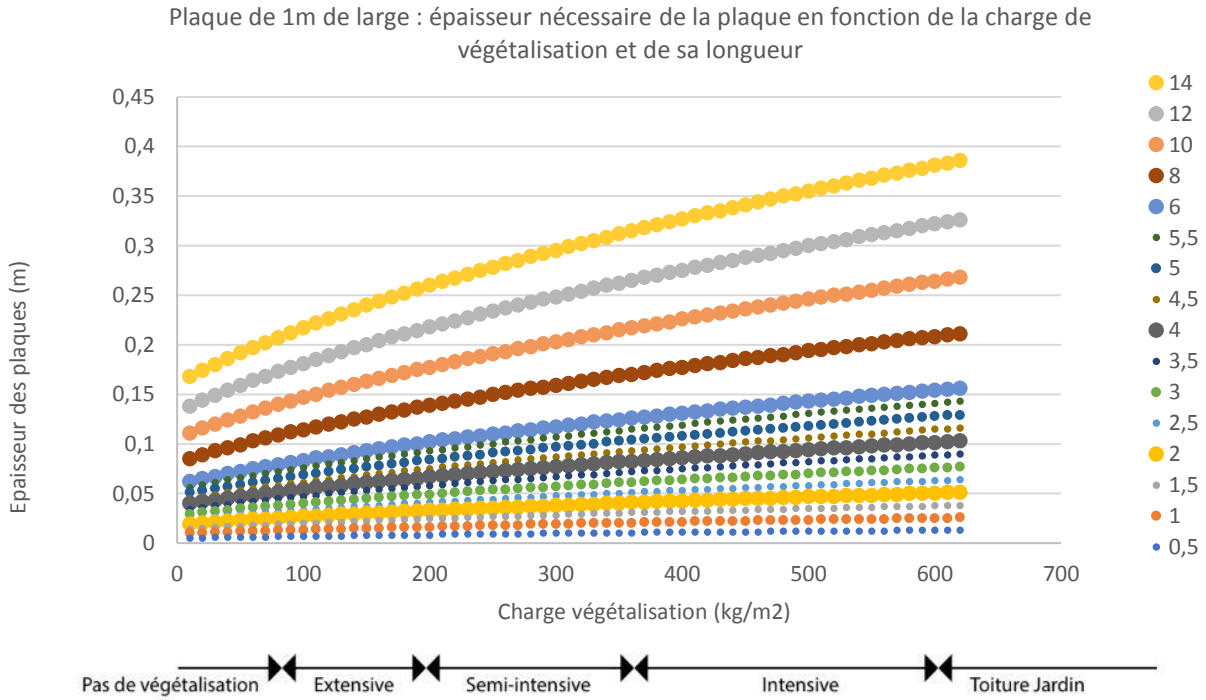


Figure 36 : Résultats de calculs pour les plaques

b. Structure complète

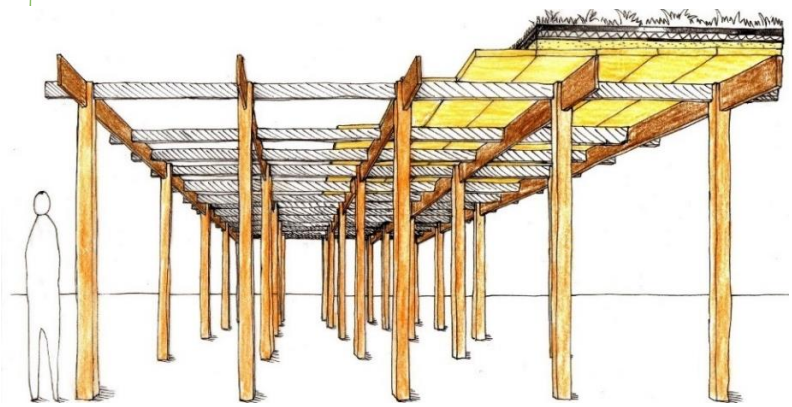


Figure 37 : Dessin du système pour m=4

On considère une structure poteaux-poutres constituée de poteaux de 3m de haut (hauteur approximative d'un étage) soutenant des poutres porteuses, soutenant elles même des solives espacées de 0,5m et des panneaux de 0,5m de côté, dimensionnés précédemment. On choisit de comparer plusieurs situations suivant la quantité et la fréquence de poteaux soutenant la structure. L'indice m désigne le numéro de la situation. Pour une meilleure représentation, voici ci-dessus un dessin du système pour m=4.

La première situation pour m=1 considère que le carré de 12m de côté est soutenu par 4 poteaux, les situations suivantes dupliquent la quantité de poteaux soutenant la structure. Les schémas ci-dessous représentent des coupes de la charpente pour chaque indice m.

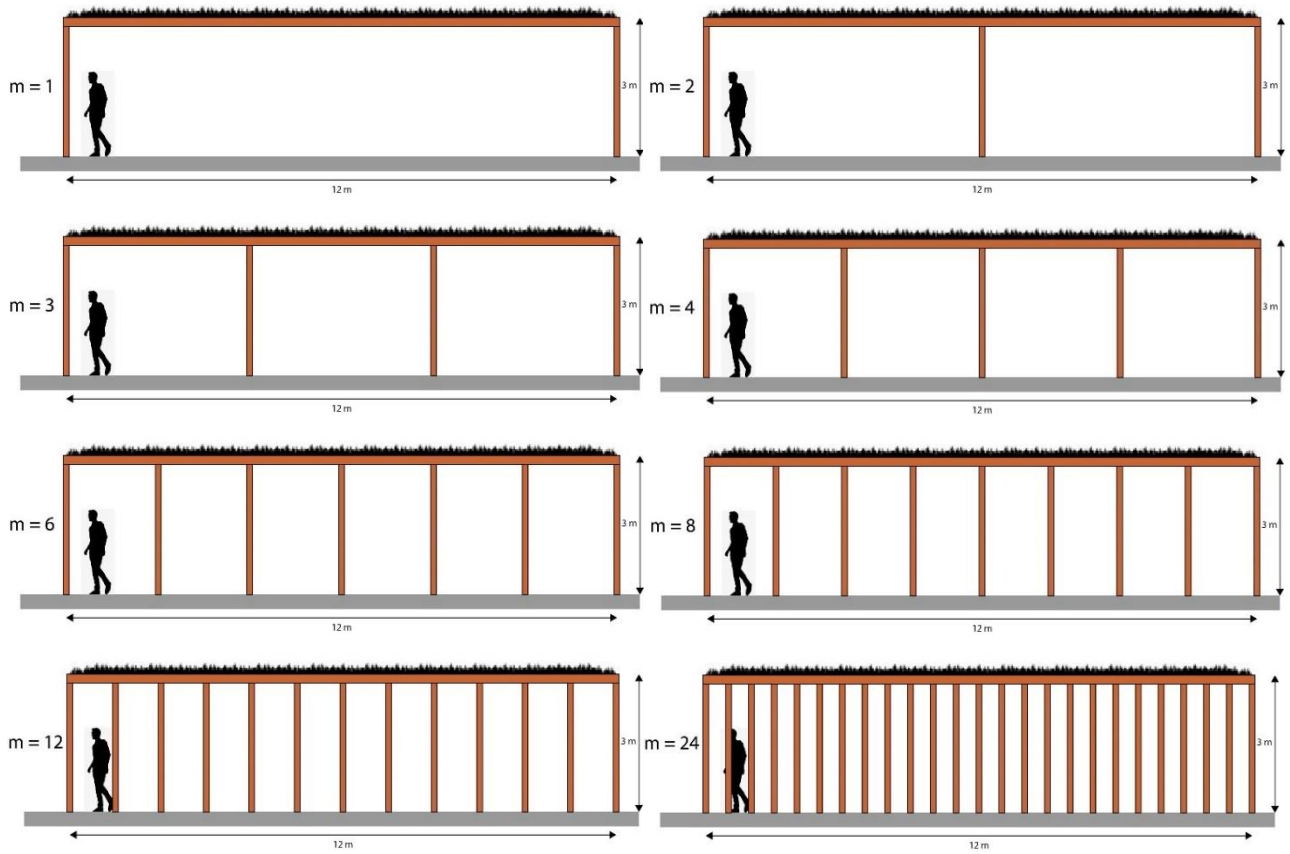


Figure 38 : Coupes des différentes situations

On imagine que la structure couvre une surface infinie, dont dimensionne un carré de 12m de côté. On ne s'occupera donc pas ici des cas particuliers des poutres sablières qui supportent moins de charge. Les cas m=2 ; m=4 et m=8 sont également représentés en plan en Annexe 9. Pour m=1, les poteaux sont espacés de 12m, pour m=2 de 6m, pour m=3 de 2 m etc…

Le programme fonctionne de la manière suivante : pour chaque charge de végétalisation donnée, il récupère l'épaisseur de panneau nécessaire (calculée précédemment) puis calcule successivement les dimensionnements optimaux nécessaires pour les solives, puis les poutres, et enfin les poteaux.

A noter que cette étude est faite pour estimer la quantité nécessaire de bois pour supporter la surcharge de la végétalisation, et évaluer l'efficacité du rajout de poteaux. La structure est en elle-même peu réaliste car seules les charges verticales sont prises en compte, nous négligeons donc ici l'influence du vent ainsi que la nécessité de contreventer la structure. Les charges de neiges normalement prises en compte dans les dimensionnements sont aussi négligées.

Concernant les paramètres choisis, on se place ici dans un bâtiment de catégorie A, classe de service 1, avec des pièces entièrement réalisées en GL24h (sauf les plaques KLH), et des liaisons rotules. Les plaques sont soumises à des charges variables de 150 kg/m^2, ce qui correspond à la charge prise pour un plancher accessible. Nous faisons ensuite varier les charges permanentes entre 10 kg/m^2 et 620 kg/m^2 pour évaluer l'impact de tous les types de végétalisation.

Le programme effectue une boucle, et remplit pour chaque charge les deux tableaux suivants :

Côté de la surface L	12	m
Masse vol du bois	420	kg/m3
Charge panneaux + végétalisation + exploitation (kg/m2)		
Permanente	625,46	kg/m2
Variable	150	kg/m2

Indice m2	Nombre de "carrés"	Longueur des poutres et solives (m)	Nombre de poteaux	Nombres de poutres	Nombre de solives	Masse supportée par une solive (kg/m)		Section optimale de solive calculée par le prog (m2)	Masse d'une solive (kg/m)
						Permanen	Variable		
1	1	12	4	2	25	312,73	75	0,1064	44,688
2	4	6	9	6	50	312,73	75	0,0396	16,632
3	9	4	16	12	75	312,73	75	0,0224	9,408
4	16	3	25	20	100	312,73	75	0,0154	6,468
6	36	2	49	42	150	312,73	75	0,0088	3,696
8	64	1,5	81	72	200	312,73	75	0,006	2,52
12	144	1	169	156	300	312,73	75	0,0036	1,512
24	576	0,5	625	600	600	312,73	75	0,0016	0,672

e ée g	Masse d'une solive (kg/m)	Nombre de solives supportée s par une poutre	Masse supportée par une poutre (kg/m)		Section optimale de poutre calculée par le prog (m2)	Masse d'une poutre (kg/m)	Masse supportée par un poteau (kg)		Section optimale de poteau calculée par le prog (m2)	Quantité totale de bois utilisée (m3)
			Permanent	Variable			Permanente	Variable		
	44,688	23	8220,614	1725	0,1064	44,688	103472,64	21600	0,16	36,3936
	16,632	11	3622,982	825	0,172	72,24	24147,504	5400	0,0484	19,3788
	9,408	7	2254,966	525	0,0728	30,576	10430,72	2400	0,0256	11,4432
	6,468	5	1595,99	375	0,0396	16,632	5795,46	1350	0,0196	8,466
	3,696	3	949,278	225	0,0168	7,056	2545,52	600	0,0144	6,168
	2,52	2	630,5	150	0,0088	3,696	1424,169	337,5	0,01	5,1804
	1,512	1	314,242	75	0,0036	1,512	629,996	150	0,0064	4,8864
	0,672	0	0	0	0,0002	0,084	156,743	37,5	0,0036	7,29

Tableau 4 : Calcul pour modélisation de charpente

La case jaune du premier tableau varie à chaque itération de la boucle en fonction de la charge de végétalisation appliquée. Durant une itération, le programme remplit successivement les trois colonnes vertes grâce au code de dimensionnement ELU présenté précédemment. Le dimensionnement de chaque pièce prend donc en compte la masse des pièces qui lui sont supérieures. On peut ensuite évaluer la quantité de bois nécessaire pour couvrir la totalité de carré de 12 m de côté.

Le résultat partiel de cette étude est donné dans le graphique ci-dessous. Pour plus de clarté, seulement les 5 premiers cas sont représentés. Le graphique complet est donné en Annexe 8 :

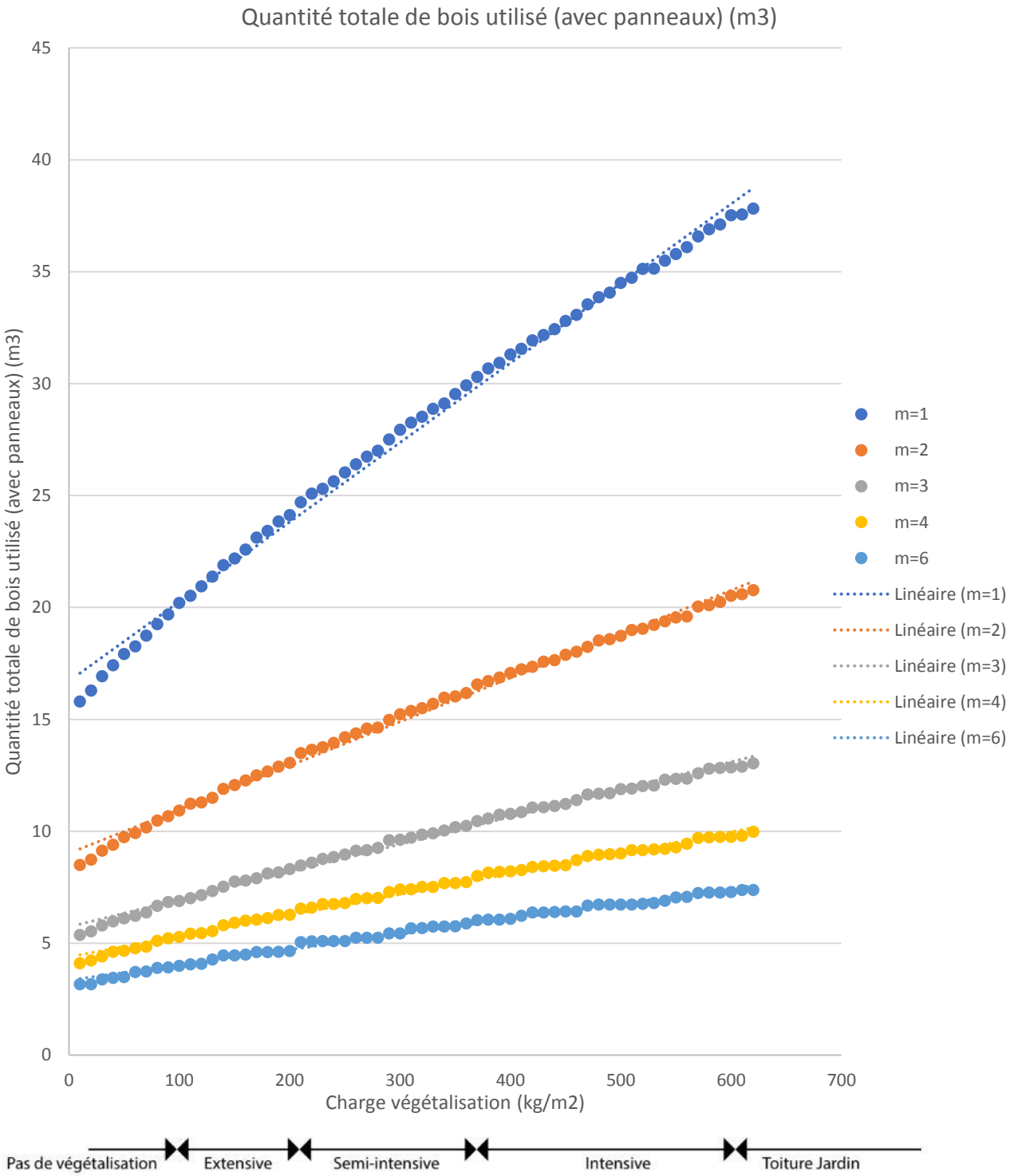


Figure 39 : Résultats pour la structure complète, quantité totale de bois utilisé (m^3) en fonction de la charge de végétalisation

Contrairement au test effectué pour les plaques simples, on obtient ici un résultat linéaire, ce qui nous indique que la quantité de bois nécessaire est à peu près proportionnelle à la charge appliquée. Le premier constat que l'on peut faire concernant ce résultat est l'efficacité notable de l'ajout de poteaux, qui permet d'économiser des quantités notables de bois. Ensuite on remarque la différence de pente qui indique que la structure avec beaucoup de poteaux nécessitera moins de renfort face à une surcharge.

On peut alors tracer les paramètres de ces droites (coefficient directeur et ordonnée à l'origine), en fonction du nombre de poteaux. On obtient les courbes ci-dessous :

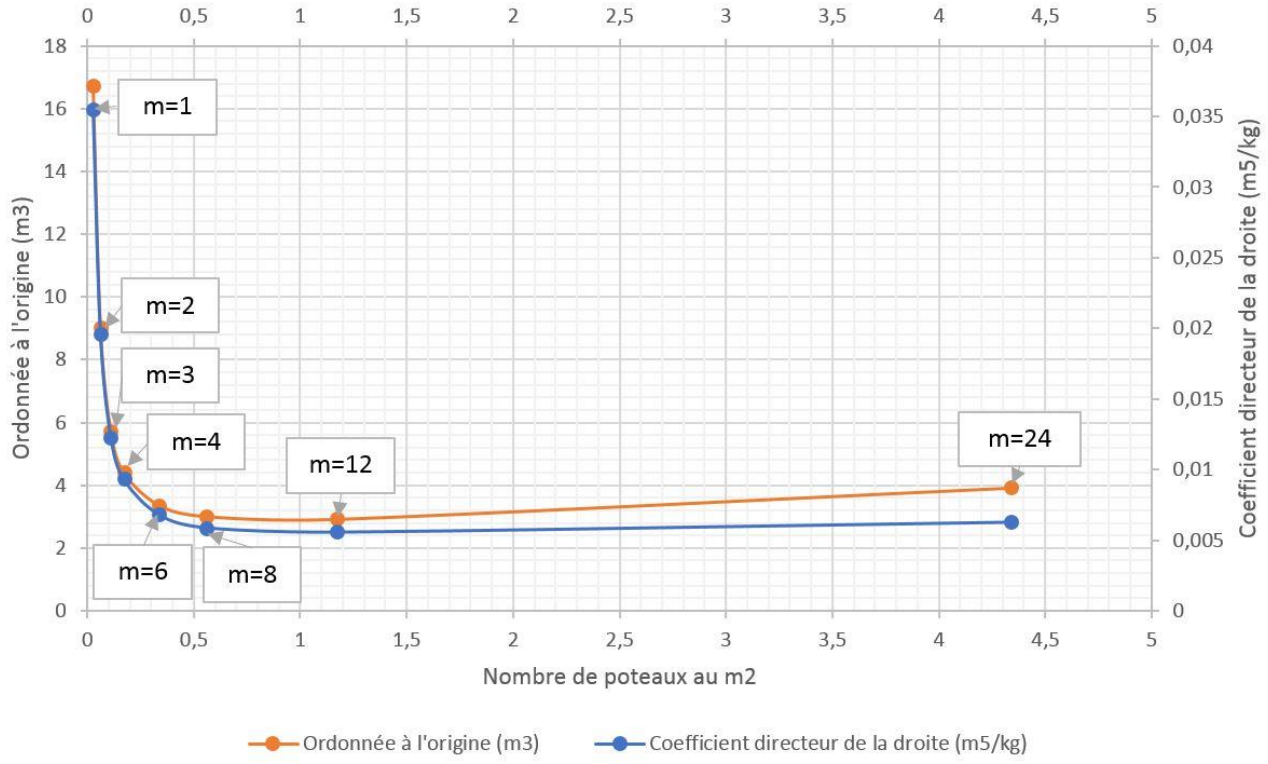


Figure 40 : Paramètres des courbes de résultats pour la structure complète : Ordonnée à l'origine (m^3) et coefficient directeur (m^5/kg) en fonction du nombre de poteaux par m^2.

Nous noterons d'abord que les trois derniers points correspondent à des indices m très élevés (m=8, m=12 et m=24) ce qui signifie qu'ils représentent des structures où les poteaux seraient espacés de 1,5m, 1m et 50cm. Cette possibilité est inenvisageable dans le milieu du bâtiment car l'espace serait trop encombré par les poteaux.

Les courbes sont toutes les deux strictement décroissantes sur la partie gauche. L'optimal en termes de gains de matériaux serait donc de construire avec le plus de poteaux possibles. Cependant, cela est bien évidemment désavantageux concernant l'usage du bâtiment puisque cela obstrue la circulation. Des structures comme des couvertures de terrains de sport, de parkings etc… ne peuvent se concevoir avec une telle quantité de poteaux.

La courbe change brutalement de vitesse de décroissance. La Figure 41 représente l'allure de la courbe sur les différentes zones du graphique. Ainsi, on a une première zone (m=1 à m=4) où le fait de rajouter des poteaux fait faire des économies notables sur les quantités de bois et les besoins de renfort. Dans deuxième zone (m=4 à m=8), le fait de rajouter des poteaux fait faire des économies de matériaux moins importantes, il est donc important de prendre d'abord en compte les besoins d'espace au sol du bâtiment. Dans la troisième zone (m=8 à m=24), non seulement nous avons vu que les structures étaient inenvisageables en réalité car les

poteaux obstruent la circulation, mais en plus on remarque que les quantités de bois et les besoins de renfort sont plus importants que dans la zone 2. Cette dernière zone est donc à prescrire.

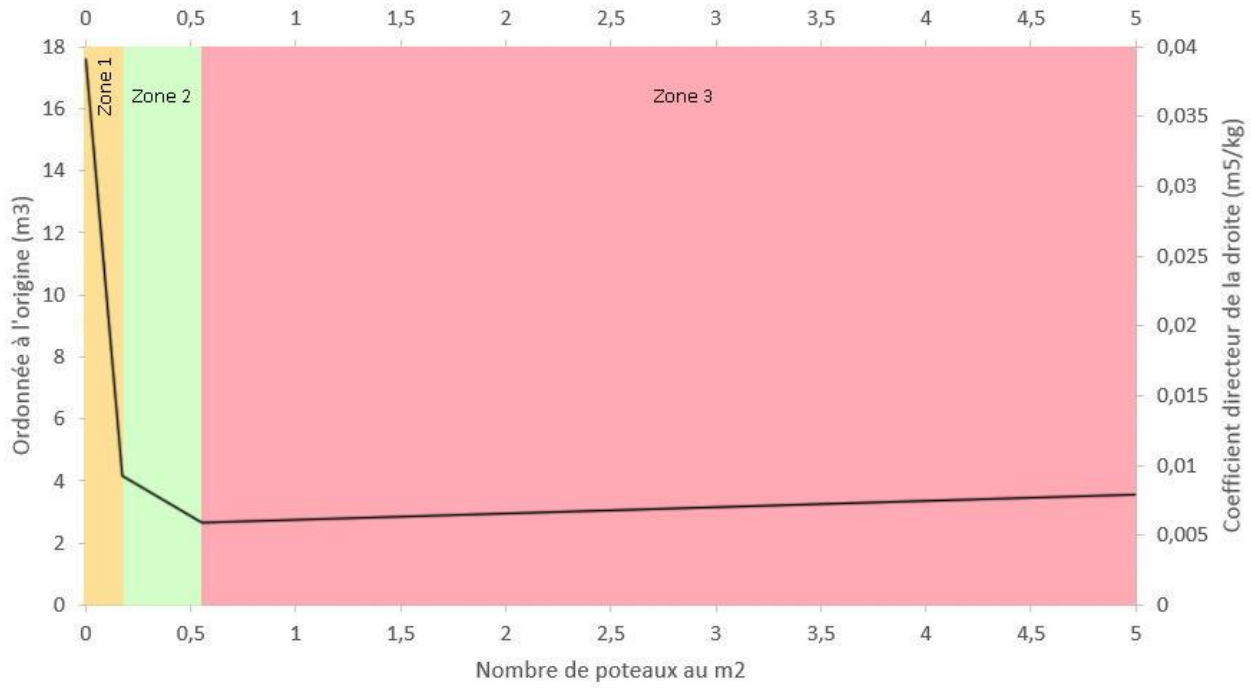


Figure 41 : Paramètres des courbes de résultats pour la structure complète : Ordonnée à l'origine (m^3) et coefficient directeur (m^5/kg) en fonction du nombre de poteaux par m^2 ; représentation schématique de l'allure des courbes

Compte tenu du changement brutal de vitesse de décroissance des courbes, il est donc intéressant de se placer entre la zone 1 et la zone 2 (m=4), pour avoir le moins de poteaux possibles tout en gardant des quantités de bois raisonnables. Cet endroit correspond approximativement à des poteaux espacés de 3m. Cet espacement est envisageable pour des bâtiments de logement ou de bureaux, mais ne devient plus possible si l'on travaille sur des projets nécessitant de grandes portées. En zone 1, le coût investi dans la charpente sera récupéré dans le gain d'espace.

c. Solutions constructives

o *Etat de l'art des solutions*

Quelques solutions constructives simples et connues existent pour augmenter la portée des ouvrages, les voûtes fonctionnant en compression sont un premier exemple, les aisseliers en sont un autre. Ils consistent en une pièce de bois placée en compression qui aide au soutien de la poutre. Ce principe a été repris dans plusieurs exemples que nous avons vus précédemment, comme dans le Naturoptère, et au restaurant universitaire de Metz, créant par la même occasion un jeu de formes avec les poteaux. Le marché couvert de Saint Dizier lui fait de la même manière travailler le bois en compression, en créant un système de voûtes.

Figure 42 : Naturoptère dans le Vaucluse ; Agence d'Architecture Arch'eco en association avec Yves Perret (sources [51] [52])

Figure 43 : Marché couvert de saint Dizier ; Architectes Christophe Aubertin et Aurélie Husson (source [46])

Figure 44:Restaurant universitaire de Metz ; Agences MiLLieux Architecture et KL Architectes (source [23])

De même, pour économiser de la matière, des solutions telles les poutres en treillis ou les poutres en I existent. La modélisation précédente ne prend pas en compte ses solutions car il a été choisi d'évaluer l'impact de la surcharge sur une structure la plus simple possible.

La surcharge générée par la végétalisation est vraiment importante et nécessite des dimensionnements inconcevables dans le cas des végétalisations les plus lourdes. Aujourd'hui, les toitures jardin intensives sur structure bois ne sont pas prévues par les règles professionnelles pour cette raison. Les toitures semi-intensives aussi sont difficiles à mettre en place car elles engendrent des surcoûts à ne pas négliger.

L'ajout de poteaux est une solution efficace permettant de reprendre la surcharge et de faire des économies, mais cela diminue grandement les possibilités d'aménagement intérieur. C'est pourquoi la considération de l'optimisation du nombre de poteaux par rapport à la surface du plan libre souhaitée est importante.

Une autre solution pour reprendre ces fortes surcharges est le mixage du bois avec d'autres matériaux moins chers et efficaces en compression (comme vu dans les exemples). Pour ne pas se tourner tout de suite vers le béton, nous avons vu dans les exemples que de tels matériaux existent avec un faible impact carbone, voire stockant du carbone (terre et paille).

- *Etude de l'efficacité des jambes de force*

Enfin d'évaluer l'efficacité des systèmes de jambes de force que l'on retrouve dans les exemples, on propose de refaire les modélisations précédentes en en rajoutant en haut des poteaux. On choisit de fixer les jambes de force à avec un angle de 45°, dans l'axe des poutres. On effectue différents tests selon le placement des jambes de force, on a ainsi jdf_2 désignant des jambes de forces placées à la moitié de poutre, jdf_3 au tiers, et jdf_6 au sixième. Quelques-uns des modèles sont schématisés ci-dessous pour plus de clarté. Le calcul de la section des poutres sera influencé par ces supports supplémentaires puisque le moment maximal et l'effort tranchant maximal vont diminuer (voir Figure 34). Au vu des résultats précédents, on choisit de calculer les cas m=1 à m=6.

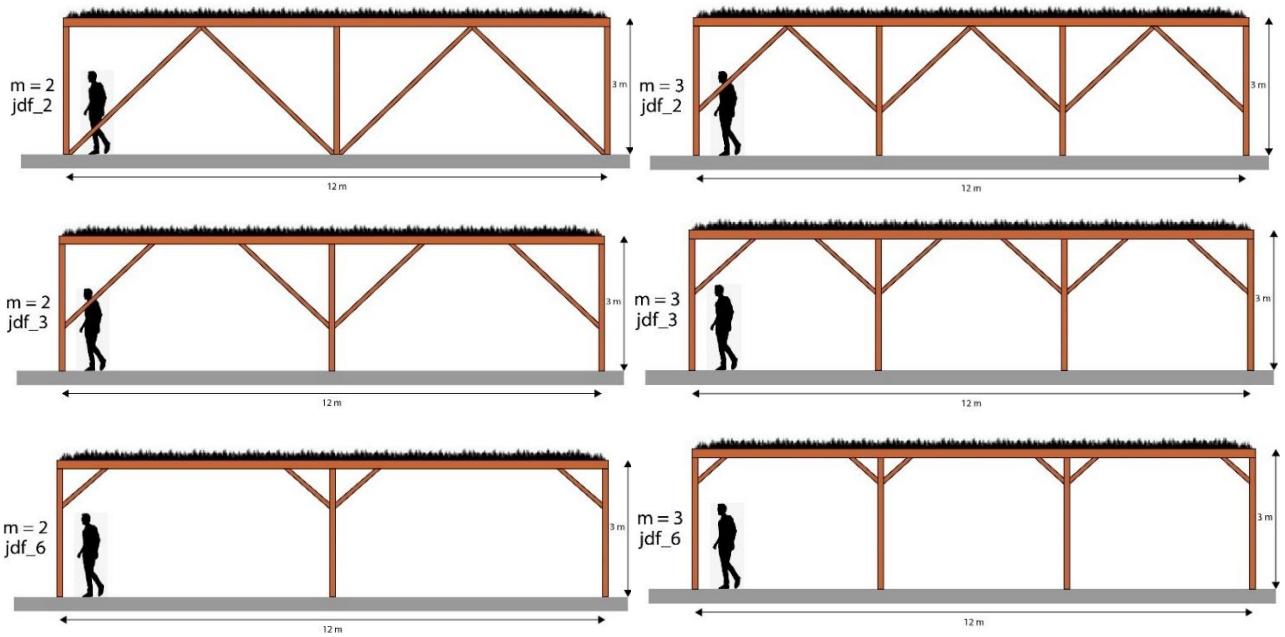


Figure 45 : Coupes du système avec les jambes de force pour m=2 et m=3

Les calculs sont effectués sur le même modèle que précédemment. Les jambes de force sont uniquement vérifiées au flambement et à la compression longitudinale comme les poteaux. On obtient les résultats suivants avec en pointillés, les courbes avec les différentes jambes de force, et en trait plein les anciennes courbes sans jambes de force.

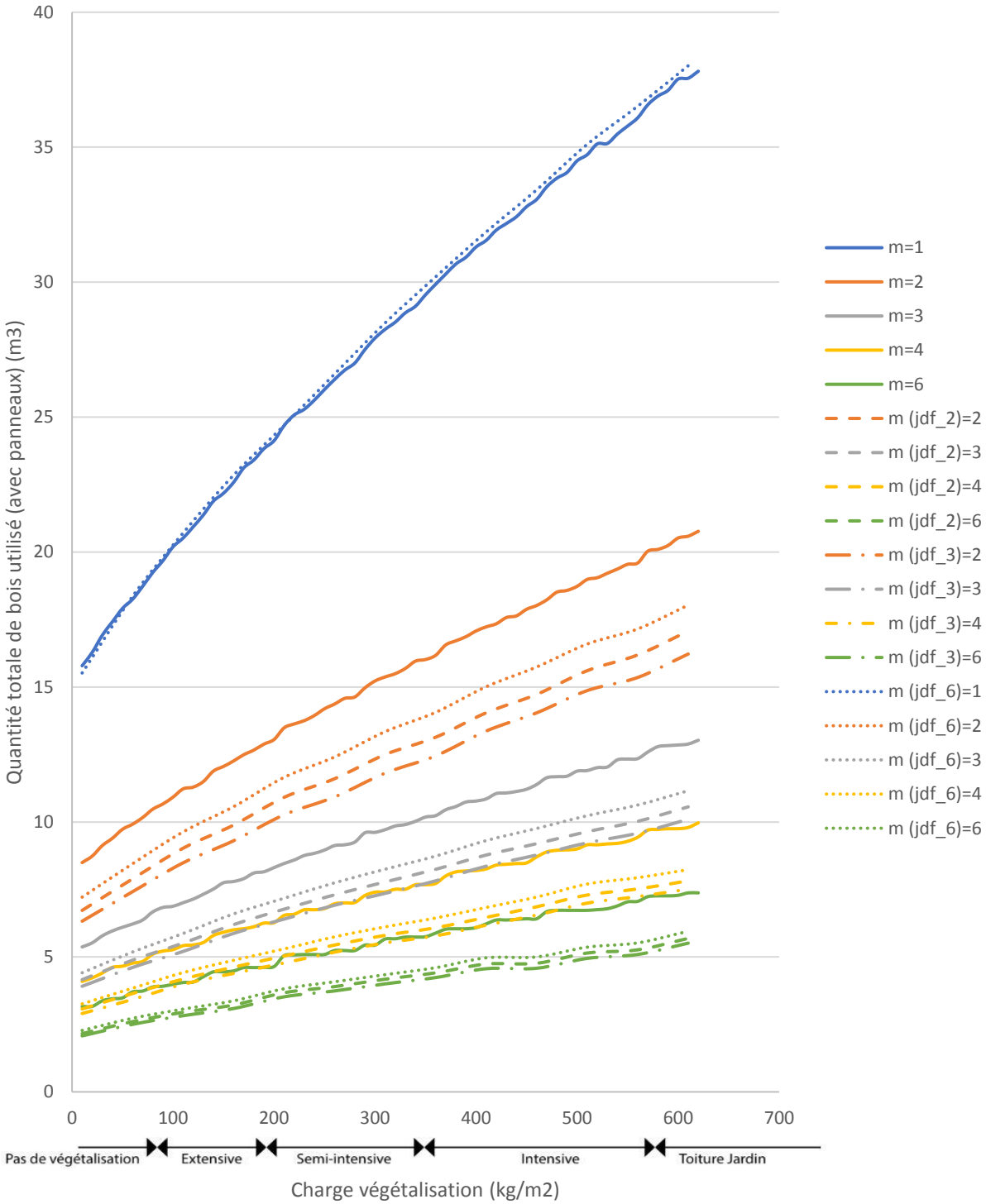


Figure 46 : Résultats de calculs pour la charpente complète avec les jambes de force. Quantité minimale de bois à utiliser (m^3) en fonction de la charge de végétalisation.

Au regard de ces résultats, on constate que les jambes de force permettent de diminuer les quantités de bois nécessaires pour les modèles numéros 2, 3, 4 et 6. Pour le cas m=2 (poteaux espacés de 6m) par exemple, on peut avoir pour une même quantité de bois (15m^3), une toiture semi-intensive sans les jambes de force ou une toiture intensive avec les jambes de force. Pour les cas m=3 à m=6, l'ajout des jambes de forces est quasi aussi performant que l'ajout de poteaux intermédiaires. Cependant, comme on peut voir sur la Figure 45, elles peuvent être parfois aussi très contraignantes en terme d'espace perdu, si elles sont trop basses et qu'elles obstruent la circulation.

On constate aussi que si l'espacement des poteaux est trop grand (m=1), l'action des jambes de force devient négligeable, voire négative. Il est possible que dans ce cas-là, il faille chercher d'autres angles pour les jambes de force, pour pouvoir soutenir les poutres « plus loin ».

Pour les tests que nous avons faits, les jambes de force semblent les plus efficaces pour le cas m=2. Elles permettent d'économiser autour de 20% de la quantité de bois initialement prévue ce qui n'est pas négligeable, d'autant plus lorsque la végétalisation demande des dimensionnements importants. Ces chiffres obtenus pour des structures simplifiées nous montrent les performances possibles des jambes de force, et pourquoi elles ont été utilisées dans les trois exemples précédents. En traçant, comme précédemment, les coefficients des courbes obtenues en fonction du nombre de poteaux, on obtient le graphique suivant.

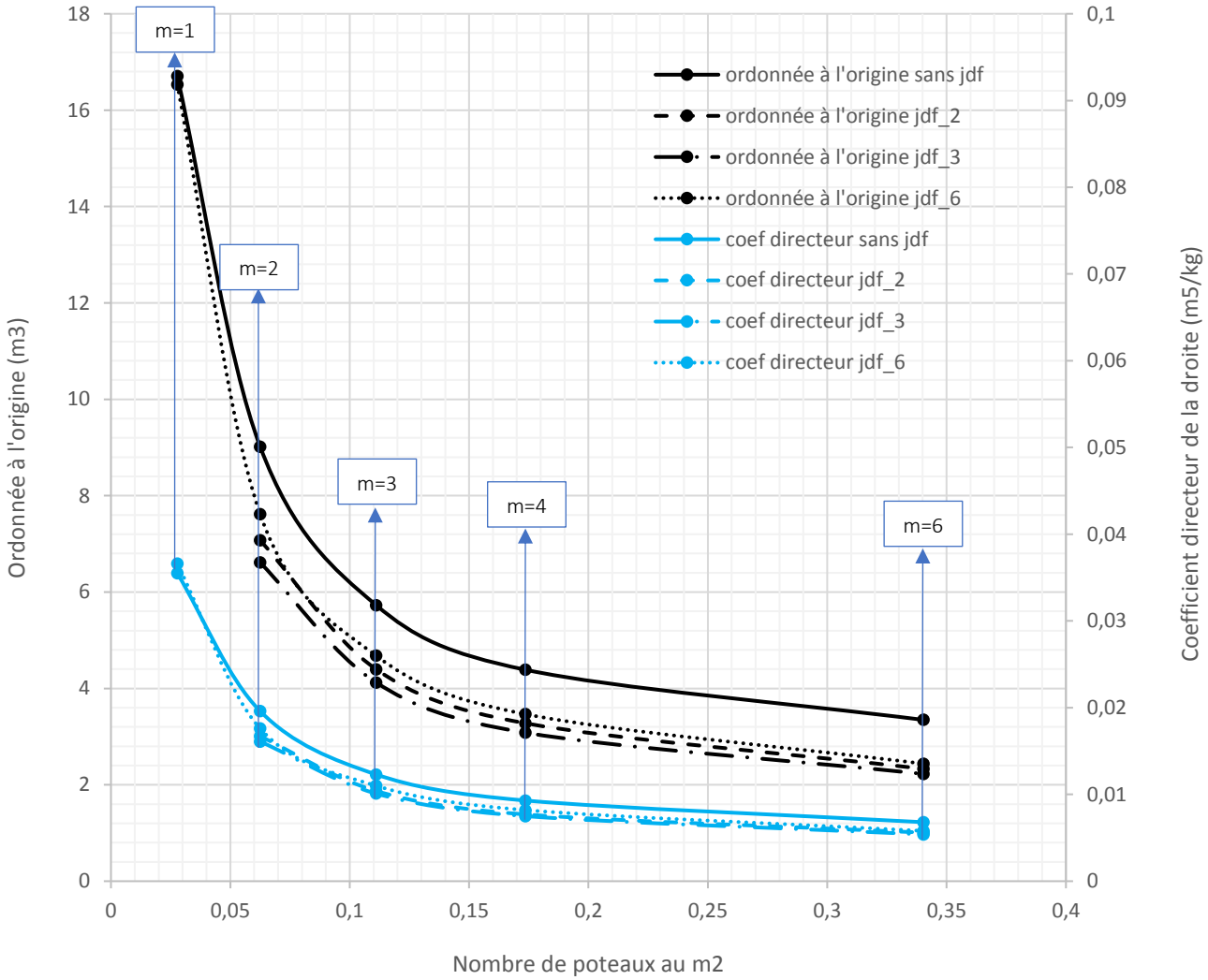


Figure 47 : Paramètres des courbes de résultats pour la structure complète avec les jambes de force : Ordonnée à l'origine (m^3) et coefficient directeur (m^5/kg) en fonction du nombre de poteaux par m^2.

On constate bien sur ces courbes, l'amélioration globale des performances pour tous les cas dépassant m=2. On peut aussi avancer que parmi les modèles testés, la jambe de force située au tiers de la poutre porteuse est la plus performante (jdf_3).

Ces modèles nous ont permis de constater l'action économe non négligeable des solutions constructives des jambes de forces. Le gain de matière est particulièrement efficace lorsqu'il s'agit de reprendre des charges importantes. Cela met en lumière leur utilisation dans les exemples que nous avons pu observer, comme dans le restaurant universitaire de Metz, ou un jeu esthétique met en valeur ces procédés constructifs.

3. Piste potentielle d'optimisation du dimensionnement : prise en compte du climat

Les règles professionnelles préconisent de prendre la masse du substrat saturé en eau comme charge permanente. Ces préconisations permettent de se placer dans le pire cas de chargement, et de garder une sécurité par rapport au climat. De plus, on peut décider d'arroser le substrat à n'importe quel moment. Les imprévisions météorologique et tout apport d'eau imprévu est donc bien assuré par le dimensionnement des structures. Dans la réalité, le substrat n'est pas toujours saturé en eau s'il n'est pas arrosé.

Dans l'Eurocode, les charges de neige sont considérées comme des charges variables qui sont pondérées en fonction de la probabilité de chute de neige (le coefficient dépend du pays et de l'altitude). Il pourrait être envisageable d'effectuer une pondération similaire pour les charges d'eau. Ainsi, peut-être que les bâtiments construits dans des zones où le climat est plutôt sec (exemple climat méditerranéen) n'auront pas à supporter des charges aussi importantes qu'actuellement.

Pour effectuer cette pondération, il faudrait d'abord avoir une idée précise de l'apport d'eau extérieur, et donc des débits d'arrosage, de pluie, et leur fréquence. Par exemple, bâtiments en climat méditerranéen qui semblent propices à un allègement des charges de calcul, peuvent être dangereux en raison des épisodes de pluie courts et intenses dans ces régions. De plus, les règles professionnelles préconisent un arrosage systématique dans ces régions.

A noter que, outre l'effet esthétique, le manque d'arrosage des toitures dans certaines régions sèches peut être dangereux par rapport à la sécurité incendie, les herbes sèches pouvant s'embraser et propager le feu très rapidement.

Pour mener cette étude, il serait aussi utile d'utiliser des théories physiques sur le mode d'humidification, de drainage et de séchage du substrat. L'application de ces théories nécessite la prise en compte des paramètres météorologiques comme la pluviométrie, l'humidité de l'air ambiant, la température et l'ensoleillement. Les autres paramètres sont propres au substrat utilisé et à sa mise en œuvre. En effet, les substrats sont plus ou moins capables de retenir l'humidité en fonction de leur porosité, de leur perméabilité etc... De même la pente et l'efficacité du mode de drainage vont conditionner l'évacuation des eaux et donc l'humidité finale du substrat.

Ces études devront aussi sûrement prendre en compte le type de végétation implantées sur la toiture. En effet, les plantes puisent l'eau pour se gorger de sève, leur masse augmente donc également avec l'humidité. Selon la végétation choisie, la vitesse de récupération de l'eau et la durée de stockage varie et fait donc aussi varier la masse du complexe.

Pour optimiser les dimensionnements de cette manière, il serait donc nécessaire de prendre en compte une multitude de paramètres, résumés dans le schéma ci-dessous.

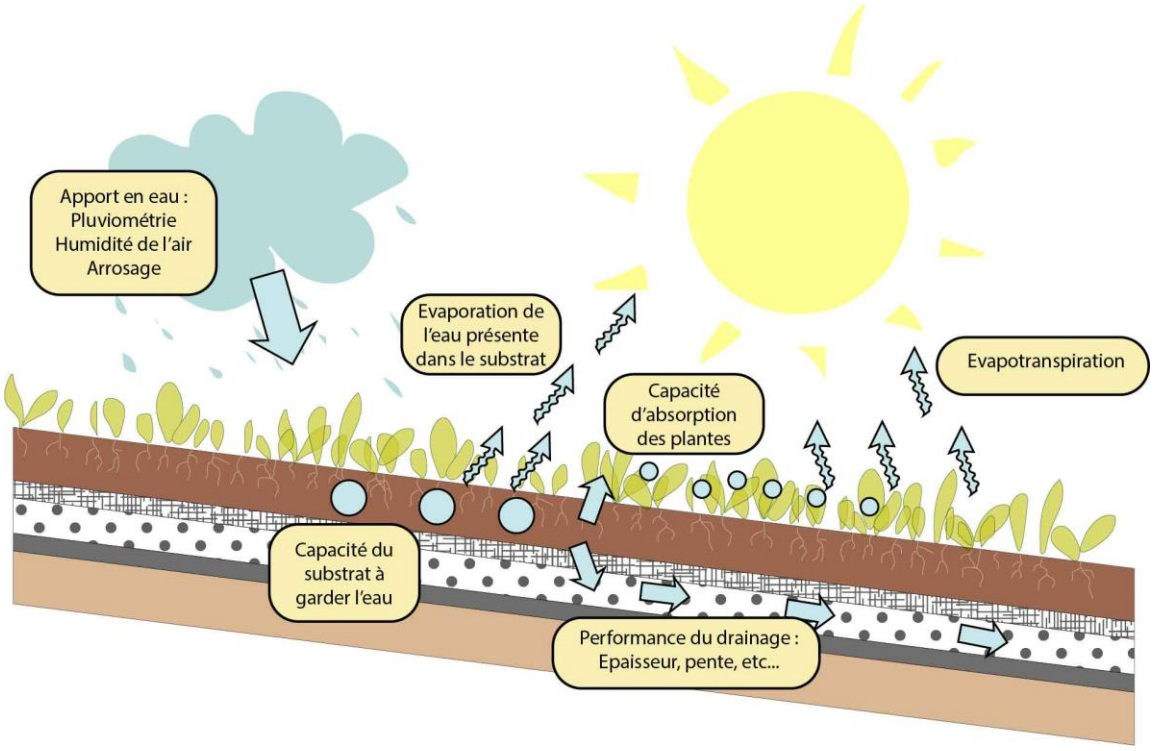


Figure 48 : Circuit de l'eau dans un toit végétalisé

Enfin, il ne faudra pas négliger les effets éventuels du changement climatique qui pourrait être une source de risques, comme des pluies diluviennes dans des zones qui n'en reçoivent pas habituellement. L'optimisation du dimensionnement par l'évaluation du risque de saturation du substrat est donc un sujet complexe, qui nécessiterait de nombreuses études dans les domaines de l'hydrologie et de la météorologie. A ce jour, nous ne pouvons pas savoir si une telle optimisation ferait faire de réelles économies ou serait négligeable.

4. Etude sismique

a. Introduction aux principes généraux du Génie Parasismique

L'équation de déplacement d'un bâtiment face à une sollicitation dynamique est donnée par la seconde loi de Newton par :

$$m(a_{sol} + \ddot{u}) = ku + c\ddot{u}$$

Avec :

$$\begin{cases} m\ la\ masse\ de\ la\ structure \\ a_{sol}\ l'accélération\ du\ sol \\ u\ le\ déplacement\ en\ tête\ de\ la\ structure\ (\dot{u}\ sa\ vitesse\ et\ \ddot{u}\ son\ accélération) \\ k\ la\ raideur\ de\ la\ structure \\ c\ l'amortissement\ de\ la\ structure \end{cases}$$

Soit

$$ma_{sol} = -m\ddot{u} + ku + c\dot{u}$$

$$\underbrace{E_{injectée} = E_{cinétique} + E_{déformation} + E_{dissipation}}_{E_{stockage}}$$

Les stratégies de conception en génie parasismique se basent sur la modification des paramètres de cette équation, ainsi on peut tenter de :

- Réduire l'énergie injectée
  - En réduisant la masse (choix de matériaux légers)
  - En réduisant l'accélération du sol (choix du site par l'évaluation du risque sismique et de la nature du sol
- Augmenter l'énergie de stockage
  - En réduisant la masse (choix de matériaux légers)
  - En augmentant la raideur de la structure au niveau local (exemple utiliser des murs plutôt que des poteaux) ; Au niveau global en évitant les contrastes de rigidité pour répartir les déformations dans la structure.
- Augmenter l'énergie de dissipation
  - En augmentant l'amortissement de la structure (exemple utiliser des systèmes de pendules)

b. Risque sismique de la végétalisation

Le bois est un matériau intéressant en Génie Parasismique car d'une part il est léger, et d'autre part il est flexible, c'est-à-dire qu'il est capable d'accepter des déformations importantes sans arriver à son point de rupture. Les assemblages permettent aussi de dissiper l'énergie sismique. Ajouter de la masse à la structure en revanche, est néfaste d'un point de vue parasismique car elle augmente les mouvements du bâtiment, surtout

en hauteur, c'est pourquoi on pourrait penser que la végétalisation est problématique. Pour éviter ces mouvements, des travaux sont en cours pour dissiper l'énergie du séisme dès les ancrages [70]. Une autre solution est de rigidifier la structure. L'ajout de masse entraîne la nécessité d'élargir les poteaux pour supporter cette charge supplémentaire, et donc augmente la raideur de la structure.

La période propre d'un bâtiment est la période selon laquelle le bâtiment oscille librement suite à un déplacement. C'est un paramètre dynamique dépendant de la masse et de la raideur de la structure.

On a $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$, donc l'ajout de masse a pour effet d'augmenter la période propre du bâtiment, alors que l'augmentation de raideur aura pour effet de la diminuer. Pour que le bâtiment n'entre pas en résonnance lors d'un séisme, le but est d'éloigner sa période propre de celle du sol. Afin d'évaluer l'influence de l'ajout de masse et de l'augmentation de raideur d'une structure bois que l'on végétalise, on propose de calculer la période propre de cette structure en fonction de la masse de végétalisation. Pour cela, on reprend les différents modèles de structures poteaux-poutres dimensionnés précédemment.

La raideur d'un poteau est donnée par $k = \frac{12\,EI}{h^3}$ avec E le module d'Young du bois, I l'inertie du poteau et h sa hauteur. On considère la structure en deux dimensions, sur une seule file de poteaux, comme illustré Figure 38. En notant n le nombre de poteaux, m_n la masse d'un poteau et la masse qu'il supporte, k_n la raideur d'un poteau, m la masse totale, k la raideur totale et a^2 la section d'un poteau, on obtient :

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{n \times m_n}{n \times k_n}} = 2\pi\sqrt{\frac{m_n}{\frac{12E\frac{a^4}{12}}{h^3}}} = \frac{2\pi}{a^2}\sqrt{\frac{m_n h^3}{E}}$$

On peut alors tracer, d'après les dimensionnements à l'Eurocode, la période des différents cas de structure en fonction de la charge de végétalisation appliquée. On obtient le graphique ci-dessous :

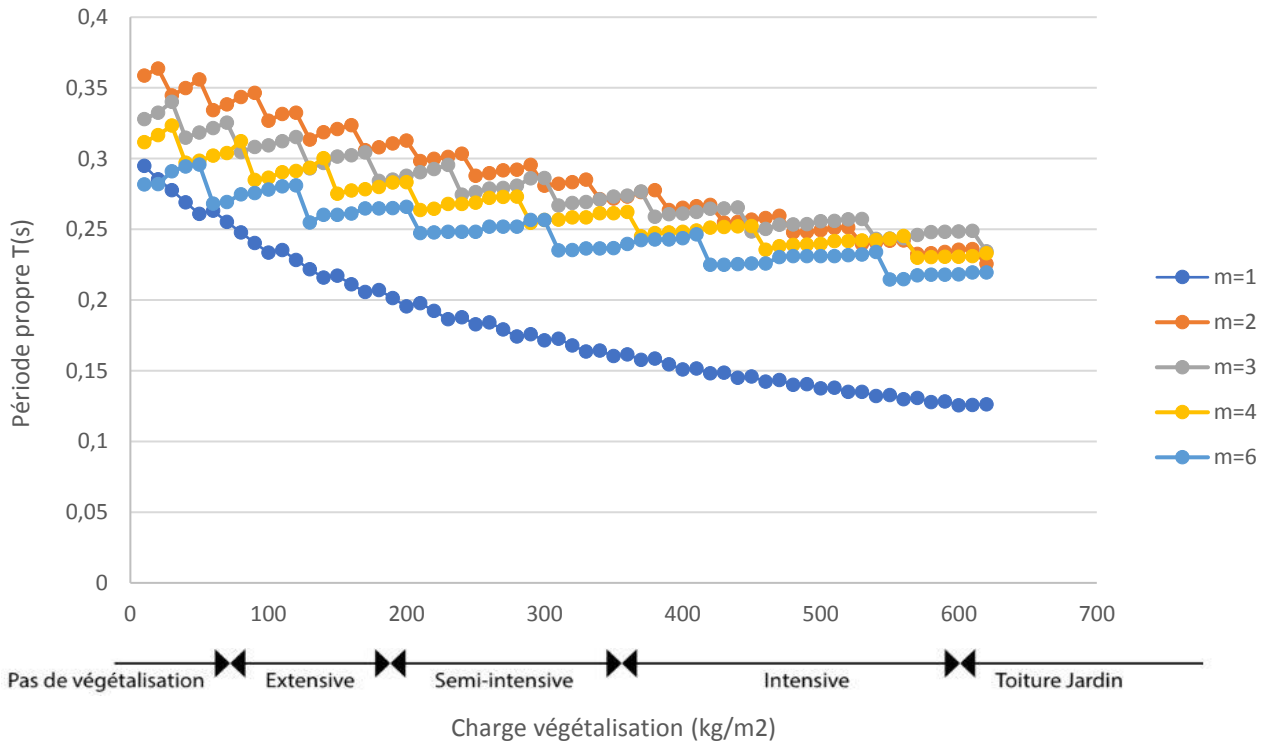


Figure 49 : Période propre de la structure dimensionnée à l'Eurocode en fonction de la charge de végétalisation.

Les paliers observables sur ces courbes sont dus au pas de calcul des sections de poteaux minimales. Le pas a été fixé à 5mm pour le calcul des sections des poteaux. On remarque que localement, l'augmentation de la masse entraîne une légère augmentation de la période propre. En revanche globalement, l'augmentation des sections des poteaux fait fortement diminuer la période propre de la structure. On peut donc en déduire que l'augmentation de la raideur de la structure a une influence plus importante que l'augmentation de la masse, donc la végétalisation permettrait de consolider une structure face à un séisme.

Comme l'ajout de masse devient plus problématique lorsque l'on travaille sur des structures de grande hauteur, on se propose d'ajouter des étages à la structure initiale. On travaillera ici uniquement avec le cas m=4, soit une file de poteaux espacés de 3m. Le schéma de la structure est présenté ci-contre :

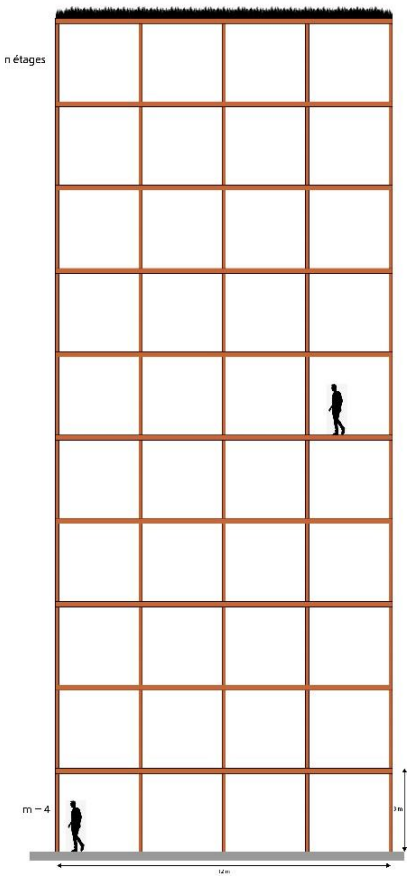


Figure 50 : Schéma de la structure pour m=4 avec 10 étages

Tous les planchers ont des masses égales. Pour le calcul de la quantité de bois nécessaire à chaque plancher, on reprend les résultats obtenus pour le toit sans végétalisation. Le calcul de section des poteaux en revanche va demander de nouveaux dimensionnements pour prendre en compte les étages supérieurs. On considère que les poteaux de tous les étages ont les mêmes sections. Pour faciliter le dimensionnement, on dimensionne des poteaux longs de la hauteur du bâtiment (n x 3m) et de longueur de flambement 3m.

On obtient le graphique ci-dessous :

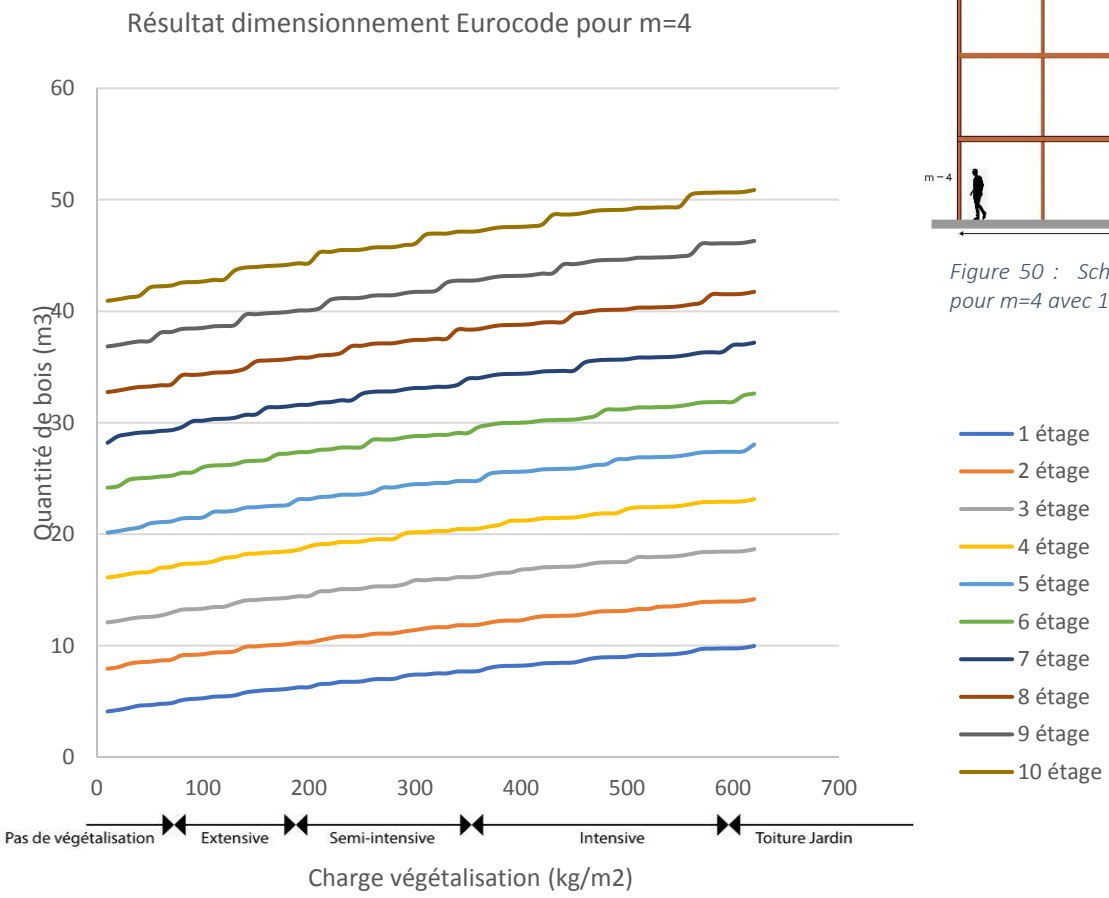


Figure 51 : Dimensionnement à l'Eurocode du cas m=4 pour plusieurs étages ; quantité de bois totale (m3) en fonction de la charge de végétalisation (kg/m2)

Au regard des résultats obtenus, on peut d'abord constater que les besoins de consolidation pour passer d'une toiture sans végétalisation à une toiture jardin varient peu selon le nombre d'étages de la structure. En effet, pour un seul étage (c'est-à-dire un rez-de-chaussée uniquement), on a un écart d'environ 6 m^3 de bois entre la toiture nue et la toiture jardin ; écart qui s'élève à 10 m^3 pour le cas d'un bâtiment à 10 étages.

On se propose de calculer les périodes propres de ce bâtiment en fonction de son nombre d'étages et de sa charge de végétalisation. On obtient le résultat suivant.

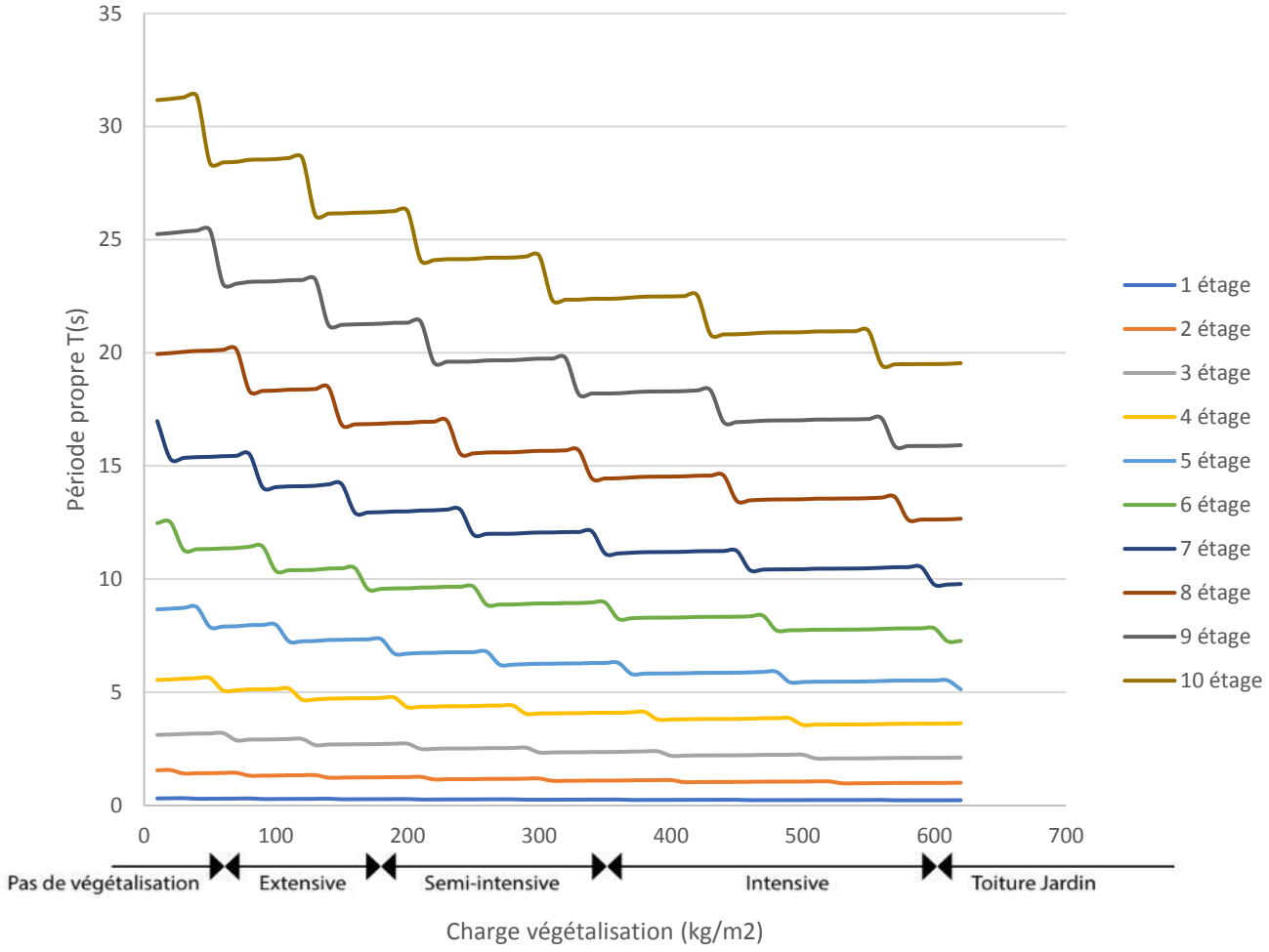


Figure 52 : Période propre de la structure en bois en fonction de la charge de végétalisation en toiture et dépendant du nombre d'étages.

On constate que plus la structure est haute, plus l'élargissement des poteaux qui fait diminuer la période a de l'influence par rapport à l'augmentation de la masse. Globalement, les périodes obtenues sont assez importantes, il serait judicieux d'effectuer ces études au cas par cas, en prenant en compte l'environnement extérieur, soit le sol et le risque sismique.

En conclusion de cette étude, on peut déduire à priori que la végétalisation aura peu d'influence sur les paramètres dynamiques de la structure, par rapport aux renforts qu'il faudra mettre en place pour la supporter. La modification des paramètres dynamiques de la structure est cependant notable et ne doit pas être négligée lors d'un dimensionnement parasismique.

III) Humidité et chaleur : les risques et les atouts de la végétalisation sur structure bois

1. L'eau : Un danger pour le bois

a. Présentation des risques

L'humidité d'une structure en bois peut être à l'origine de plusieurs problèmes, dangereux pour la durabilité de la structure et la santé [37].

Le développement des champignons est conditionné par la présence d'eau. En effet, celle-ci est absolument nécessaire au fonctionnement de leurs enzymes digestives. Une exception est cependant présente dans le cas de la mérule pleureuse qui a la capacité de « voyager » en passant à travers des joints de maçonnerie par exemple, et en transportant l'eau nécessaire à son développement. Il suffit donc qu'il y ait une unique source d'humidité pour que ce champignon se développe. Si le milieu est confiné, le champignon le garde humide car il évacue de l'eau lors de sa respiration, ce qui favorise sa multiplication. Cela en fait un champignon redoutable pour les constructions.

Figure 53 : Photographie de mérule pleureuse

Les champignons s'attaquant au bois de construction sont des champignons saprophytes (c'est la catégorie qui se nourrit de déchets organiques ou d'organismes morts). Ils se distinguent en deux catégories, les champignons lignicoles et lignivores.

Les champignons lignicoles n'attaquent pas les constituants structuraux de la paroi cellulaire et ne sont donc pas dangereux pour la structure. Le bois est bleui, ce qui peut être esthétiquement déprécié, mais n'est pas moins performant.

Les champignons lignivores sont plus dangereux, la mérule en fait partie. Ils ont la capacité de digérer la cellulose et parfois aussi la lignine du bois, ce qui affecte beaucoup les propriétés mécaniques du bois. Ces affectations sont visibles par l'apparition de pourritures, brunes, blanches ou noires.

Le développement de ces champignons est donc favorisé par l'humidité. On considère qu'ils se développent entre 22% et 80% d'humidité (une humidité trop importante empêche aussi le développement des champignons car l'oxygène n'est plus assez abondant : exemples pieux de Venise). Les dispositions constructives visent dont à rester en dessous de 22% d'humidité.

Les autres ennemis du bois sont les insectes xylophages, dont les larves se nourrissent de bois en creusant des galeries. Contrairement aux champignons, leur développement n'est pas conditionné par la présence d'eau, et peut tout à fait se produire dans des milieux secs et sains. Cependant on peut noter quelques conditions qui favorisent le développement de certaines espèces. Ainsi, la petite vrillette et la grosse vrillette préfèrent les milieux humides et les déjà bois infestés par des champignons lignivores, car ils « prédigèrent » le bois et l'enrichissent en protéines

Outre les solutions exceptionnelles où le bois est conservé avec une humidité supérieure à 80%, les premières précautions à prendre pour éviter l'humidification du bois au-delà de 22% sont classiques :

- évacuation des eaux de pluie (éviter les grandes surfaces horizontales, les pièges à eau, prévoir du drainage…)

- pas de contact du bois avec le sol (faire des ruptures de capillarité en pierre ou en béton, systèmes d'ancrage métallique des poteaux.

Si un défaut d'étanchéité advient sur une toiture en béton et en acier, il est décelé immédiatement par des coulures et des traces de moisissure. Comme la dégradation des matériaux par l'eau prend un certain temps, on a alors la possibilité de traiter et de réparer le défaut. En revanche, sur une toiture en bois, comportant souvent des faux plafonds, l'eau est absorbée par le bois et le sinistre n'est pas visible. Le bois est rapidement attaqué par l'humidité et il est souvent trop tard pour la structure lorsqu'on observe les dégâts. Ainsi, non seulement l'eau a des conséquences sur la structure plus rapide sur le bois que sur le béton, mais en plus le sinistre n'est pas visible immédiatement. La dangerosité des défauts d'étanchéité est donc accrue sur un support bois, c'est pourquoi il est important de porter une attention particulière sur la mise en œuvre de l'étanchéité des toitures [66].

b. Etanchéité des toitures terrasses

o *Procédés d'étanchéité*

L'eau peut venir soit d'une infiltration due à un défaut extérieur, ou de la condensation de l'humidité intérieure. Les différents processus sont résumés dans les schémas ci-dessous :

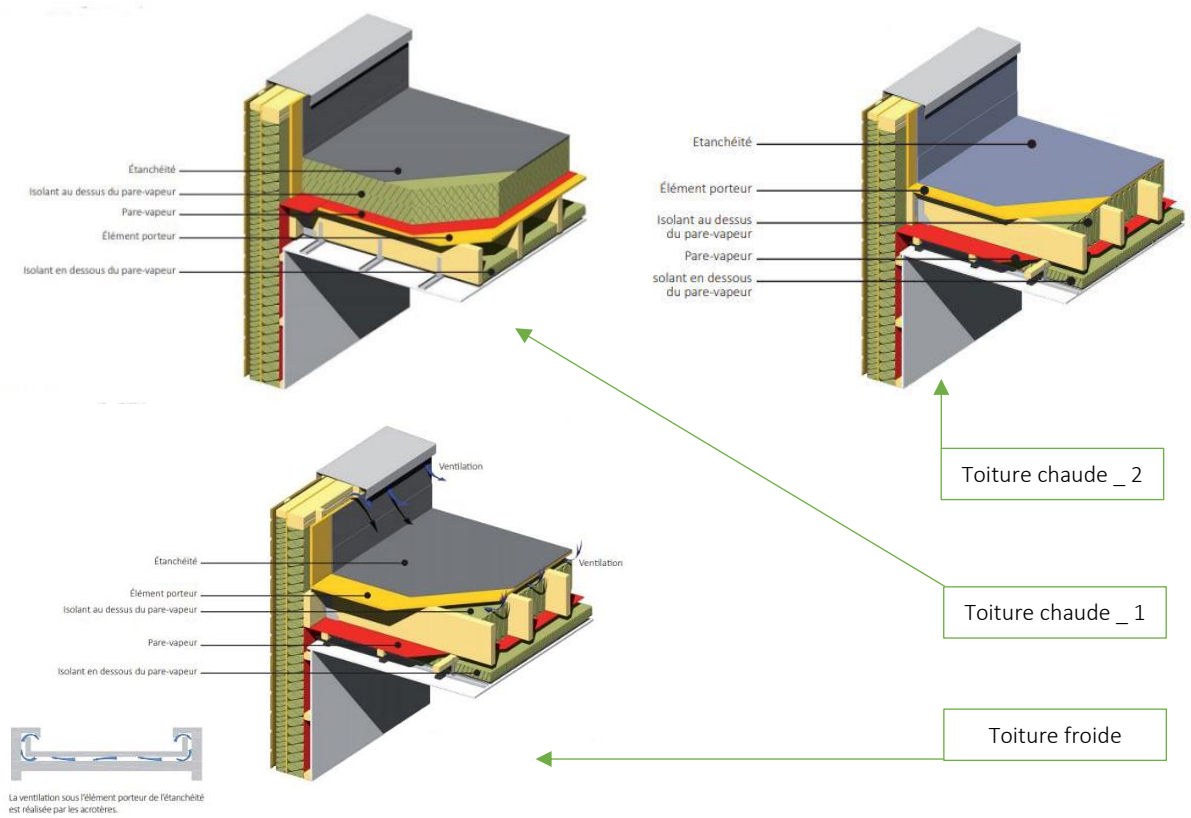


Figure 54 : Solutions de mise en oeuvre de l'étanchéité des toitures (schémas issus d'un document du cofidab [67])

La première solution, Toiture chaude_1, est la plus sûre au niveau de l'étanchéité, et c'est celle qui est préconisée [66] [68]. L'isolation est placée au-dessus des panneaux, et est entourée par l'étanchéité supérieure et le pare vapeur. Cela empêche l'eau de pénétrer l'isolation et d'atteindre son point de rosée. En cas de défaut, les éléments bois ne risquent pas de pourrir car ils ne sont pas confinés. Une petite isolation supplémentaire peut être présente sous les panneaux si elle est inférieure au tiers de l'isolation globale. Cette recommandation permet d'éviter l'atteinte du point de rosée en dessous du pare-vapeur.

La deuxième solution, Toiture chaude_2 peut être dangereuse. En effet, au moindre défaut entraînant une infiltration, l'eau se retrouve piégée entre l'étanchéité supérieure et le pare-vapeur. Condensée, elle peut attaquer la structure en bois. C'est là que le sinistre peut être visible trop longtemps après la première infiltration, lorsque la structure est fortement affectée.

Le principe de la toiture froide diffère de la toiture chaude_2 en ce qu'il propose une aération par lame d'air pour évacuer une humidité éventuelle. Cette solution est intéressante mais elle est difficile à mettre en œuvre. La lame d'air doit être suffisamment épaisse pour que l'évacuation soit suffisante, et les remontées d'étanchéité ne doivent pas obstruer le mouvement de l'air [68].

Dans le cas des toitures végétalisées, il est demandé que les membranes d'étanchéité soient anti-racinaires. Le test anti-racines est plutôt contraignant car il doit durer 10 ans. Les membranes ayant passé ce test forment donc un panel restrictif. Même avec l'utilisation des membranes anti-racines, certains types de plantes (comme les arbres) restent interdits sur les toitures végétalisées car les racines pourraient attaquer le système à long terme, au-delà des 10 ans du test.

Enfin, dans le cas des toitures terrasses piétonnes, une recommandation effectuée par le programme PACTE préconise de doubler les membranes sur support bois, afin de réduire le risque de sinistre dû à l'usage ou au percement d'une membrane d'étanchéité.

- *Origine des risques.*

Lorsque l'étanchéité est placée dans les règles de l'art par des étancheurs qualifiés, il n'y a pas de risque d'infiltration et de pourriture. Mes discussions avec des représentants de l'Adivet, du FCBA et du CSFE [66] [68] (srr) m'ont cependant permis de déceler quelques sources de risque potentiels.

D'abord l'étanchéité n'est pas toujours faite par des étancheurs qualifiés. Dans le cas de très petits projets, elle peut être réalisée par des particuliers bricoleurs (comme vu dans l'exemple de la maison de Yoann). Sinon elle est parfois réalisée par des couvreurs, ou d'autres entreprises plus habituées à travailler sur support béton, dans le cas de marchés globaux par exemple. Les couvreurs sont généralement peu habitués et formés à la mise en place des membranes d'étanchéité. Un manque d'expérience peut être à l'origine de petits défauts de mise en œuvre, comme une soudure mal effectuée.

Des défauts peuvent également venir d'une mauvaise gestion du chantier. Les panneaux de bois doivent normalement être couverts jusqu'à l'intervention de l'étancheur, mais il arrive que ce protocole ne soit pas bien respecté. Les panneaux peuvent alors s'humidifier avant l'intervention de l'étancheur, qui va enfermer l'eau sous l'étanchéité. Sur chantier, on peut également avoir des problèmes de percement accidentel de la membrane par un autre corps d'état, après l'intervention de l'étancheur.

Enfin, l'étanchéité sur support bois demande une attention particulière concernant le soudage à chaud des membranes, pour éviter tout départ de feu, notamment lorsque que l'on est à proximité du bardage d'une façade relevée. Les étancheurs utilisent des films protecteurs sur les produits combustibles pour éviter

d'endommager la structure. Ce risque est réduit pour la toiture chaude_1 car l'étanchéité n'est pas en contact avec les panneaux en bois.

Les risques sont donc réduits et peuvent être évités si l'on fait appel à des étancheurs compétents et que le chantier est bien géré. La végétalisation n'implique pas de risque particulier concernant l'étanchéité, hormis le fait que la pente est souvent réduite, ce qui ne facilite pas l'évacuation de l'eau. Les toitures végétalisées ne sont donc pas plus problématiques que les toitures terrasses. De plus, la végétalisation protège les membranes d'étanchéité des rayons ultraviolets, ce qui rallonge leur durée de vie. Pour évaluer la réelle occurrence des défauts qui viennent d'être cités, il faudrait évaluer des retours d'expérience, sur des toitures terrasses et des toitures végétalisées sur structure bois.

2. Bénéfices sur le climat extérieur

a. Problématique des îlots de chaleur

L'îlot de chaleur est un microclimat urbain où les températures sont plus élevées que dans la campagne environnante. Son existence a été mise en évidence pour la première fois au début du XIXème siècle [47]. Cette augmentation de température agit directement sur le climat local, fait diminuer l'humidité relative et modifie le régime de précipitations. En été, lors des épisodes de canicule, ces îlots de chaleur deviennent dangereux pour la santé des habitants. De plus, le changement climatique prévoyant une augmentation des températures risque de rendre les îlots de chaleur urbains encore plus intenses.

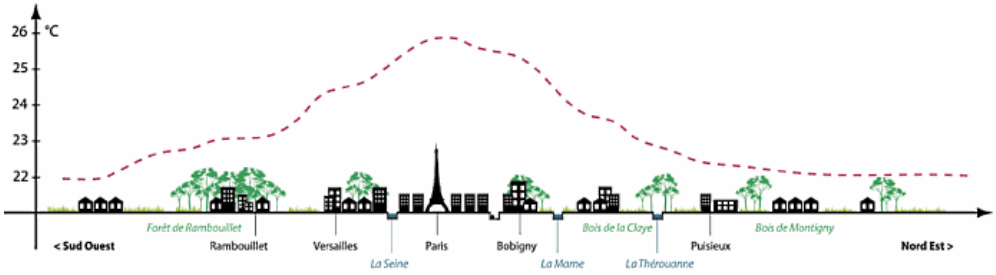


Figure 55 : Coupe schématique de visualisation des températures en 2008 pour une nuit de canicule (type été 2003) [47]

Ci-dessus une coupe schématique donnant un ordre de grandeur des différences de températures qui peuvent dessiner un îlot de chaleur. La différence peut atteindre les 10°C.

Les facteurs jouant sur l'intensité des îlots de chaleur sont l'occupation du sol et l'indice de réfléchissement des surfaces, le vent et la circulation de l'air, les émissions de chaleur dues aux activités humaines (exemple climatisation), l'exploitation de l'énergie solaire, et le moment de la journée. La plupart du temps, les îlots de chaleur atteignent leur maximum lors des nuits d'été, car les surfaces restituent l'énergie solaire qu'elles ont absorbé la journée. Les îlots de chaleur ont des conséquences néfastes avérées sur la santé des habitants [59]. Cela peut se révéler par des symptômes directs d'inconfort, de faiblesse, de crampes etc… ou accentuer les effets d'autres maladies chroniques comme de l'insuffisance respiratoire, des maladies cardio-vasculaires etc… En plus de ces effets sur la santé, les températures élevées augmentent par plusieurs biais, les phénomènes de pollution de l'air et de l'eau.

Nous allons voir que la végétalisation des toitures et l'utilisation de la structure bois permettent de lutter contre les îlots de chaleur et la pollution du milieu, et contribuerait à rendre les villes plus vivables pour leurs habitants.

b. La végétalisation absorbe les radiations et rafraîchit l'air ambiant

En ville, les espaces verts rafraîchissent l'air ambiant grâce à l'ombrage, l'évapotranspiration et la réflexion des rayons solaires [59]. Dans le cas des toitures végétalisées, l'ombrage va surtout avoir un impact sur la température de surface du toit, le confort intérieur, et la protection des membranes d'étanchéité. En revanche, le phénomène d'évapotranspiration va avoir un réel impact sur la température de l'air extérieur ambiant. En 2000, une étude Berlinoise a comparé sur les mois de juillet et aout, les différentes manières dont un toit en bitume noir et un toit végétalisé extensif redistribuaient l'énergie qu'ils recevaient. Les chiffres qu'ils ont obtenus sont donnés dans le schéma ci-dessous.

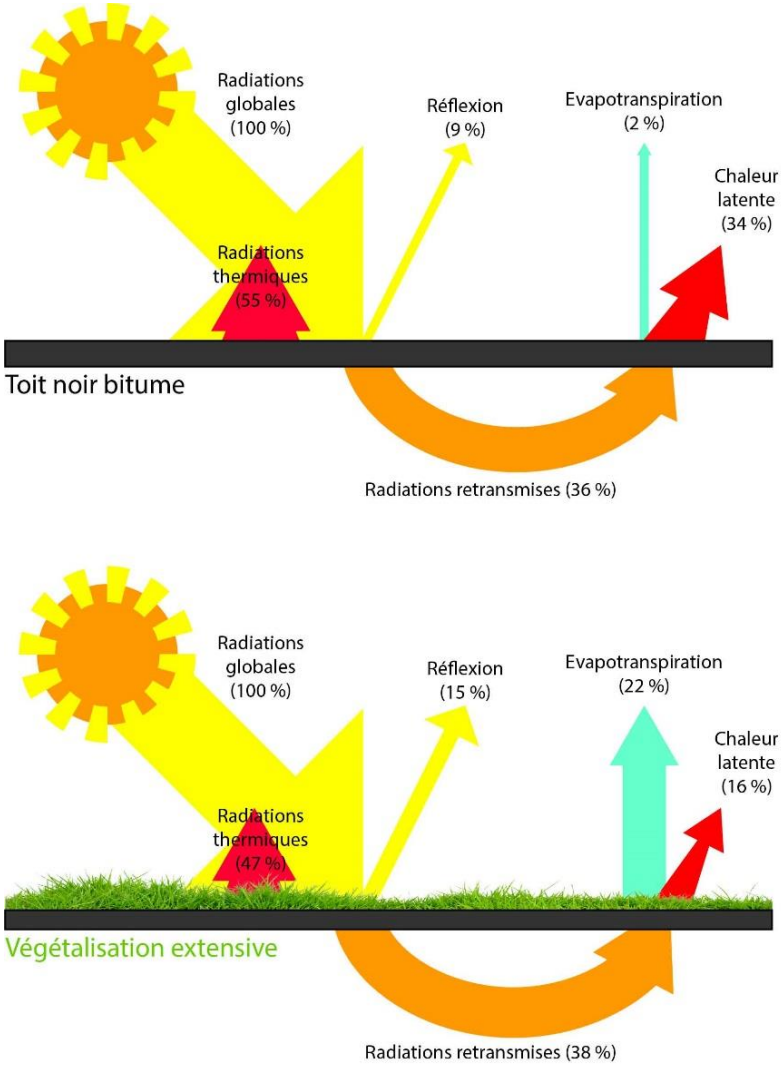


Figure 56 : Schémas de répartition d'énergie entre un toit végétalisé et un toit en bitume noir. Chiffres issus d'une étude Berlinoise de 2000 [44], pourcentages d'énergie journalière moyenne en Wh.

On peut observer les différences présentes entre les manières dont les différentes toitures reçoivent l'énergie solaire. Le premier constat que l'on peut faire se situe au niveau de la capacité de réflexion des deux procédés. En effet, le toit végétal réfléchit plus d'énergie que le toit noir, il emmagasine donc moins d'énergie et restitue moins de chaleur dans l'immédiat. La principale différence se situe ensuite au niveau du dégagement de chaleur latente des deux procédés. Alors que le toit noir dégage beaucoup de chaleur (34% de l'énergie

reçue est restituée en chaleur latente), le toit végétalisé restitue une grande partie de cette énergie en évapotranspiration. Ainsi, sur le total de l'énergie reçue, le toit en bitume noir en restitue 89% sous forme de chaleur, alors que le toit végétalisé extensif restitue 63% de chaleur et 22% d'évapotranspiration qui va jouer un rôle rafraîchissant.

En 2015, une étude a effectué des simulations numériques sur les performances énergétiques des trois différents types de végétalisation, sur un bâtiment situé au Portugal [40]. Les résultats concernant les facultés d'évapotranspiration de ces toitures sont donnés dans le schéma ci-dessous.

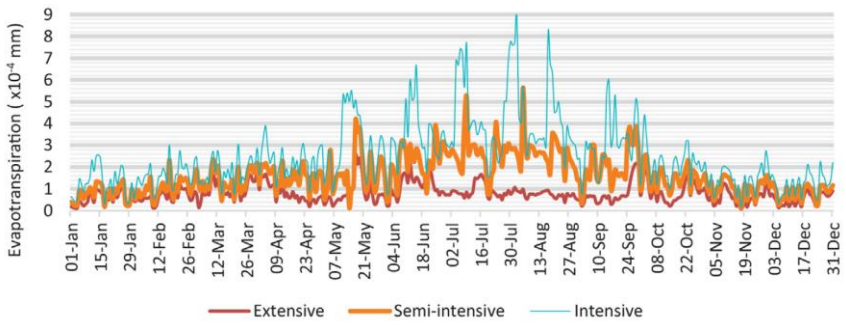


Figure 57 : Evapotranspiration annuelle pour des toits végétalisés intensifs, semi-intensifs et extensifs [40]

On remarque que les capacités des toitures extensives sont moindres que celles des toitures intensives ou semi-intensives sur les périodes d'été. Les toitures intensives et semi-intensives ont des résultats similaires, et présentent des pics lors des épisodes de fortes chaleurs. Les toitures extensives relâchent peu d'eau en raison du substrat fin qui en stocke peu, et en raison des végétaux adaptés à la sècheresse qui gardent l'eau pour leur survie. Si l'on veut végétaliser une toiture dans le but de rafraîchir l'air ambiant, il est donc préférable de se tourner vers les végétalisations les plus luxuriantes.

Outre l'évapotranspiration, et comme vu à la Figure 56, la végétalisation peut rafraîchir l'air ambiant car elle absorbe moins de chaleur qu'un toit noir, les végétaux créant de l'ombre sur la surface de la toiture. Une étude menée à Berlin en 2002 [44] a ainsi montré que lors d'une journée de juin à 13h, la température de surface d'un toit noir atteint 55°C alors que celle d'un toit végétalisé dépasse tout juste les 30°C.

c. Autres avantages liés à la capture de l'humidité par la végétalisation

Comme mentionné en introduction, la végétalisation a d'autres effets que la lutte contre les îlots de chaleur sur la qualité de vie extérieure.

Un document produit par l'Ademe en octobre 2018 s'est attelé à lister les multiples effets de la végétalisation et à vérifier les différentes idées préconçues que l'on peut avoir [59]. Il souligne le rôle de la végétalisation sur la pollution de l'air et de l'eau. La végétation en ville permettrait de piéger différents polluants gazeux, particules et métaux présents dans l'air grâce à la capture (absorption) par les stomates des feuilles, et le stockage (dépôt) sur les feuilles. Les particules et les métaux déposés sur les feuilles sont ensuite lessivés par la pluie et sont piégés dans le substrat. Les capacités de filtrage de la végétation sont cependant à relativiser. En effet, une étude menée à Hong-Kong sur 70 parcs a montré que la qualité y était meilleure qu'en bord de route mais peu différente du reste de l'espace urbain [60]. Un autre problème peut être soulevé concernant l'agriculture urbaine. En effet, les sols urbains nécessitent souvent d'être dépollués pour pouvoir y installer des plantations consommables. Si le substrat et les plantes jouent un rôle de filtre à pollution, on peut se poser des questions sur la dangerosité de consommation des produits issus de l'agriculture urbaine. Cette problématique

a aussi été relevée par le document de l'Ademe qui a consacré une partie sur les risques de pollution de l'alimentation.

La végétalisation a aussi un fort impact positif sur la biodiversité en ville. Elle permet effectivement de créer une nouvelle variété d'habitat pour la faune et la flore [(59)]. Plus la variété d'habitat est large, plus les espaces urbanisés seront favorables à la biodiversité. La végétalisation des toitures est donc valorisée si elle est complétée avec des arbres, des parcs urbains, des cours d'eaux etc… Les toitures et les façades végétalisées agissent comme des corridors écologiques discontinus et permettent, lorsqu'elles sont assez proches, de servir de refuge à la faune capable de voler et à la flore à bonne capacité de dispersion. S'il paraît évident que la végétalisation intensive confère les meilleures capacités en termes d'accueil de biodiversité, certaines études au niveau global démontrent qu'au contraire, c'est la végétalisation semi-intensive qui favorise le plus la biodiversité [(61)].

Enfin la capacité de rétention d'eau du substrat de végétalisation a un impact positif sur la gestion des eaux de ruissellement et la limite des inondations. L'efficacité de réduction des toitures végétalisées varie en fonction de la saison (performances réduites en hiver) et du type d'évènement pluvieux (surtout efficace pour les pluies de faible intensité et espacées dans le temps) [(59)]. Plus le substrat sera épais et apte à retenir l'eau, plus la végétalisation de la toiture servira à la gestion des eaux. Ici aussi, on préfèrera donc les végétalisations intensives et semi-intensives aux tapis de végétalisation extensive. D'après une étude citée par l'Ademe [(59)(64)], les toitures végétalisées permettraient de réduire les volumes d'eaux ruisselés à partir de 40 % sur une année, et entre 60 et 80 % pour les pics de débit. Cette capacité de rétention d'eau de la végétalisation est un enjeu fort pour les collectivités. C'est cet avantage qui s'est retrouvé à l'origine de plusieurs subventions ou obligations locales, mises en place par de villes ou des collectivités territoriales désireuses d'agir sur leurs problématiques d'imperméabilisation des sols.

3. Conséquences sur le confort intérieur

a. Performances isolantes de la végétalisation

o *Etude au Portugal*

Nous allons présenter ici les résultats d'une étude réalisée au Portugal, concernant l'énergie consommée par un bâtiment, en fonction du type de toiture choisi [(40)]. La capacité thermique d'un toit végétalisé a été mesurée par deux approches : une approche numérique et une approche expérimentale qui ont été comparées. Les expérimentations ont été effectuées sur plusieurs configuration de salles présentées en Annexe 7. Ces salles ont toutes un toit végétalisé, elles ont été utilisées pour caler le modèle numérique. Leurs principales différences résident dans leurs volumes et leurs ouvertures. Tous les murs sont considérés comme adiabatiques. La première salle, la salle technique de son de la fondation Gulbenkian, ne comporte pas d'ouvertures. La régulation de température a été faite selon une régulation portugaise émise en 2013 par le ministère de l'économie, de l'innovation et du développement. L'énergie mesurée représente l'énergie dépensée par un climatiseur multi-split de classe B avec un COP de 3,40 et un EER de 3,00. Les acronymes COP (coefficient de performance) et EER (ratio d'efficacité énergétique) décrivent l'efficacité calorifique et frigorifique des unités de climatisation. Ici on a donc une unité de climatisation qui génère 3,4 kW de chaleur avec 1 kW d'électricité absorbée, ou 3 kW de rafraîchissement avec 1 kW d'électricité absorbée. La différence de performances de la climatisation en hiver et en été a été prise en compte dans le calcul final des besoins d'énergie, afin de pouvoir sommer et comparer. Le toit de la salle technique de son n'était pas isolé [(50)].

L'étude s'est penchée sur l'énergie consommée par un bâtiment pour son refroidissement en été et son chauffage en hiver. Le climat est méditerranéen, donc plutôt chaud et sec, et les toitures testées sont la toiture extensive, semi-intensive, intensive, ainsi que des toitures noire et blanche sans végétalisation. Le premier résultat concernant les besoins d'énergie de la salle technique de son Gulbenkian en fonction du type de végétalisation est donné ci-dessous. Dans ces essais, la salle n'a pas d'isolation de toiture autre que la végétalisation :

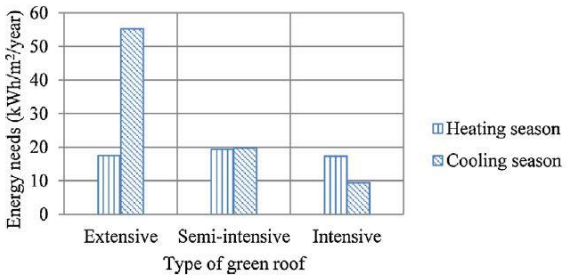


Figure 58 : Besoins d'énergie durant les périodes de chauffage et de refroidissement pour les trois différents types de végétalisation sur la salle technique de son Gulbenkian [40]

D'après ce graphique, la végétalisation n'a pas la même influence en hiver et en été.

En hiver (heating season), la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer le bâtiment est approximativement identique quel que soit le type de végétalisation. Cette constance est la somme de différentes raisons. En effet, les toitures intensives au substrat épais fournissent une isolation plus importante, mais cela est contrebalancé par l'ombre de la végétation et le haut niveau d'évapotranspiration. Les toitures extensives elles, fournissent une isolation légère mais sont plus aptes à absorber les radiations solaires. Si l'on cherche à optimiser les performances hivernales d'une toiture végétalisée, il serait donc intéressant de réfléchir à des modèles aux substrats épais mais avec des végétaux ras, ou d'optimiser le type de végétaux en prenant des plantes à feuilles caduques (c'est-à-dire qui tombent en hiver).

En été (cooling season), la quantité d'énergie nécessaire pour refroidir le bâtiment est directement fonction du type de végétalisation choisi. En effet plus la végétalisation est « intensive », plus les végétaux pourront fournir de l'ombre, de l'humidité, et une isolation directe avec l'épaisseur du substrat.

Le graphique ci-dessous combine les résultats précédents pour avoir un regard au niveau annuel.

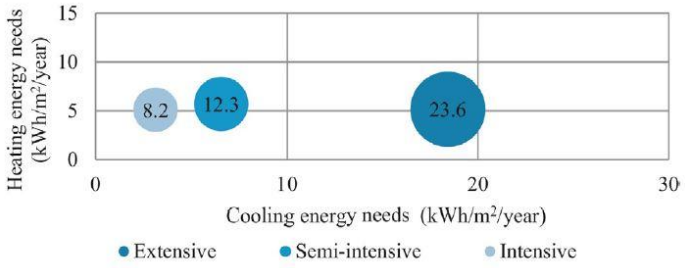


Figure 59 : Besoins d'énergie en périodes de chauffage et de refroidissement (axes) et utilisation d'énergie annuelle (taille des bulles) (kWh/m2/an) pour les trois types de toits végétalisés sur la salle technique de son. [38]

Pour le climat méditerranéen qui a servi de base à cette étude, les toitures intensives et semi-intensives sont donc les plus avantageuses en termes d'économie d'énergie annuelle. Par rapport à une toiture végétalisée extensive, cela permettrait d'utiliser jusqu'à 15,4 kWh/m^2/an d'énergie en moins.

L'étude a ensuite comparé ces végétalisations avec des toitures non végétalisées, en fonction de l'épaisseur d'isolant mise en place. L'isolant est du polystyrène extrudé d'une conductivité thermique de λ=0,010W/m°C.

Les toitures simples sont un toit blanc et un toit noir, pour pouvoir encadrer tous les types de toitures, de la plus absorbante à la plus réfléchissante

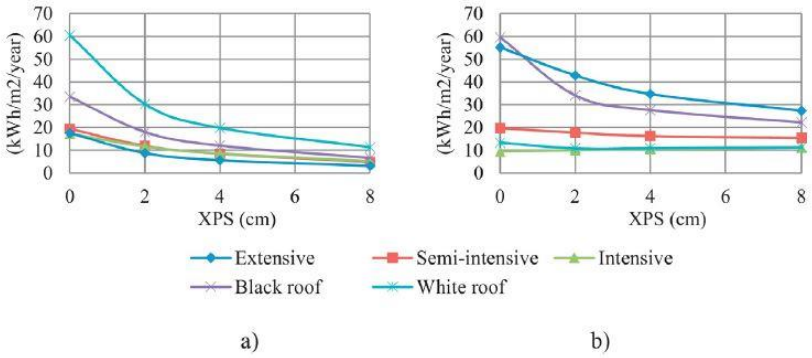


Figure 60 : Besoins d'énergie pour période de chauffage (a) et période de refroidissement (b), avec XPS l'épaisseur du polystyrène. [40]

D'après les résultats ci-dessus, le comportement énergétique des toitures est encore une fois dépendant de si l'on se situe en période de chauffage (hiver) ou de refroidissement (été).

En hiver (a sur le graphique), les trois types de toitures végétalisées fournissent une isolation supplémentaire et permettent d'économiser de l'énergie par rapport aux toits blanc et noir. Cette différence est plus importante lorsque les épaisseurs de polystyrène sont faibles. On remarque ainsi à titre d'exemple qu'un toit blanc avec 8cm de polystyrène extrudé a des performances à peu près équivalentes à celles d'un toit végétalisé avec 2cm de polystyrène extrudé. On ne peut cependant pas en déduire qu'un toit végétal équivaut à 6cm de polystyrène, en raison de la non linéarité des courbes. En outre, on retrouve bien le résultat observé précédemment concernant l'équivalence des performances des différents types de toitures végétalisées.

En été (b sur le graphique), l'efficacité de la végétalisation par rapport à un toit nu est fortement remise en cause. En effet, la végétalisation intensive demande autant d'apport en énergie qu'une toiture blanche, et la végétalisation extensive est même moins efficace qu'une toiture noire.

Lorsque l'on compare directement l'énergie économisée avec la végétalisation par rapport à des toits classiques pour la même épaisseur d'isolant, on obtient le graphique ci-dessous pour les trois salles décrites en Annexe 7 :

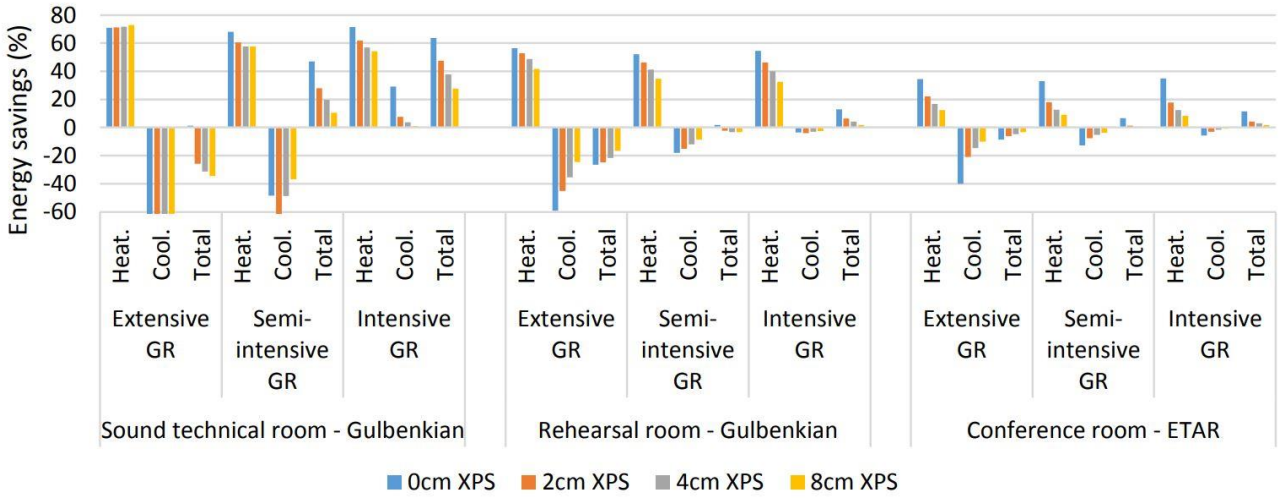


Figure 61 : Economies d'énergie d'un toit végétalisé en comparaison avec un toit blanc [50]

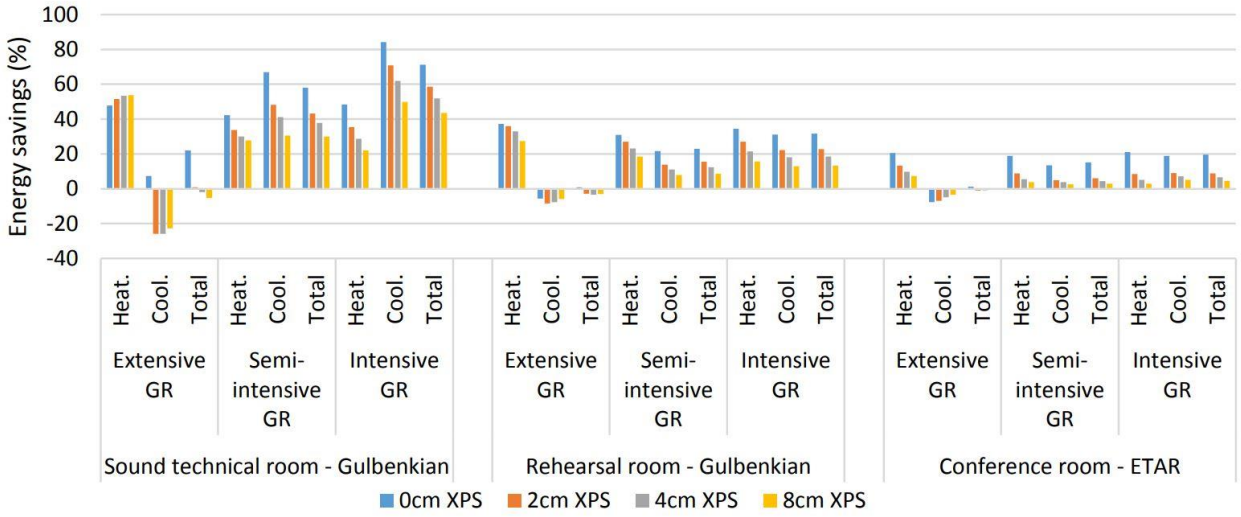


Figure 62 : Economies d'énergie d'un toit végétalisé en comparaison avec un toit noir [50]

On remarque que dans tous les cas, la végétalisation réduit l'énergie nécessaire au chauffage, et donc fournit une isolation hivernale. En revanche, les économies d'énergie durant l'été sont moins évidentes. En comparaison avec un toit noir, les végétalisations intensive et semi-intensive uniquement présentent des résultats d'économie d'énergie. En comparaison avec un toit blanc, aucune des solutions de végétalisation n'est meilleure qu'un toit blanc réfléchissant.

Si l'on regarde, l'apport annuel d'une toiture végétalisée, les toitures végétalisées intensives et semi-intensives uniquement apportent un gain d'énergie par rapport à des toitures noires. En comparaison avec une toiture blanche, ce gain d'énergie est très faible, et devient parfois une perte (GR semi intensive, Rehearsal Room). On remarque aussi que plus l'épaisseur d'isolant est faible, plus le gain d'énergie est élevé, ce qui confirme les résultats de la Figure 60. Les résultats concernant la salle technique de son sont plus élevés car, contrairement aux autres, elle ne possède pas d'ouvertures, toutes les parois sont considérées comme adiabatiques (voir Annexe 7) ; les résultats pour les salles de répétitions et de conférence semblent dont plus proches de la réalité.

En conclusion de cette étude, on peut dire que les toitures végétalisées permettent d'économiser de l'énergie dans la limite où elles ont été étudiées pour le climat du site. En hiver, toutes les végétalisations permettent d'économiser de l'énergie, à quantité égale suivant le même type de végétalisation. En été en revanche, un toit nu réfléchissant est globalement énergétiquement plus efficace qu'un toit végétalisé. Sur l'année, et avec le climat méditerranéen, on obtient ainsi un meilleur gain d'énergie lorsque la toiture est intensive.

- *Etude à La Rochelle*

Une étude similaire a été menée sur une étude de cas à la Rochelle [63]. Le climat est océanique et la maison étudiée comporte environ 18% de fenêtres sur la surface de ses murs. L'étude compare un toit dit conventionnel avec un toit de végétalisation extensive. Le matériau d'isolation et la couleur du toit conventionnel ne sont pas précisés dans l'article disponible.

La première chose mise en évidence dans cette étude concerne la variation d'efficacité de la végétalisation suivant l'épaisseur de l'isolation de la toiture. Les résultats sont représentés dans les graphiques ci-dessous.

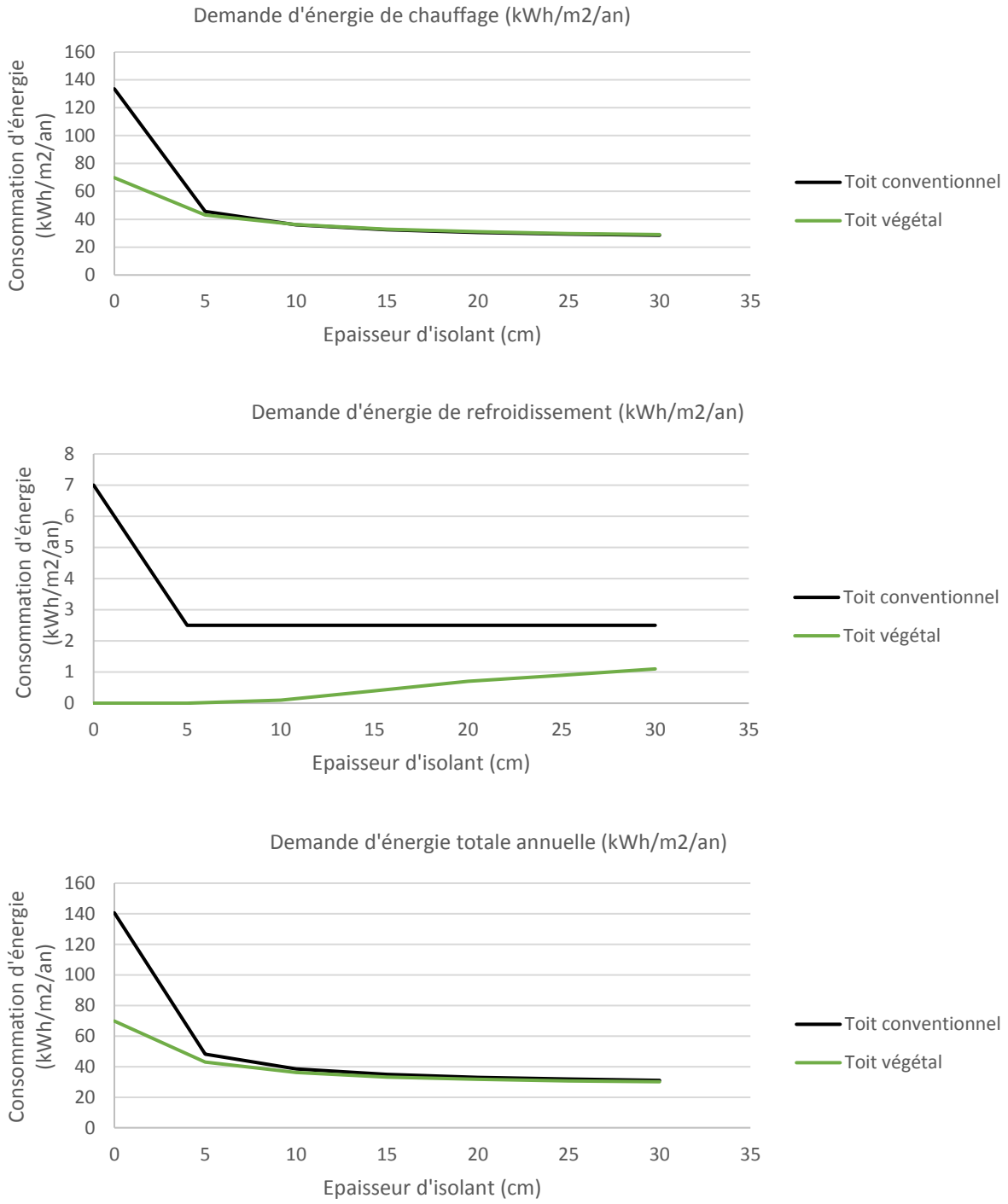


Figure 63 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et la climatisation (kWh/m²/an) en fonction de l'épaisseur d'isolant (cm) ; climat océanique [63]

Dans cette étude, l'apport d'isolation de la végétalisation devient négligeable au-delà de 5cm d'isolant. Dans les cas de nécessité de refroidissement en été, le toit végétal offre une très bonne alternative à la climatisation puisqu'il réduit les dépenses d'énergie de moitié, même pour les grandes épaisseurs d'isolant. Cependant, étant en climat océanique, nécessité de refroidir la maison est bien moindre que la nécessité de la réchauffer, ainsi la consommation d'énergie due au refroidissement l'été est très faible et les performances refroidissantes de la végétalisation sont peu visibles sur le bilan global de consommation énergétique de la maison.

Un deuxième volet de cette étude présente les résultats obtenus pour 10 cm d'isolant sous différents types de climats : à Athènes, La Rochelle et Stockholm. Les résultats sont donnés dans les graphiques ci-dessous.

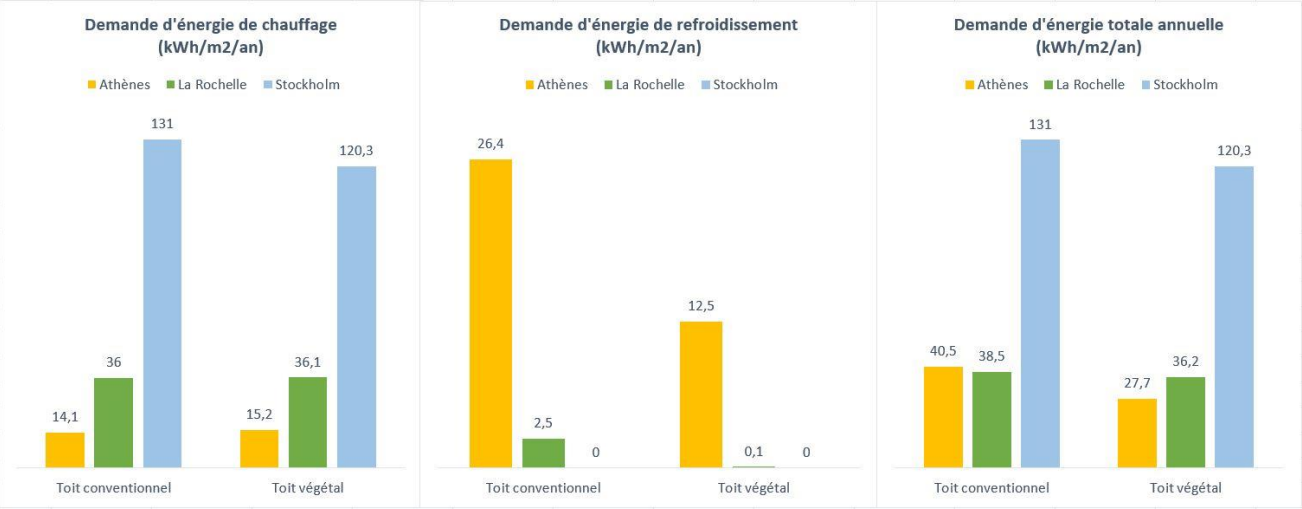


Figure 64 : Consommation d'énergie annuelle pour le chauffage et la climatisation, 10cm d'isolant ; différents climats [63]

Cette analyse nous montre l'impact que peut avoir un toit végétalisé extensif pour différents types de climats. En climat méditerranéen, la végétalisation induit un besoin d'énergie en chauffage supplémentaire par rapport à un toit conventionnel. Elle induit cependant un rafraîchissement qui fait baisser de près de 50% les dépenses énergétiques en été. Cela va complètement à l'encontre des résultats de l'étude menée au Portugal que nous avons étudié précédemment. En effet, pour un toit extensif, les dépenses d'énergie en baissaient en hiver et montaient en été avec la végétalisation, quelle que soit la couleur du toit. Les résultats pour le climat océanique de Stockholm ont été analysés précédemment. Ils montrent une constance relative dans les résultats, la végétalisation ne jouant pas un rôle essentiel sur les dépenses énergétiques pour 10 cm d'isolation. Concernant le cas de Stockholm (climat continental), la végétalisation induit une baisse de dépenses énergétiques en chauffage de près de 8 %. La nécessité de rafraîchissement étant absente, la dépense énergétique globale est égale à la dépense en énergie de chauffage. Comme nous avons vu avec l'étude au Portugal que le type de végétalisation ne faisait pas varier les besoins en énergie de chauffage, on peut penser qu'il en sera de même ici.

En conclusion de cette étude, on peut d'abord revenir sur la différence de résultats entre l'étude au Portugal et l'étude à Athènes qui donnent des tendances opposées. Ces résultats indiquent la nécessité d'analyser ce type d'études au cas par cas sans oublier leur contexte. En effet, de nombreux documents résumant et vulgarisant ces études faussent le jugement en choisissant les résultats à montrer pour servir leur cause. A titre d'exemple, un article de la revue Elsivier donne les résultats de l'étude au Portugal pour la première salle uniquement, sans préciser ses conditions particulières de modélisation (murs adiabatiques et fenêtres absentes) [40]. Les résultats donnent donc des pourcentages de gain d'énergie impressionnants qui peuvent fausser le jugement des performances des toitures végétalisées. Concernant l'étude de cas de La Rochelle, le commentaire a été effectué également sur un article d'Elsivier faute d'accès au document complet. Il faut donc prendre du recul par rapport aux résultats exposés, nous n'avons d'ailleurs pas certaines informations comme le type de toit conventionnel, le type d'isolant, ou la manière de modéliser les murs du modèle.

En outre, ces deux études donnent des résultats intéressants sur le comportement énergétique des toits végétalisés. La végétalisation semble avoir un pouvoir régulateur du climat intérieur puisqu'elle permet de rafraîchir les maisons en climat chaud et de réchauffer les maisons en climat froid. Quel que soit son rôle, on

remarque aussi qu'il est d'autant plus efficace que l'épaisseur d'isolant est faible. La végétalisation aura donc un effet limité sur le climat intérieur d'un bâtiment bien isolé.

Les nécessités d'entretien et l'énergie dépensée pour un éventuel arrosage n'ont pas été pris en compte ici. Une étude de cas à Paris [62] a estimé qu'un bâtiment couvert par une végétalisation en toiture permettait d'économiser 8,9 % d'énergie nécessaire au refroidissement, et jusqu'à 13 % si la toiture était arrosée. Ces résultats seraient intéressants à mettre en parallèle avec la consommation d'eau et d'énergie nécessaires à l'arrosage. En effet, s'il paraît évident que l'arrosage d'une toiture (même non végétalisée) va avoir un effet rafraîchissant, un bilan complet sur les gains et les pertes de l'arrosage serait pertinent à étudier.

- *Résistance thermique de la végétalisation*

En énergétique, la capacité isolante d'un matériau est donnée par sa résistance thermique R en m^2.K/W, ou sa conductivité λ en W/mK. En notant e l'épaisseur du matériau, on a R=e/λ. Plus R est important, plus le matériau est isolant.

Avec l'étude Portugaise qui nous donne la résistance de l'isolant utilisé et les performances de la végétalisation avec et sans isolant (Figure 60), on peut tenter d'estimer approximativement l'apport d'isolation d'une toiture végétalisée en hiver (graphique a). En effet, la lecture des épaisseurs d'isolant pour obtenir la même consommation d'énergie donne le tableau ci-dessous :

Energie	Isolation d'un toit noir	Isolation d'un toit blanc	Isolation d'un toit végétal
20kWh/m^2/an	2cm	4cm	0cm
10kWh/m^2/an	5cm	8cm	2cm

Tableau 5 : Lecture Figure 60

Ainsi, la première ligne nous dit que la végétalisation revient à installer entre 2cm et 4cm d'épaisseur d'isolant. La deuxième ligne nous dit qu'elle revient à installer entre 3cm et 6cm d'isolant. Ainsi, la végétalisation correspond approximativement à 2cm à 6cm d'isolant.

L'isolant utilisé dans l'étude est du polystyrène extrudé de conductivité λ=0,01W/mK.

La résistance thermique équivalente de la végétalisation se situerait donc entre 2 m^2.K/W et 6 m^2.K/W.

Cette estimation donne des résultats trop larges pour être exploités. En effet, cet intervalle comprend environ toutes les résistances thermiques utilisées dans l'isolation d'un bâtiment. De plus, les incertitudes sont grandes car la lecture du graphique est très approchée, et ces résultats sont uniquement donnés pour la salle technique de son, or on a vu que les résultats dépendaient aussi des ouvertures et de la configuration de la salle.

Pour mesurer la performance isolante stricte d'une toiture végétalisée, il faudrait repartir de la base et mesurer la conductivité de chaque couche (substrat, drain, étanchéité etc…). Or nous avons vu que la capacité d'isolation d'une toiture végétalisée dépendait aussi de l'isolation déjà présente, de l'humidité, et de l'ombrage créé par les végétaux. Cette différence entre une simple isolation et la végétalisation vient du fait qu'il n'y a pas que le simple phénomène de flux thermique qui rentre en jeu. Vouloir obtenir la résistance thermique d'une toiture végétalisée serait donc une fausse piste qui pourrait nous amener à sous-estimer les capacités de la végétalisation.

b. Les effets de la structure bois

o *Confort extérieur face aux îlots de chaleur*

Comme évoqué précédemment lors de l'abord des avantages de la structure bois, *une étude récente menée par le bureau d'études Woodeum a démontré que l*e bois lui, aurait une influence sur le climat urbain grâce à sa faible inertie thermique [(8)]. *L'inertie thermique d'un matériau représente sa capacité à accumuler puis restituer un flux thermique. Un matériau avec une forte inertie thermique est généralement plus lourd et la chaleur y circule moins vite [(48)]. Un autre paramètre entrant en jeu est l'albédo. Il représente la capacité de réflexion des radiations solaires d'un matériau. D'après un document produit par le grand Lyon [(49)], L'albédo du bois est d'environ 0,35 (soit 35% d'énergie réfléchie) alors que l'albédo du béton est de 0,25 (soit 25% d'énergie réfléchie). Le béton a une forte inertie thermique et un albédo faible, c'est-à-dire qu'il absorbe beaucoup de radiations et a du mal à se refroidir. Au contraire, le bois plus léger a une inertie thermique plus faible. Combinée à son albedo légèrement plus élevé, le bois absorbe moins de chaleur et est capable de changer rapidement de température. Les bâtiments en bois paraissent donc bénéfiques pour lutter contre les îlots de chaleur puisqu'ils permettent à la ville de se refroidir plus rapidement en soirée.*

Ainsi, la combinaison de la végétalisation des toitures et des façades à faible inertie en bois serait une réponse intéressante face aux îlots de chaleur. La végétalisation apportant de l'ombre et de la fraîcheur grâce à l'évapotranspiration, et le bois substitué au béton permettant d'éviter l'absorption des radiations solaires et leur réémission en fin de journée. Ces caractéristiques deviennent surtout intéressantes si on les considère à l'échelle d'un quartier ou d'une ville.

o *Confort d'été intérieur*

Si le bois est une bonne solution pour faire baisser la température des villes la nuit, ses effets sur le confort d'été intérieur sont encore à débattre. En effet, la faible inertie du bois peut nous laisser douter sur son efficacité face aux fortes chaleurs, surtout en comparaison avec une bâtisse dense aux murs épais de pierre ou de béton. L'étude citée précédemment menée par Woodeum[(8)] a effectué la simulation des températures intérieures de deux bâtiments durant la canicule de 2003. Les deux bâtiments ont le même coefficient de besoin bioclimatique (Bbio, qui représente l'efficacité énergétique du bâti). Le premier est en bois (CLT) et le deuxième en béton. Les résultats obtenus sont donnés dans le graphique ci-dessous.

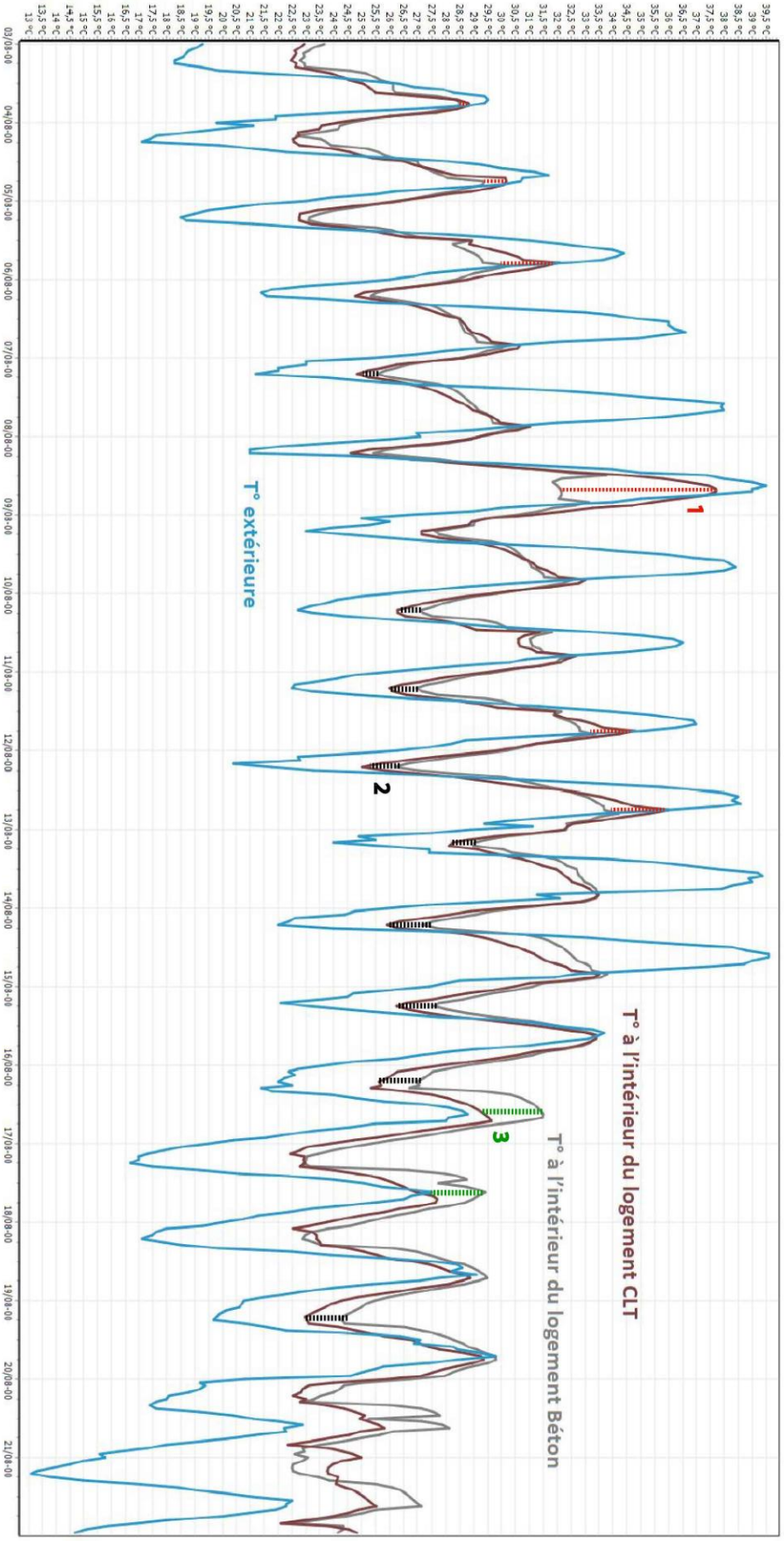


Figure 65 : Comportement des bâtiments bois CLT et béton pendant une période de fortes chaleurs correspondant aux conditions de la canicule de 2003 (température dans une chambre à coucher : chambre n°2 T3 101) (source étude Woodeum Pouget [8])

Les intervalles relevés par des pointillés rouges, au niveau du point 1 sur le graphique, montrent le défaut de manque d'inertie du bois. Lors des épisodes courts de fortes chaleurs, le béton garde l'intérieur de l'habitation au frais en ralentissant la circulation de la chaleur. L'intérieur de l'habitation en bois, lui, monte très vite en température, et on obtient presque 6 °C de différence sur le pic le plus haut observé.

Le point 2 et les intervalles noirs nous montrent la bonne capacité du logement en bois à se rafraîchir la nuit. La nuit, la température du logement en bois descend en moyenne 1 °C plus bas que la température du logement en béton. Malheureusement, elle n'atteint quand même pas la valeur de la température extérieure, qui reste en moyenne 3°C plus faible la nuit.

Enfin, le point 3 et les intervalles verts nous montrent la réaction des deux bâtiments face à la baisse des températures. Contrairement au bois, le béton chargé a du mal à se refroidir. Alors que le bois suit la diminution de température extérieure, il faudra deux jours supplémentaires au béton pour redescendre à la température extérieure. Durant cette période de rafraîchissement, l'intérieur du logement en béton en journée est 2°C plus chaud que l'intérieur du logement bois et que la température extérieure.

Cette étude nous montre bien les avantages et les désavantages que l'on peut trouver à la faible inertie du bois en été. Il se rafraîchit plus rapidement la nuit et lors de la fin des épisodes de fortes chaleurs mais reste tout de même très handicapant lorsqu'il s'agit de garder la fraîcheur. Ces considérations sont à mettre en parallèle avec les prévisions météorologiques, pour savoir selon les cas, s'il est plus judicieux de permettre au bâtiment de se rafraîchir rapidement ou de garder la fraîcheur longtemps. A plus grande échelle, le rôle positif du bois sur le climat extérieur et les îlots de chaleur peut aussi avoir un impact positif sur le confort intérieur des bâtiments. Les différentes stratégies adoptables sont comparables au dilemme de la climatisation. Ce processus améliore fortement le confort intérieur tout en dégradant peu le confort extérieur. Utilisé à grande échelle cependant, son impact négatif sur l'extérieur (par la consommation d'énergie et le dégagement de chaleur) devient perceptible, induit la nécessité d'installer plus de climatisation, et nous fait rentrer dans un cercle vicieux.

L'utilisation de la végétalisation sur structure bois pourrait nous permettre d'éviter ce choix entre le confort extérieur et intérieur. En effet, nous avons vu que c'était un bon système de lutte contre les îlots de chaleur puisque la végétalisation a un effet rafraîchissant sur l'air en ambiant, et que le bois d'une part réfléchit les radiations et d'autre part ne stocke pas la chaleur. Pour le confort intérieur, la végétalisation lourde palie la faible inertie du bois et permet au bâtiment de garder la fraîcheur. Aucune simulation énergétique combinant les effets de la structure bois et de la végétalisation n'a été trouvée. Il serait intéressant d'étudier cette possibilité avec plus de précision pour analyser l'impact sur le climat intérieur et extérieur d'un bâtiment en bois végétalisé.

4. Leviers pour inciter à la végétalisation

Nous avons vu que la végétalisation engendrait des surcoûts à ne pas négliger. D'après le Tableau 2, le prix de la végétalisation s'élève entre 25€/m^2 et 150€/m^2 [20] (ou entre 30€/m^2 et 75€/m^2 selon Adivet [58]) pour une végétalisation extensive. Cela revient approximativement au prix d'une toiture étanchée ou auto-gravillonnée, mais c'est plus cher qu'une toiture en tuiles (qui coûte entre 25€/m^2 et 50€/m^2). Cependant ce prix dépasse les 200€/m^2 pour les végétalisations intensives et les toitures jardins. De plus la nécessité d'entretien et d'arrosage éventuel n'est pas prise en compte dans le coût de l'installation et des matériaux. Nous avons aussi vu lors de l'analyse des exemples, que la plupart des projets déjà existants ont été commandés par des maîtres d'ouvrages publics, le surcoût de la végétalisation et de la structure bois étant un frein non négligeable pour les entreprises privées et les particuliers. Nous allons voir dans cette partie quels sont les leviers qui pourraient aider les entreprises et les particuliers à choisir la végétalisation et la structure bois, malgré le surcoût.

o *Aides sur l'isolation*

Les aides de l'état pour les rénovations thermiques sont conditionnées en fonction en fonction du besoin (revenu du ménage etc…) et des niveaux de performances des matériaux à respecter [42]. La résistance thermique d'un matériau est donnée par R en m^2.K/W.

Pour les logements situés en métropole, l'isolation d'une toiture doit avoir une performance supérieure ou égale à R=4,5m^2.K/W. L'ordre de grandeur de la résistance thermique d'une toiture végétalisée que nous avons essayé d'estimer ne permet pas de situer les performances isolantes de la végétalisation par rapport à aux limites données dans le document du Cerema. De plus nous avons vu que les paramètres à prendre en

compte étaient très nombreux et qu'il semblait compliqué de trouver une résistance thermique à la végétalisation.

Ainsi, il semblerait que vouloir apparenter la végétalisation à un simple isolant thermique est peu judicieux. Il serait préférable de considérer la végétalisation directement comme un outil d'économie d'énergie. Envisager un nouveau volet spécifique aux toitures végétalisées permettrait de prendre en compte leur contribution globale à l'échelle du quartier (îlots de chaleur, biodiversité, gestion des eaux pluviales, confort d'été etc…).

- *Performances énergétiques et environnementales*

Si la végétalisation et la structure bois sont difficilement assimilables à des processus d'isolation, elles peuvent valoriser un bâtiment en lui permettant d'obtenir des certifications et des labels. Certaines certifications permettent d'accéder à des aides particulières, procurées par l'état ou les régions. Elles sont aussi les avant-gardistes des nouvelles normes, comme par exemple la RT 2012 qui doit être aujourd'hui obligatoirement respectée pour obtenir un permis de construire. Certains labels permettent uniquement de valoriser l'image d'un bâtiment et ainsi d'appuyer l'engagement d'une entreprise vis-à-vis de son impact environnemental.

Aujourd'hui, concernant les règlementations thermiques, nous avons la RT2012 en place, la RE2020 en cours d'élaboration, et le label E+C- qui a servi de préfiguration à la RE2020. Ces règlementations sont basées entre autres sur un seuil de consommation d'énergie ainsi qu'un seuil impact carbone pour E+C- et RE2020. Nous avons vu que la structure bois permettait de faire nettement diminuer l'impact carbone d'un bâtiment à sa construction, par l'utilisation du bois comme puit de carbone. La végétalisation pourrait aussi permettre de faire diminuer l'impact carbone d'une construction durant son utilisation, grâce à la consommation de CO_2 par les plantes. A ce propos, aucune fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES ; document normalisé présentant l'analyse de cycle de vie des produits) n'existe pour les toitures végétalisées. Il serait intéressant de travailler sur un document de ce type pour évaluer l'impact sur les émissions de CO_2 des bâtiments utilisant la végétalisation.

Concernant la consommation énergétique, nous avons vu que la végétalisation permet, en général, de diminuer la consommation énergétique annuelle d'un bâtiment. Bien que certains cas contredisent cette conclusion, la végétalisation semble jouer un rôle de régulateur thermique, notamment à l'échelle du quartier. Elle permettrait aussi de palier aux défauts du bois, hypothèse intéressante mais qui n'a pas encore été vérifiée dans la pratique.

Enfin, la végétalisation et la structure bois combinées pourraient permettre d'obtenir plusieurs labels environnementaux, tels que les labels biosourcé, BBC (bâtiment bas carbone), la certification HQE, Effinature ou le label biodiversity. Comme mentionné précédemment, ces labels auront un impact médiatique et commercial pour les entreprises de maîtrise d'ouvrage, et de maîtrise d'œuvre. Les espaces végétalisés et les labels environnementaux donneront aussi de la valeur ajoutée au bâtiment durant son exploitation, ce qui sera notamment intéressant pour la vente ou la location (ex : logements, bureaux etc…).

Conclusions et perspectives

A l'issue de cette étude, nous avons pu conclure sur les difficultés techniques qui freinent la végétalisation sur structure bois, et mettre à jour un certain nombre de perspectives à creuser pour la développer.

Le principal frein à la végétalisation des toitures sur structure bois est la surcharge importante qui tend à faire fléchir les structures. Les consolidations nécessaires sont importantes, et elles ajoutent un prix non négligeable à la structure, en plus de celui du complexe de végétalisation. Ces problématiques techniques impliquent aussi l'absence de techniques courantes concernant les végétalisations lourdes (intensives, toitures jardins et toitures végétalisées accessibles) sur structure bois, ce qui entraîne une difficulté supplémentaire de mise en œuvre.

Concernant l'aspect technique et structurel, certaines solutions constructives spécifiques au bois permettent de conforter la structure face à des surcharges importantes. L'ajout de voûtes ou de jambes de forces en haut des poteaux par exemple, permet d'alléger la flexion des poutres en faisant travailler le bois en compression. Ainsi, pour une structure poteaux poutres de 6mx6m avec un poteau à chaque coin du carré, l'ajout de jambes de force permet d'économiser autour de 20% du bois utile à la construction. Une autre solution plus traditionnelle consiste à délaisser les poteaux pour des murs en rondins, pour faire travailler les bois en compression transversale. La surcharge devient alors un atout au lieu d'être une faiblesse. Enfin, on peut aussi mixer le bois avec d'autres matériaux plus efficaces en compression, comme la brique et le béton ou, pour rester dans le thème des techniques biosourcées, la terre, la paille, la pierre etc…

Un travail d'adaptation des paramètres de dimensionnement en fonction du climat de la région pourrait aussi être effectué pour optimiser les charges à prendre en compte au dimensionnement. Dans cette étude, nous n'avons fait qu'évoquer la possibilité de mettre en place ce travail, et ébaucher les différents paramètres qu'il faudrait prendre en compte. A ce jour, nous ne savons pas encore si une telle étude (qui semble plutôt complexe), conclurait sur la surévaluation actuelle des charges à prendre en compte, ou si elle préconiserait les mêmes mesures qu'aujourd'hui.

Concernant les problématiques de risque d'infiltration d'eau par les toitures terrasses en bois, il serait intéressant d'effectuer un bilan de retours d'expérience, pour évaluer le risque réel de défaut de mise en œuvre. Nous avons conclu que ces défauts pouvaient être évités en faisant appel à des étancheurs professionnels et en portant une attention particulière à la gestion du chantier. Une solution serait donc d'effectuer de la communication auprès des chefs de chantier et des couvreurs à propos de ces risques et des précautions à prendre. Si les retours d'expériences montrent que la sinistralité est fréquente, nous pourrions également envisager de nouvelles mesures de sécurité, comme le doublage des membranes déjà préconisé sur les toitures terrasses piétonnes.

Une multiplication des études sur les performances énergétiques de la végétalisation, notamment sur structure bois, serait également à prévoir. En effet, nous avons vu que seulement quelques études expérimentales ont été menées sur le sujet, et aucune combinant la végétalisation et la structure bois. Il serait intéressant de comprendre avec précision comment agissent les toitures végétalisées, et comment elles réagissent quel que soit le climat antérieur et actuel. Il serait alors possible d'intégrer la végétalisation dans des logiciels d'énergétique, pour l'associer à différents types de structures et différents climats, et conclure sur son utilisation optimale. Par exemple, il serait possible d'évaluer l'impact de la végétalisation de toiture combinée à des façades bois, sur les îlots de chaleur. SI cette étude s'est axée sur la végétalisation des toitures, il serait aussi intéressant, de la même manière, de travailler sur la végétalisation des façades, et sur les contraintes et les bénéfices qu'elle peut impliquer.

Pour profiter des avantages environnementaux de la végétalisation sur structure bois, il serait intéressant de favoriser l'investissement des maîtres d'ouvrage dans cette solution, en fournissant des aides financières ou en développant des mesures règlementaires. La multiplication des études sur les impacts thermiques et environnementaux devrait avoir un rôle à jouer dans la mise en place de ces aides. Il sera alors pertinent de communiquer aux pouvoirs politiques les bienfaits de la végétalisation et de la structure bois (économie d'énergie, biodiversité en ville, puits de carbone, lutte contre les îlots de chaleur, gestion des eaux etc…), pour mettre en place de nouvelles aides capables de suppléer celles déjà existantes.

Enfin, nous avons vu dans ce rapport que nous manquions de retours d'expérience concernant les bâtiments utilisant la végétalisation sur structure bois déjà existants. En récupérer serait une première étape pour évaluer l'importance et l'impact des différentes pathologies possibles, ainsi que le ressenti des utilisateurs concernant les performances acoustiques et thermiques de ces bâtiments.

Bibliographie

(1) Cours *Structure bois 3A_GC* Eric PERRIN

(2) Cours Anatomie du bois MOOC

(3) Marie-Christine TROUY Anatomie du bois, Formation, fonctions et identification. Editions Quae, 2015.

(4) Eurocode 5

(5) Carbone4 Quels seraient les bénéfices économiques, sociaux et environnementaux associés à un développement significatif de la filière «bois d'oeuvre et construction bois» ? 2015 (http://www.carbone4.com/sauver-le-climat-avec-nos-forets-la-construction-touche-du-bois-2/)

(6) ADEME *Base carbone* 2014 (https://www.bilans-ges.ademe.fr/static/documents/%5BBase%20Carbone%5D%20Documentation%20g%C3%A9n%C3%A9rale%20v11.0.pdf)

(7) article Batirama *Construction maison passive en bois* (https://www.batirama.com/article/12082-cop21-3-3-quel-bilan-carbone-pour-la-construction-bois.html)

(8) Woodeum étude *La construction bois, un remède à la canicule ?* 2019 (https://www.batiactu.com/edito/construction-bois-remede-a-canicule-56876.php)

(9) Cours *Croissance et qualité des bois* Meriem Fournier, Agro Paris-tech 2014 (https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/MASTERFAGESPECIALITE/document/UE938Croissancequalite2014.pdf?cidReq=MASTERFAGESPECIALITE)

(10) Mathieu Sudres *Caractères des structures en bois dans l'histoire de l'architecture* Mémoire : Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Toulouse 2018.

(11) Cours Jean Claude Bignon *Eléments pour comprendre l'histoire du bois dans l'architecture*. CRAI Nancy, 2012 (https://vimeo.com/39816740)

(12) http://www.ehrw.co.uk/projects/savill-gardens-windsor/

(13) https://www.archiliste.fr/alc-architectes/halle-sportive-lycee-croizat-tarnos

(14) http://www.cyberarchi.com/article/la-brock-commons-tallwood-house-university-of-british-columbia-vancouver-19-10-2017-16354 et https://maisons-bois.com/actualite-construction-bois/plus-grand-immeuble-bois-monde-details-de-chantier-photo-video/7514

(15) Maisons et travaux n°164 Elisabeth DELAIGUE *La Sologne* p.220. 2002.

(16) Office National des Forêts, *Rapport d'activité* 2018 (https://www.onf.fr/+/36b::rapport-dactivite-2018-de-lonf.html)

(17) https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_du_monde_par_superficie_foresti%C3%A8re

(18) Afcobois syndicat français de la construction bois *Enquête nationale de la construction bois.*

(19) France bois forêt, *Comparaison des filières forêt-bois en France et en Allemagne* 2014 (http://observatoire.franceboisforet.com/comparaison-filieres-foret-bois-en-france-en-allemagne/)

(20) La maison écologique n°99 *Toit végétalisé la nature en toiture* Géraldine HOUOT 2017.

(21) Règles professionnelles pour la conception et la réalisation des terrasses et toitures végétalisées. Adivet, L'enveloppe métallique du bâtiment, Professionnels de l'étanchéité, 2018.

(22) Pascale MAES *Toitures végétalisées : compositions et règles professionnelles* Construction et travaux publics, techniques du bâtiment : l'enveloppe du bâtiment 2015.

(23) http://www.mil-lieux.fr/projet/metz-restaurant-universitaire/#

(24) http://www.adivet.net/association-adivet/publications/newsletter-echo-du-b%C3%A2timent-v%C3%A9g%C3%A9talis%C3%A9/archive/view/listid-3/mailid-64-l-echo-du-batiment-vegetalise-n-29.html

(25) http://www.r2d2architecture.be/projects/detail/2602

(26) http://www.adivet.net/association-adivet/publications/newsletter-echo-du-b%C3%A2timent-v%C3%A9g%C3%A9talis%C3%A9/archive/view/listid-3/mailid-33-l-echo-du-batiment-vegetalise-fevrier-2015.html

(27) https://www.cpluso.fr/noisiel

(28) http://www.architecture-bioclimatique-auvergne.com/

(29) http://www.archicontemporaine.org/RMA/p-8-lg0-Frange-nord-cite-Wagner-Mulhouse.htm?fiche_id=4278#

(30) https://www.europanfrance.org/realisation/mulhouse-cite-wagner-angle-rue-de-la-mertzau-8

(31) https://www.build-green.fr/une-maison-bois-et-terre-en-spirale-avec-jardin-sur-le-toit-sur-lile-dawaji-au-japon/

(32) http://www.r-a-architects.com/prj/2017/spiralgarden.html

(33) http://www.lecomte-couverture.fr/charpente-ossature-bois?p=8

(34) https://www.ecohabitation.com/guides/1538/bois-osb-versus-contreplaque-ou-plywood-le-match-technique-et-environnemental/

(35) https://www.klh.at/fr/societe/

(36) Cours de résistance des matériaux ENTPE

(37) Marie-Christine TROUY *Matériau bois - Durabilité* 2016

(38) Projet des JO 2024 à Paris : https://www.paris2024.org/fr/village-olympique-paralympique-images/

(39) Présentation d'un projet d'hôtel végétalisé. http://www.casabee.eu/cet-eco-hotel-vegetal-paris-se-met-enfin-vert/

(40) Cristina M. Silva, M. Gloria Gomes, Marcelo Silva. *Green roofs energy performance in Mediterranean climate*, Elsevier, 2016

(41) *Projet TERRACES* Ademe Avril 2016

(42) Guide pratique *Reglementation Aides financières* Ademe Mars 2020

(43) https://www.rubner.fr/construction-bois/reference/eco-ecole-maternelle-des-boutours-rosny-sous-bois/ ; https://www.construction21.org/france/case-studies/fr/ecole-maternelle-des-boutours.html et https://www.ecovegetal.com/realisations/eco-ecole-rosny-sous-bois/

(44) *Energy saving strategies through the greening of buildings, the example of the institute of physics of the Humboldt-university in Berlin- Adlershof* Marco Schmidt 2003

(45) *Green roofs as a contribution to reduce urban heat islands* Manfred Köhler, Marco Schmidt, Michael Laar, 2003

(46) https://www.saint-dizier.fr/ville-agglo/projets-et-travaux/le-marche-couvert.html et http://www.studiolada.fr/bp/marche-saint-dizier/

(47) https://www.notre-planete.info/terre/climatologie_meteo/ilot-chaleur-urbain.php

(48) https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude_774/Les_ilots_de_chaleur_urbains_REPERTOIRE.pdf

(49) https://www.grandlyon.com/fileadmin/user_upload/media/pdf/voirie/referentiel-espaces-publics/20091201_gl_referentiel_espaces_publics_thematique_lutte_contre_ilots_chaleur_urbains.pdf

(50) M. Silva, *Green Roofs Energy Performance Simulation* (M.Sc. Thesis), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal, 2014 (in Portuguese).

(51) Dominique Gauzin-Müller, *Construire frugal en Provence-Alpes-Côte d'Azur, 15 exemples inspirants* envirobatbdm, 2019.

(52) http://www.arch-eco.com/realisations/naturoptere-serignan-du-comtat/

(53) https://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/vegetalisation_toiture/historique_vegetalisation_toiture.php4, 2008

(54) Med Bouattour, Fuchs Alain, La végétalisation des bâtiments, DREIF (http://www.la-cambuse.fr/wp-content/uploads/2016/07/RES-1209-vegetalisation-des-batiments-rapport.pdf) 2009.

(55) https://fr.wikipedia.org/wiki/Toiture_v%C3%A9g%C3%A9tale

(56) http://www.scilogs.fr/breves-mesopotamiennes/jardins-suspendus-babylone/

(57) http://www.eti-construction.fr/les-toitures-vegetalisees-non-opposables-au-titre-du-plu-9491/

(58) entretiens avec Sophie Rousset-Rouvière ; Déléguée générale Adivet ; sophie.rousset.rouviere@adivet.net

(59) Ademe Expertise ; *Aménager avec la nature en ville* ; Brochure réf 010658 ; Octobre 2018

(60) LAILLE, P., PROVENDIER, D., COLSON, F., SALANIE, J. (2013) : *Les bienfaits du végétal en ville : étude des travaux scientifiques et méthode d'analyse*. Plante & Cité, Angers, 31 p.

(61) Aline Brachet ; thèse au CSTB ; *Méthodologie hybride d'évaluation des interactions entre la biodiversité et les systèmes urbains : vers une synergie entre l'analyse de cycle de vie, l'expertise écologie et la data science* ; soutenance 2020.

(62) DE MUNCK C. (2013) : *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse. 119 p.

(63) JAFFAL I., OULDBOUKHITINE S.E., BELARBI R. (2012): *A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance*. Renewable Energy, 43, pp. 157-164.

(64) MUSY M. (coord.) (2014) : *Une ville verte, les rôles du végétal en ville*. Ed. Quae. 196 p.

(65) http://www.adivet.net/association-adivet/publications/newsletter-echo-du-b%C3%A2timent-v%C3%A9g%C3%A9talis%C3%A9/archive/view/listid-6/mailid-104-l-echo-du-batiment-vegetalise-n-59.html

(66) entretiens avec Lise Boussert ; déléguée technique de la CSFE ; BOUSSERTL@csfe.ffbatiment.fr

(67) https://www.codifab.fr/sites/default/files/toiture-terrasse_brochure_mars_2016.pdf

(68) https://www.prixnational-boisconstruction.org/rechercher-un-projet/2950

(69) https://www.prixnational-boisconstruction.org/rechercher-un-projet/4560 et https://www.a2a-architectes.fr/copie-de-bureau-a2a-1

(70) entretiens avec Julien Lamoulie ; ingénieur au FCBA ; Julien.LAMOULIE@fcba.fr

Annexes

1. Annexe 1 : Valeurs caractéristiques des bois

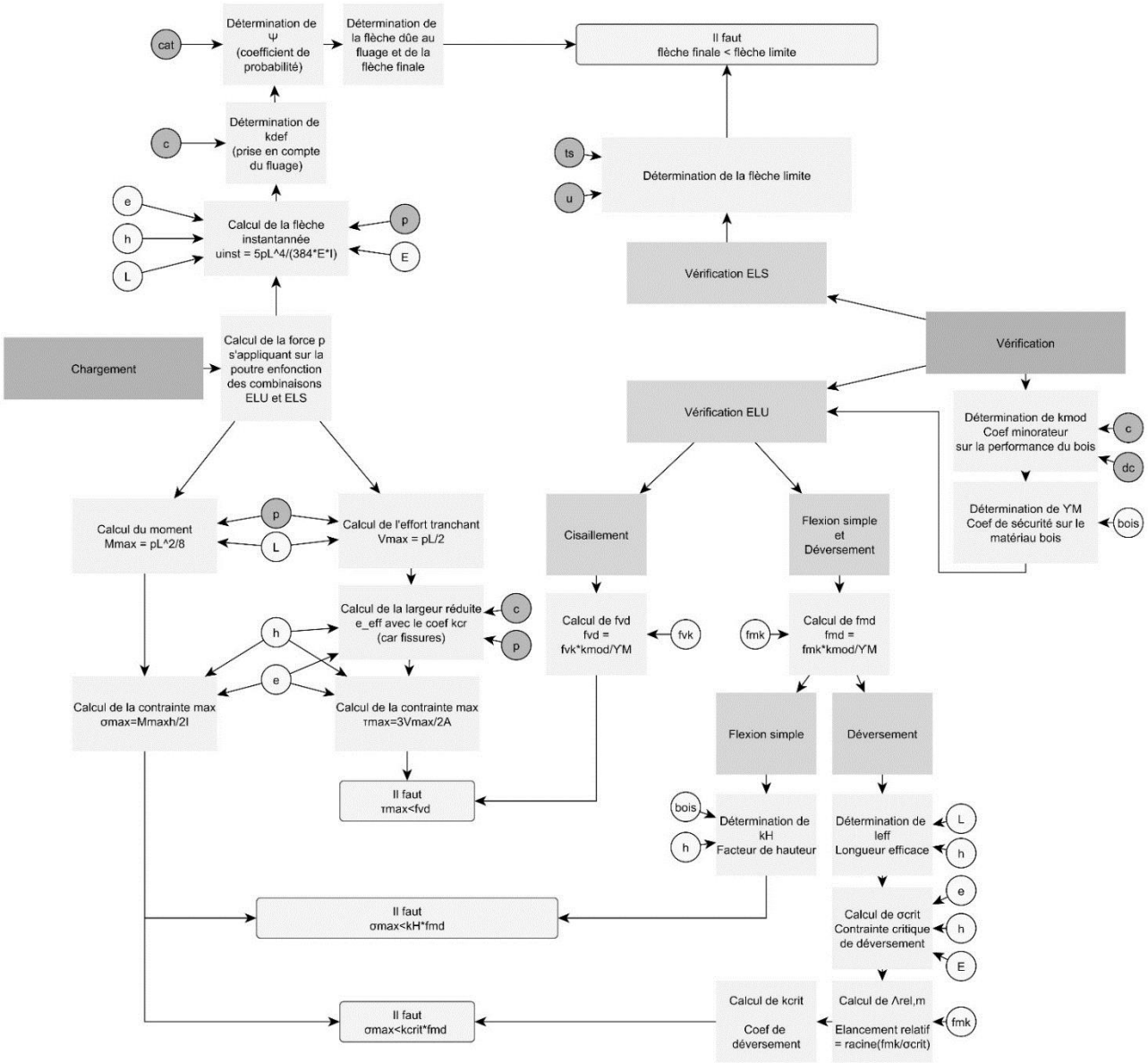
Pour les lamellés collés : Valeurs données par la norme NF EN 14 080 (Décembre 2013)

Pour les feuillus : Valeurs données par la norme NF EN 338 (Juillet 2016) valables pour des bois sans fissures, pour une température de 20°C et un taux d'humidité de 65%

Pour utilisation Eurocode 5

Description	Notation	Type de bois	Résistance en traction axiale	Résistance en traction parallèle au fil	Résistance en traction perpendiculaire au fil	Résistance en compression parallèle au fil	Résistance en compression perpendiculaire au fil	Résistance au cisaillement (et torsion)	Résistance au cisaillement roulant	Module d'élasticité parallèle au fil	Module d'élasticité caractéristique parallèle au fil	Module d'élasticité moyen parallèle au fil	Module d'élasticité caractéristique perpendiculaire au fil	Module d'élasticité moyen perpendiculaire au fil	Module de cisaillement caractéristique	Module de cisaillement moyen	Module de cisaillement roulant caractéristique	Module de cisaillement roulant moyen	Masse volumique caractéristique	Masse volumique moyenne
unité			$f_{t,0,ou\,m,k}$	$f_{t,0,k}$	$f_{t,90,k}$	$f_{c,0,k}$	$f_{c,90,k}$	$f_{v,k}$	$f_{r,k}$	$E_{0,mod}$	$E_{0,05}$	$E_{0,mod}$	$E_{90,05}$	$E_{90,mod}$	$G_{0,05}$	$G_{0,mod}$	$G_{r,05}$	$G_{r,mod}$	ρ_k	ρ_{mean}
			Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	Mpa	kg/m3	kg/m3
GL20h	lamellé-collé homogène	Bois massif feuillus	20	16	0,5	20	2,5	3,5	1,2	8400	7000	10200	300	300	650	650	540	540	370	410
GL22h	lamellé-collé homogène	Bois massif feuillus	22	17,6	0,5	22	2,5	3,5	1,2	10200	8500	11100	300	300	650	650	540	540	385	420
GL24h	lamellé-collé homogène	Bois massif feuillus	24	19,2	0,5	24	2,5	3,5	1,2	11100	9300	12000	300	300	650	650	540	540	405	445
GL26h	lamellé-collé homogène	Bois massif feuillus	26	20,8	0,5	26	2,5	3,5	1,2	12100	10100	13000	300	300	650	650	540	540	425	460
GL28h	lamellé-collé homogène	Bois massif feuillus	28	22,4	0,5	28	2,5	3,5	1,2	12600	10500	13600	300	300	650	650	540	540	430	460
GL30h	lamellé-collé homogène	Bois massif feuillus	30	24	0,5	30	2,5	3,5	1,2	13600	11300	14300	300	300	650	650	540	540	440	460
GL32h	lamellé-collé homogène	Bois massif feuillus	32	25,6	0,5	32	2,5	3,5	1,2	13600	11300	14300	300	300	650	650	540	540	440	460
GL20c	lamellé-collé panaché	Bois massif feuillus	20	12	0,4	18,5	2,5	3	1,2	10000	8500	11000	250	250	650	650	540	540	365	380
GL22c	lamellé-collé panaché	Bois massif feuillus	22	13,2	0,4	20	2,5	3,5	1,2	10000	8500	11000	250	250	650	650	540	540	385	400
GL24c	lamellé-collé panaché	Bois massif feuillus	24	14,4	0,4	21,5	2,5	3,5	1,2	10000	8500	11000	250	250	650	650	540	540	405	420
GL26c	lamellé-collé panaché	Bois massif feuillus	26	15,6	0,4	23	2,5	3,5	1,2	10000	8500	11000	250	250	650	650	540	540	425	440
GL28c	lamellé-collé panaché	Bois massif feuillus	28	16,8	0,4	24,5	2,5	3,5	1,2	10000	8500	11000	250	250	650	650	540	540	430	440
GL30c	lamellé-collé panaché	Bois massif feuillus	30	18	0,4	24,5	2,5	3,5	1,2	10000	8500	11000	250	250	650	650	540	540	440	440
GL32c	lamellé-collé panaché	Bois massif feuillus	32	19,2	0,4	24,5	2,5	3,5	1,2	10000	8500	11000	250	250	650	650	540	540	440	440
C16	Bois massif résineux	Bois massif résineux	16	10	0,4	17	2,2	3,2	0,4	8000	5400	8700	270	270	500	560	440	480	310	370
C18	Bois massif résineux	Bois massif résineux	18	11	0,4	18	2,2	3,4	0,4	9000	6000	9700	300	300	500	560	440	480	320	380
C20	Bois massif résineux	Bois massif résineux	20	12	0,4	19	2,3	3,6	0,4	9500	6400	10200	320	320	500	590	440	480	330	400
C22	Bois massif résineux	Bois massif résineux	22	13	0,4	20	2,4	3,8	0,4	10000	6700	10800	330	330	500	590	440	480	340	410
C24	Bois massif résineux	Bois massif résineux	24	14,5	0,4	21	2,5	4	0,4	11000	7400	11800	360	360	500	590	440	480	350	420
C27	Bois massif résineux	Bois massif résineux	27	16,5	0,4	22	2,5	4	0,4	11500	7700	12300	370	370	500	590	440	480	360	430
C30	Bois massif résineux	Bois massif résineux	30	18	0,4	24	2,7	4	0,4	12000	8000	12800	400	400	500	590	440	480	380	460
C35	Bois massif résineux	Bois massif résineux	35	21	0,4	25	2,7	4	0,4	13000	8700	13900	430	430	500	590	440	480	400	470
C40	Bois massif résineux	Bois massif résineux	40	24	0,4	27	2,8	4	0,4	13000	8700	13900	470	470	500	590	440	480	400	480
C45	Bois massif résineux	Bois massif résineux	45	27	0,4	30	2,9	4	0,4	13500	9000	14400	500	500	500	590	440	480	410	490
C50	Bois massif résineux	Bois massif résineux	50	30	0,4	33,5	3	4	0,4	14000	9500	15000	530	530	500	590	440	480	430	520
D18	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	18	11	0,6	18	4,8	3,2	/	9500	8000	10700	640	810	650	780	540	720	475	570
D24	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	24	14	0,6	21	4,9	3,7	/	10000	8400	11200	670	850	650	780	540	720	485	580
D30	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	30	18	0,6	24	5,3	3,9	/	10100	8500	11300	710	890	650	780	540	720	530	640
D35	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	35	21	0,6	25	5,4	4,1	/	10200	8600	11400	750	940	650	780	540	720	540	650
D40	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	40	24	0,6	27	5,5	4,2	/	10800	9100	12000	790	990	650	780	540	720	550	660
D50	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	50	30	0,6	30	6,2	4,5	/	11800	9900	13100	930	1160	650	780	540	720	620	740
D60	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	60	36	0,6	33	10,5	4,8	/	14300	12000	17000	1130	1410	650	780	540	720	700	840
D70	Bois massif feuillus	Bois massif feuillus	70	42	0,6	36	12	5	/	16800	14200	20000	1330	1660	650	780	540	720	800	960

2. Annexe 2 : Organigramme : Principe de vérification à l'Eurocode



3. Annexe 3 : Boucle de dimensionnement VBA

```
Sub calcul_poteau_ELU()

' calcul_poteau Macro
' calcule le côté minimum d'un poteau

    Worksheets("boisELU_pilier").Activate 'Activation de la page qui vérifie les poteaux

    Range("B15").Value = Range("A15").Value 'Entrée du côté minimal

    'Tant que la contrainte limite est inférieure à la contrainte effective,
    'on relance le calcul avec une section plus grande
    While Range("B42").Value < Range("B43").Value
        Range("B15").Value = Range("B16").Value + Range("B15").Value
    Wend

End Sub
```

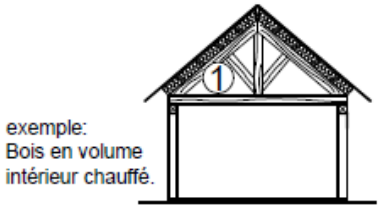
```
Sub calcul_poutre_ELU()

' calcule la hauteur et la largeur minimales d'une poutre

    Worksheets("boisELU_poutre").Activate 'Activation de la feuille ELU poutre

    hmin = Range("B15").Value
    hmax = Range("B17").Value
    pash = Range("E15").Value

    emin = Range("B16").Value
    emax = Range("B18").Value
    pase = Range("E16").Value

    'On définit d'abord les deux valeurs optimales sur des grandes valeurs
    hopt = hmax
    eopt = emax

    a = 0 'Compteur pour voir quand la valeur de la surface "remonte"

    'On fait varier h entre hmin et hmax avec le pas demandé sur la feuille excel
    For h = hmin To hmax Step pash

        If a = 20 Then
    'a doit être assez grand pour négliger les petites variations, (peut être à rerégler)

            Exit For
            'Quand la valeur de la surface ne diminue plus, on sort de la boucle
        End If

        Range("H15").Value = h

        'On fait varier e entre emin et emax avec le pas demandé
        For e = emin To emax Step pase


        Range("H16").Value = e

            If Range("B75").Value <> False Then
            'Si on veut faire la vérif à l'ELS : rajouter "And Range("B76").Value = True" dans le if'

                If (h * e) < (hopt * eopt) Then
                    hopt = h
                    eopt = e
                    a = 0
                    Range("B78").Value = hopt
                    Range("B79").Value = eopt
                Else
                    a = a + 1
                    Range("H19").Value = a
                End If

                Exit For

            End If
        Next

    Next

End Sub
```

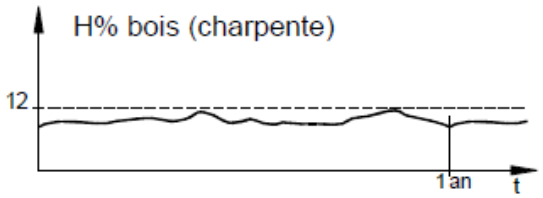
4. Annexe 4 : Classe de service [1]

L'Eurocode 5 propose de classer les éléments ou les ouvrages en fonction de leur niveau d'humidité ambiant.

a) Classe de service 1 :

Correspond **à une température de 20°C** et une **humidité relative ambiante** ne dépassant **65%** que pendant quelques semaines au cours de l'année.

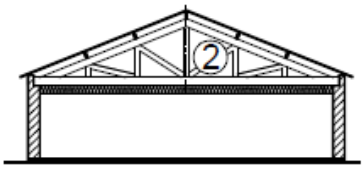


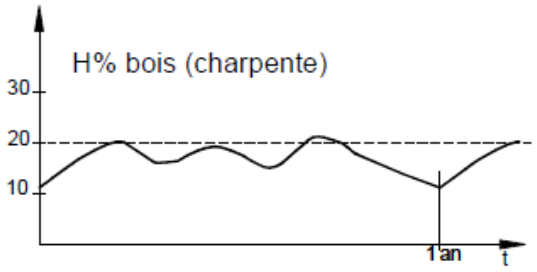


Le bois ne dépasse que rarement 12 % d' humidité.
→ classe de service 1

b) Classe de service 2 :

Correspond **à une température de 20°C** et une **humidité relative ambiante** ne dépassant **85%** que pendant quelques semaines au cours de l'année.

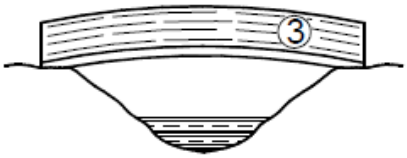


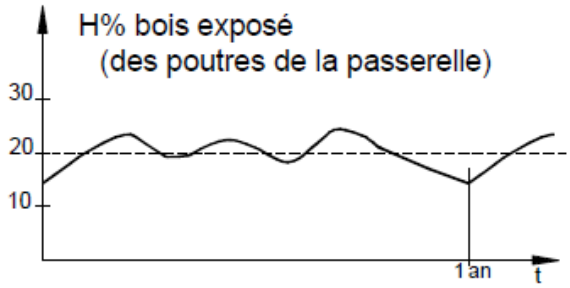


Le bois ne dépasse que rarement 20 % d' humidité.
→ classe de service 2

c) Classe de service 3 :

Correspond à un milieu extérieur, l'humidité du bois dépassant régulièrement 20% d'humidité.





Le bois peut être amené à des humidités supérieures à 20% pour des durées non négligeables
→ classe de service 3

5. Annexe 5 : Catégorie de bâtiments

Catégorie	Usage spécifique	Exemples
A	Habitation, résidentiel	Pièces des bâtiments et maisons d'habitation ; chambres et salles des hôpitaux ; chambres d'hôtels et de foyers ; cuisines et sanitaires.
B	Bureaux	
C	Lieux de réunion (à l'exception des surfaces des catégories A, B et D [a)]	**C1** : Espaces équipés de tables etc., par exemple : écoles, cafés, restaurants, salles de banquet, salles de lecture, salles de réception **C2** : Espaces équipés de sièges fixes, par exemple : églises, théâtres ou cinémas, salles de conférence, amphithéâtres, salles de réunion, salles d'attente **C3 :** Espaces ne présentant pas d'obstacles à la circulation des personnes, par exemple : salles de musée, salles d'exposition etc. et accès des bâtiments publics et administratifs, hôtels, hôpitaux, gares **C4** : Espaces permettant des activités physiques, par exemple : dancings, salles de gymnastique, scènes **C5** : Espaces susceptibles d'accueillir des foules importantes, par exemple : bâtiments destinés à des événements publics tels que salles de concert, salles de sport y compris tribunes, terrasses et aires d'accès, quais de gare
D	Commerces	**D1 :** Commerces de détail courants **D2** : Grands magasins

Nature des locaux		**Catégorie de la surface chargée**	q_k (kN/m^2)	Q_k (kN) [(3)]
Habitation, résidentiel	**A**	Planchers Escaliers [(1)] Balcons	1,5 2,5 3,5	2 2 2
Bureaux	**B**		2,5	4
Lieux de réunions [(2)]	**C**	C1 Espaces avec tables (écoles, cafés, salles de réception, ...) C2 Espaces avec sièges fixes (théâtres, églises, salles d'attente, ...) C3 Espaces sans obstacles à la circulation des personnes (salles de musée, hôtels, hôpitaux, gares, accès des bâtiments publics, ...) C4 Espaces avec activités physiques (dancing, scènes, salles de gym) C5 Espaces avec foules importantes (salles de concert, de sport, quais de gares, ...)	2,5 4 4 5 5	3 4 4 7 4,5
Commerces	**D**	D1 Commerces de détail courants D2 Grands magasins	5 5	5 7
Toitures : -non accessibles -accessibles	**D** **I**	Si pente ≤ 15% + étanchéité Autres toitures (*q_k sur une surface rectangulaire projetée (AxB) de 10m² telle que 0,5 ≤ A/B ≤ 2) Pour les usages de catégories A à D	0,8* 0 Charges identiques à la catégorie d'usage	1,5 1,5

6. Annexe 6 : Classe de résistance des panneaux KLH

extrait de l'avis technique 3.3/12-731_V2 du 12/12/2017

Tableau 3 – Valeurs des résistances caractéristiques des panneaux suivant L'ATE-06/0138

SOLLICITATIONS APPLIQUEES SUR LA FACE DES PANNEAUX	METHODE D'IDENTIFICATION	VALEUR CARACTERISTIQUE
Module d'élasticité - parallèlement au sens des fibres des plis extérieurs $E_{0,mean}$ - perpendiculairement au sens des fibres des plis extérieurs $E_{90,mean}$	Annexe 4, CUAP 03.04/06 EN 338	12000 N/mm2 370 N/mm2
Module de cisaillement - parallèlement au sens des fibres des plis $G_{0,mean}$ - perpendiculairement au des fibres des plis $G_{R,90,mean}$	EN 338 A_{plein} selon annexe 4 CUAP 03.04/06	690 N/mm2 50 N/mm2
Résistance à la flexion - parallèlement au sens des fibres des plis $f_{m,k}$	Annexe 4, CUAP 03.04/06	24 N/mm2
Résistance à la traction - perpendiculairement au sens des fibres des plis $f_{t,90,k}$	EN 1194 - réduit	0,12 N/mm2
Résistance à la compression - perpendiculairement au sens des fibres des plis $f_{c,90,k}$	EN 1194	2,7 N/mm2
Résistance au cisaillement - parallèlement au des fibres des plis $f_{v,k}$ -perpendiculairement au des fibres des plis agissant le plus à l'extérieur dans le sens porteur (résistance au cisaillement roulant $f_{v,R,k}$)	EN 1194 A_{plein} , annexe 4 CUAP 03.04/06	2.7 N/mm2 1.2 N/mm$_2$ si $t_q \leq$ 45mm 0.8 N/mm$_2$ si $t_q >$ 45mm t_q = ép plis transversaux

SOLLICITATIONS APPLIQUEES SUR LE CHANT DES PANNEAUX	METHODE D'IDENTIFICATION	VALEUR CARACTERISTIQUE
Module d'élasticité - parallèlement au sens des fibres des plis $E_{0,mean}$	Annexe 4, CUAP 03.04/06	12000 N/mm2
Module de cisaillement - parallèlement au sens des fibres des plis $G_{0,mean}$	Annexe 4, CUAP 03.04/06	Modélisation orthotrope : 500 N/mm2 Modélisation poutre : 250 N/mm2
Résistance à la flexion - parallèlement au sens des fibres des plis $f_{m,k}$	Annexe 4, CUAP 03.04/06	24 N/mm2
Résistance à la traction - parallèlement au sens des fibres des planches $f_{t,0,k}$	EN 1194	16.5 N/mm2
Résistance à la compression - parallèlement au sens des fibres des plis f c,0,k - concentré, parallèlement au sens des fibres des plis f c,0,k x kc,0	EN 1194 CUAP 03.04/06	24 N/mm2 kc,0 ≤ 1.5 si a ≤min(H/2;500mm) kc,0 ≤ 1.9 si a >min(H/2;500mm) a : distance entre la transmission de la charge et le bord du panneau
Résistance au cisaillement - parallèlement au sens des fibres des planches f v,k	A net, Annexe 4 CUAP 03.04/06	8.4 N/mm2 plis de 13 à 19 mm 5.5 N/mm2 plis de 34 mm 3.9 N/mm2 plis de 45 mm suivant ép des plis (détail §6.242)

Annulé le : 15/11/2019

7. Annexe 7 : Caractéristiques techniques de la salle d'expérimentation de l'étude énergétique [40] [50]

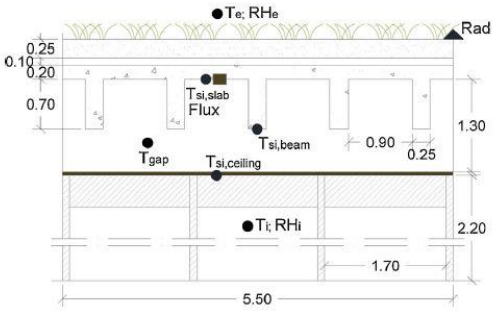


Fig. 3. Layout of the measurement instrumentation of the technical sound room: T (thermocouples and thermohygrometers), RH (thermohygrometers), Flux (heat-fluxmeter), Rad (pyranometer).

Table 3
Parameters of vegetation and substrate for extensive, intensive and semi-intensive green roofs.

			Type of green roof		
			Extensive	Semi-intensive	Intensive
Parameters	Vegetation	Height of plants (m)	0.05	0.5	1.0
		LAI	1	2.5	5
	Soil/substrate	Depth (m)	0.1	0.35	0.7

4.1.1 Study case 1 – Gulbenkian: Technical sound room

The first study case in *Gulbenkian* is a technical sound room fully adiabatic, except the roof addressed, and with a total floor area of 17 m². The modelled created in Google SketchUp is presented in Figure 2.

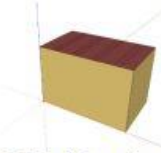


Figure 2 - Technical sound room model

The modelled green roof is a representation of the grass lawn (figure of Table 1) existing on the rooftop, above a 0,2 m concrete slab and 0,1 m gravel, without any additional insulation. The main characteristics of the green roof baseline is presented in Table 1.

Table 1 - Green roof 1 baseline main characteristics

Height of plants (m)	0,10
LAI	2,0
Soil thickness (m)	0,25
Irrigation (mm/day) (Jun. to Sep.)	6

4.1.2 Study case 2 – Gulbenkian: Rehearsal room

The second study case, also in *Gulbenkian*, is a rehearsal room fully adiabatic, except the roof addressed and a glazed facade, with a total floor area of 185 m². The rooftop characteristics are the same presented in Table 1, as Figure 3 proves, including concrete slab and gravel thickness, roof insulation and green roof characteristics.

Figure 3 - Rehearsal room green roof

The modelled created in Google SketchUp is presented in Figure 4.

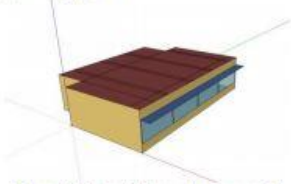


Figure 4 - Technical sound room model

4.1.3 Study case 3 – ETAR: Conference room

The last study case is located in *ETAR de Alcântra*, and concerned a conference room fully adiabatic, except the roof addressed and a glazed facade, with a total floor area of 93 m². The modelled created in Google SketchUp is presented in Figure 5.

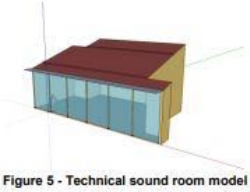


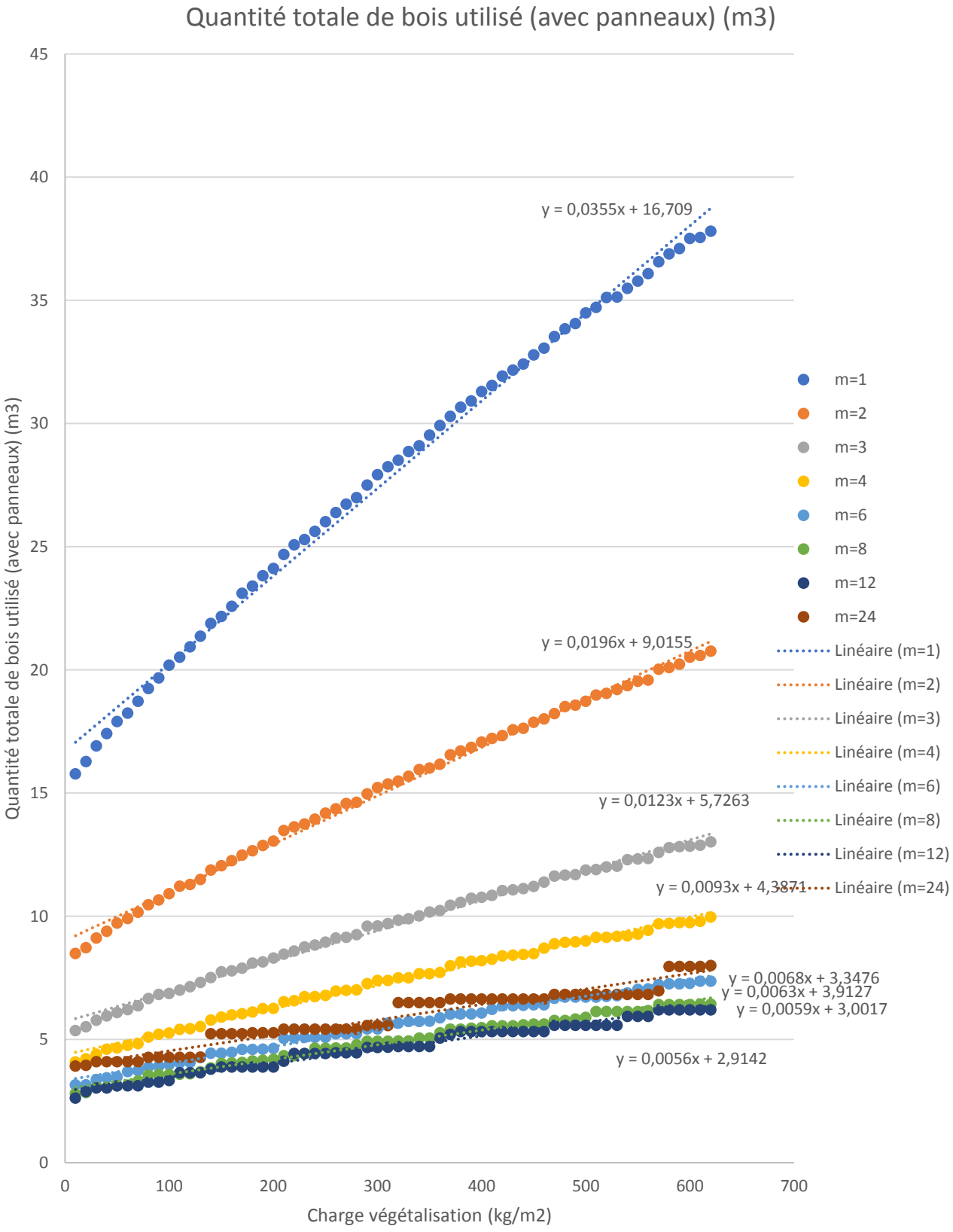
Figure 5 - Technical sound room model

The modelled green roof is a representation of the plants (figure of Table 2) existing on the rooftop, above a 0,2 m concrete slab and a varying thickness of lightweight gravel (0,4 to 0 m), without any additional insulation. The main characteristics of the green roof baseline is presented in Table 2.

Table 2 - Green roof 2 baseline main characteristics

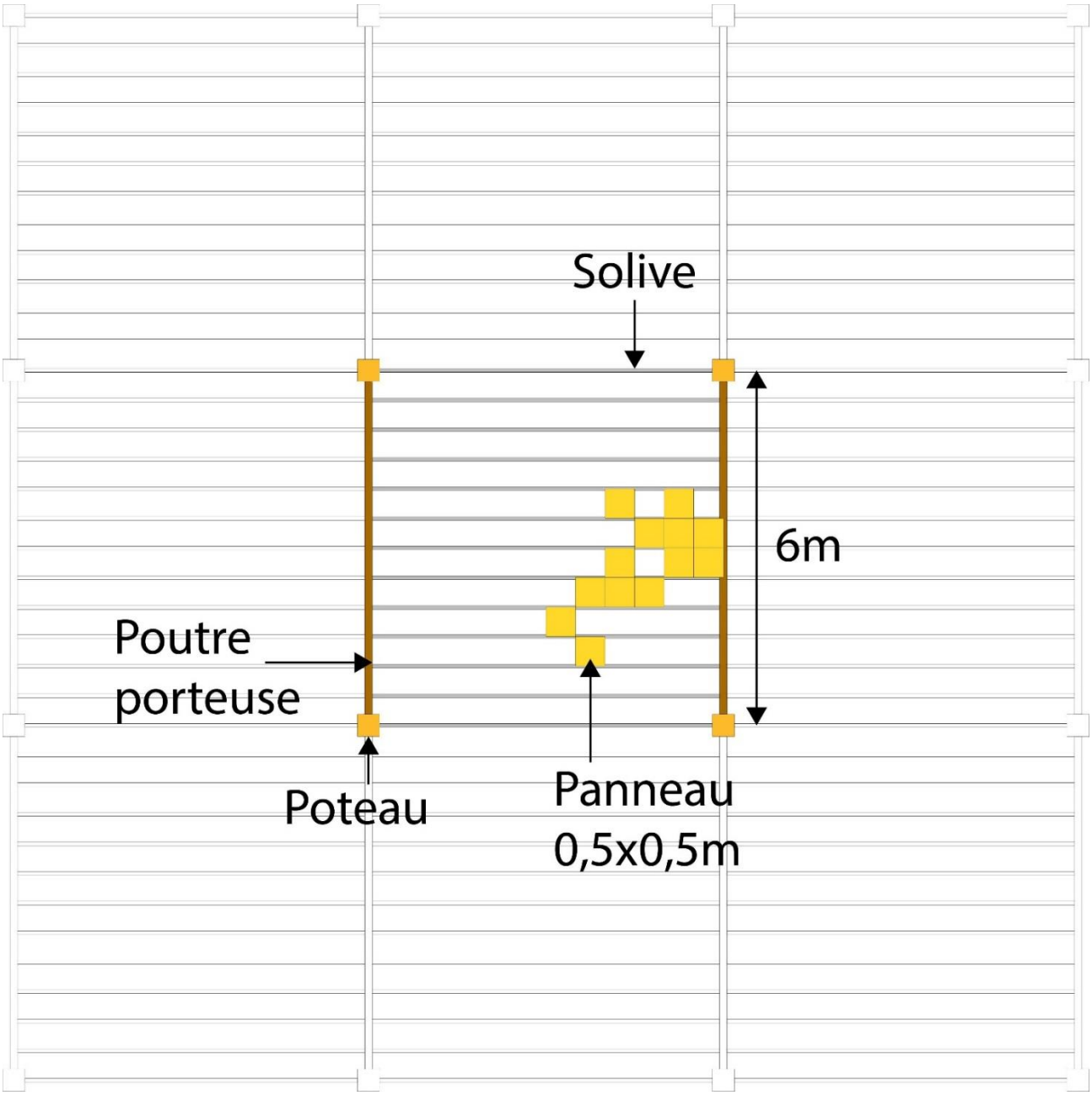
Height of plants (m)	0,4
LAI	4,0
Soil thickness (m)	0,65
Irrigation (mm/day) (Jan. to Dec.)	6

8. Annexe 8 : Résultat complet du calcul de charpente avec poteaux

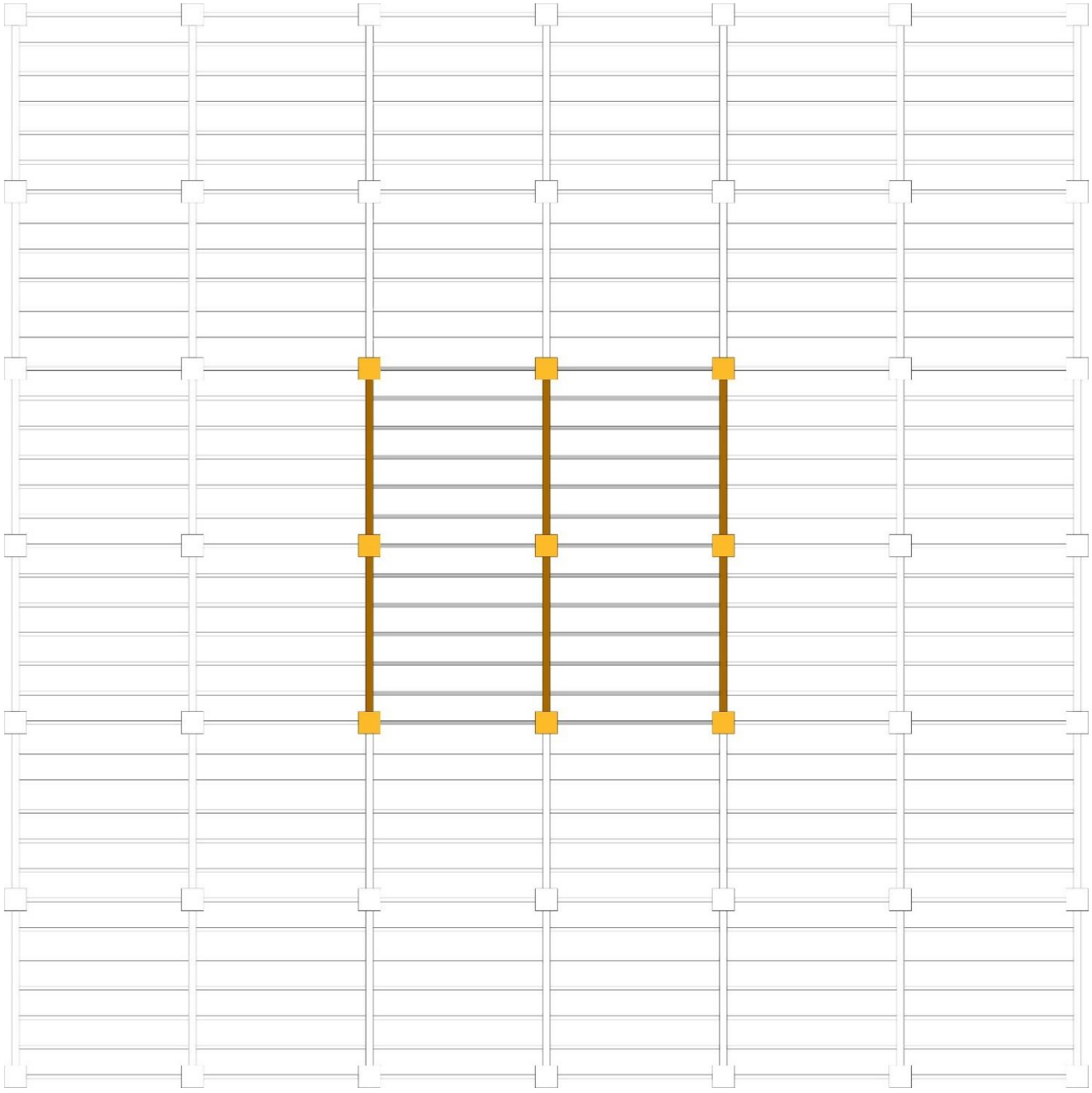
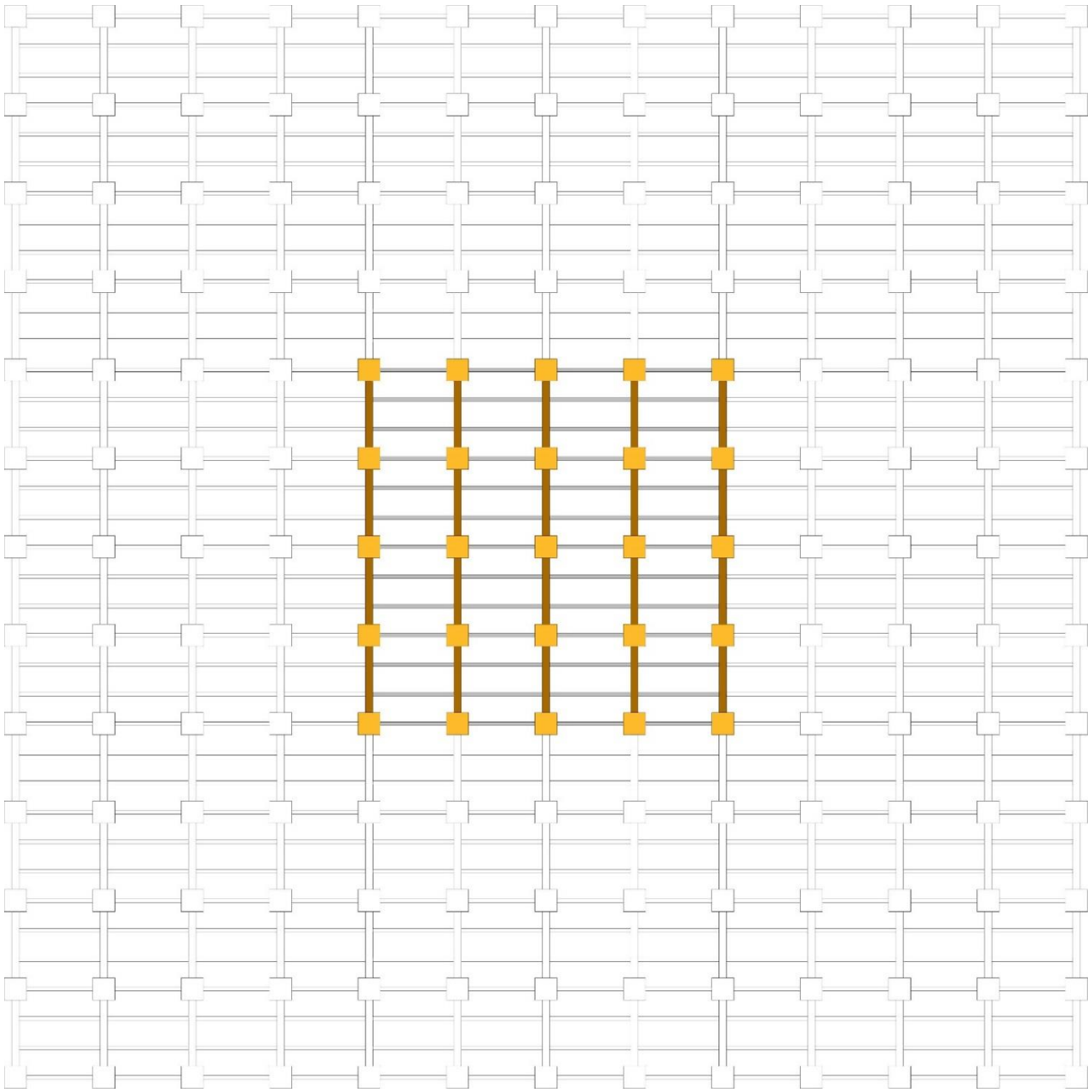


9. Annexe 9 : Plans des modèles

m=2



m=4



m=8