

École polytechnique de Louvain

Conception et optimisation de structures agrivoltaïques via modélisation paramétrique

Câbles et grumes, allier légèreté et simplicité

Auteurs: **Benjamin DARDENNE, Xavier DE LIEDEKERKE DE PAILHE**

Promoteur: **Pierre LATTEUR**

Lecteurs: **Jonas FERON, Justin GOOSSE, Frédéric LEBEAU, Hadrien RATTEZ**

Année académique 2022-2023

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Abstract - What, why and how

La demande énergétique croissante, l'explosion démographique mondiale ainsi que les challenges écologiques actuels nous obligent à repenser notre manière de produire afin de le faire plus efficacement tout en respectant notre environnement. Dans les domaines énergétique et agricole, une piste de réponse à cet imbroglio est l'agrivoltaïsme, alliant agriculture et production photovoltaïque. Ce secteur en pleine voie de développement profite des grandes surfaces agricoles utiles à la production d'énergie renouvelable nécessaire à notre société, tout en permettant la culture de denrées alimentaires essentielles, sa protection contre les intempéries et éventuellement l'élevage. La technologie actuelle fait principalement appel à l'acier, matériau onéreux et énergivore. L'utilisation de bois peu transformé n'est pas répandue pour de tels ouvrages et pourtant serait plus écologique et économique. Afin de ne pas gêner l'exploitation des terres, il faut assurer des largeurs et hauteurs de passage importantes. Le bois allié à l'efficacité structurale des câbles rend possible la création de structures agrivoltaïques pertinentes. Leur optimisation permettra en outre de minimiser le volume de matériaux mis en oeuvre. Les structures agrivoltaïques câblées en bois ouvrent donc la voie à de nouvelles solutions écologiques et économiques, fers de lance actuels de notre société.

Remerciements

Ce travail de fin d'études ne serait pas ce qu'il est sans l'aide précieuse des nombreux intervenants et accompagnants à qui nous aimerions témoigner notre gratitude.

Avant tout, nous remercions notre promoteur de mémoire le Professeur Pierre Latteur, pour son enthousiasme et son implication continuel dans la rédaction de ce mémoire. Son expertise pratique et théorique nous a guidé à travers des concepts qui nous étaient méconnus. Outre son accompagnement pédagogique, nous lui sommes reconnaissants pour les discussions tenues ensemble qui se sont toujours révélées enrichissantes.

Les professeurs Hadrien Rattez et Frédérique Lebeau ont également contribué à l'élaboration de ce TFE de par leurs conseils dans leur domaine respectif et les références qu'ils ont pu nous procurer. Nous aimerions les remercier pour l'expertise qu'ils ont pu nous donner et la disponibilité dont ils ont fait preuve.

Nous sommes reconnaissants envers Fabienne Godin, Sandrine Plasman, Géraldine Wauters et Bernard Dardenne pour le temps qu'ils ont consacré à la relecture de nos écrits afin d'en améliorer le sens et la justesse. Nous espérons que nos bévues leur ont donné le sourire. Nous aimerions également manifester notre gratitude à Léa Walgraffe pour ses rendus graphiques de grande qualité. Merci à eux.

Nous remercions les membres de notre jury pour le temps et l'intérêt consacrés à notre mémoire ainsi que le pôle de génie civil de l'*UCLouvain* pour l'ambiance plaisante de travail qui y règne et les innombrables savoirs transmis au cours de ces cinq dernières années.

Enfin, nous remercions nos proches pour leur soutien inébranlable tout au long de nos parcours universitaires et pendant cette étape de rédaction concluant nos études. Leur présence nous a permis de suivre une scolarité paisible dans les moments sérieux comme dans les moments de décompression.

Table des matières

Introduction	1
1 L’agrivoltaïsme	3
1.1 Contexte et état de l’art	3
1.2 Objectifs du mémoire	12
1.2.1 Conception des structures et dimensionnement	12
1.2.2 Optimisation structurale et financière	12
1.2.3 Modélisation des structures par une interface Rhino Grasshopper	13
I Conception des structures et dimensionnement	15
2 Les structures basses	17
2.1 Description générale des structures basses	17
2.2 Étude de faisabilité des structures de partitions	18
2.2.1 Cas de charge des structures basses	19
2.2.2 Efforts internes	21
2.2.3 Dimensionnement	24
3 Les structures hautes	29
3.1 Description générale des structures hautes	29
3.1.1 Double solution pour les poutres de support	31
3.1.2 Discussions sur la modélisation	32
3.2 Étude de faisabilité des structures surplombantes	35
3.2.1 Cas de charge des structures hautes	35
3.2.2 Efforts internes	38
3.2.3 Dimensionnement	43
II Optimisation structurale et financière par les indicateurs morphologiques	59
4 Les indicateurs morphologiques : qu’est-ce que c’est ?	61
4.1 Principe et définition	61
4.1.1 Pourquoi utiliser les indicateurs morphologiques pour concevoir ?	62
4.2 Exemple pratique utilisant les indicateurs morphologiques : câble de portée L	62
4.3 Pourquoi les appliquer aux structures agrivoltaïques ?	64

5	Application des indicateurs morphologiques aux structures hautes	67
5.1	Principe général	67
5.2	Classement des paramètres	68
5.3	Les expressions de volume	70
5.3.1	Le volume d'un poteau en grume de bois	70
5.3.2	Le volume d'un câble	71
5.3.3	Le volume des grumes de support	71
5.3.4	Le volume des profilés métalliques de support	72
5.4	Définition de l'indicateur $\Xi \sim \Xi$	74
5.4.1	Expression de l'indicateur de colonne Ξ_c	74
5.4.2	Expression de l'indicateur de câble $\Xi_{c\grave{a}ble}$	75
5.4.3	Expression de l'indicateur de poutres de support en bois Ξ_{panne}	76
5.4.4	Expression de l'indicateur de poutres de support en profilé métallique $\Xi_{profil\acute{e}}$	76
6	Résultats de l'optimisation par les indicateurs de volume	79
6.1	Optimisation de la géométrie pour les poteaux de bois	79
6.2	Optimisation de la géométrie pour les câbles	80
6.3	Optimisation de la géométrie pour les poutres de support	81
6.4	Mise en commun des indicateurs et optimum général	83
6.5	Application de l'optimisation pour déterminer le prix surfacique de la structure	87
6.6	Exemple d'influence des coûts supplémentaires	89
III Modélisation des structures par une interface Rhino Grasshopper et enjeux du mémoire		95
7	Modélisation paramétrique	97
7.1	Modélisation des structures basses	98
7.2	Modélisation des structures hautes	99
7.3	Éventuels modules annexes	101
7.4	Limitations des interfaces	102
8	Continuité et enjeux du mémoire	103
8.1	Pistes de continuation	103
8.2	Enjeux éthiques de l'agrivoltaïsme	105
Conclusion		109
IV	Bibliographie et Annexes	111
A	Données utilisées pour l'optimisation du volume de matériaux	117
B	Production des modules solaires par classe de puissance et secteur en Wallonie	119
C	Détail de calcul de la capacité portante du sol pour les fondations des structures hautes	120
D	Détail du programme GH des structures basses	122
E	Détail du programme GH des structures hautes	125
F	Détail de calcul de la pression dynamique de pointe du vent [25]	129
G	Code Python calculant et représentant l'optimisation du prix surfacique de la structure	132

Introduction

La densification de la population catalyse la demande énergétique et le souhait de s'écarter des énergies fossiles appellent à l'exploitation innovante de sources plus durables. Allier le photovoltaïque à une autre activité permettrait de tirer profit de nombreux espaces déjà utilisés et pourtant nécessaires afin de répondre aux défis écologiques et démographiques actuels.

L'agriculture, occupant déjà une superficie prépondérante sur le territoire, est un domaine dans lequel les centrales photovoltaïques pourraient trouver à se déployer sur de grands espaces moyennant une association avisée. Ce mariage porte le nom d'agrivoltaïsme et connaît une croissance exponentielle : sa puissance mondiale installée a évolué de $5[MW_c]^1$ en 2012 à $14000[MW_c]$ en 2021 [1]. La Belgique souhaite investir dans ce marché et proposer des installations innovantes, la technologie actuelle faisant principalement appel à l'acier. Bien que ce matériau soit performant et recyclable, il reste onéreux et énergivore d'où l'opportunité d'ouvrir notre réflexion à d'autres solutions.

La grume de bois, forme la moins transformée du matériau, s'impose comme une solution écologique et économique idéale mais représente un challenge technique de par son utilisation inédite. Par ailleurs, l'agrivoltaïsme se doit de limiter son empreinte au sol pour laisser libre accès à l'exploitation agricole sous-jacente et impose par conséquent l'utilisation de grandes portées soutenues ponctuellement. Le câble, matériau particulièrement performant, viendra compléter l'usage du bois afin de composer des structures porteuses discrètes en vue d'implanter harmonieusement le photovoltaïque dans la sphère agricole.

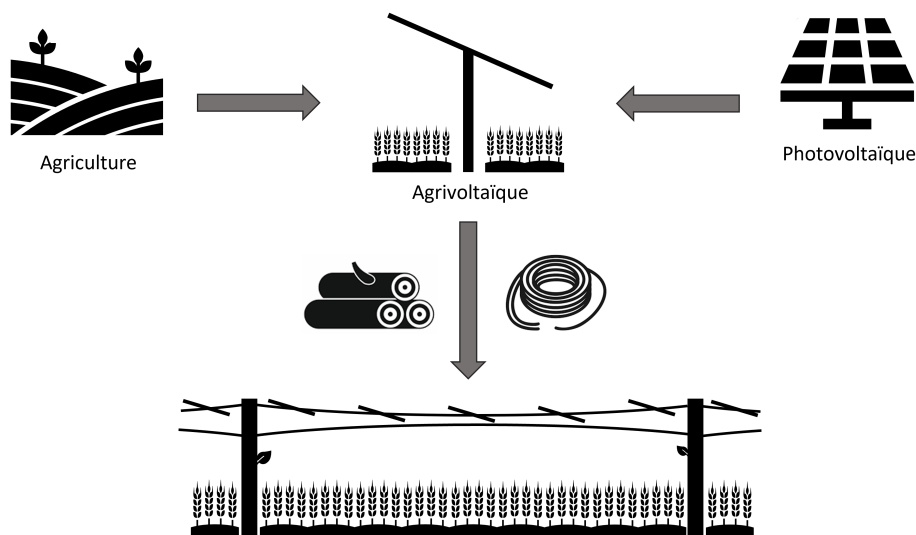


FIGURE 1 – L'agrivoltaïsme.

1. Mégawatt crête : unité mesurant la puissance des panneaux photovoltaïques.

Ce mémoire a pour objectifs, d'une part, de présenter un design innovant et optimisé de structures porteuses câblées en bois pour des centrales agrivoltaïques et, d'autre part, de créer un programme de modélisation paramétrique intelligent incluant le dimensionnement et l'optimisation de telles structures. Afin d'atteindre ces objectifs, le travail est divisé en trois parties.

Dans une première partie, les ouvrages agrivoltaïques seront présentés, étudiés et dimensionnés. Le côté inédit de l'utilisation du bois mettant un voile sur la certitude d'efficacité, la faisabilité de tels ouvrages sera également mise en question au travers de l'étude d'un cas concret.

Dans une seconde partie, les dimensions de la proposition structurale seront optimisées par le biais d'outils mathématiques appelés *indicateurs morphologiques*. Ces outils permettent de mesurer l'influence qu'ont certains paramètres du projet sur, notamment, la quantité de matière première utilisée. La minimisation du prix de la structure fera également l'objet d'une discussion.

Dans une dernière partie, un programme de modélisation paramétrique sera présenté. Ce logiciel inclura les outils d'optimisation des structures et proposera une visualisation interactive de ces dernières.

Chapitre 1

L'agrivoltaïsme

1.1 Contexte et état de l'art

La hausse de population crée une demande d'énergie grandissante, les espaces disponibles se raréfient. Une nécessité d'efficacité de production se ressent et la transition énergétique, essentielle afin de s'écarter des énergies fossiles, incite à répondre à cette demande via les énergies renouvelables. Leurs sources étant inépuisables, une exploitation intelligente de celles-ci offrent une meilleure réponse à l'urgence climatique. En 2020, les SER¹ représentaient 19.23% de la production électrique nette wallonne[2]. Dans ce pourcentage, les énergies éoliennes et photovoltaïques sont celles qui ont l'impact le plus important, produisant respectivement 8.9% et 4.8% du total annuel valant 27967.4[GWh], les autres sources étant dominées par le nucléaire (47.9%) et les turbines gaz-vapeurs (TGV) (25.8%). Notre intérêt se concentrera sur les innovations dans le domaine solaire, qui rassemble déjà l'enthousiasme du public. En effet, le coût "LCOE"² de cette source de production a connu une baisse d'approximativement 90% de 2009 à 2019[3], le rendant de plus en plus attractif. Il est à nuancer que cette diminution provient de la croissance du marché chinois, éthiquement questionnable. Au vu des résultats obtenus par le leader asiatique, l'Europe se doit de promouvoir ce secteur encore trop peu exploité afin d'offrir une production européenne.

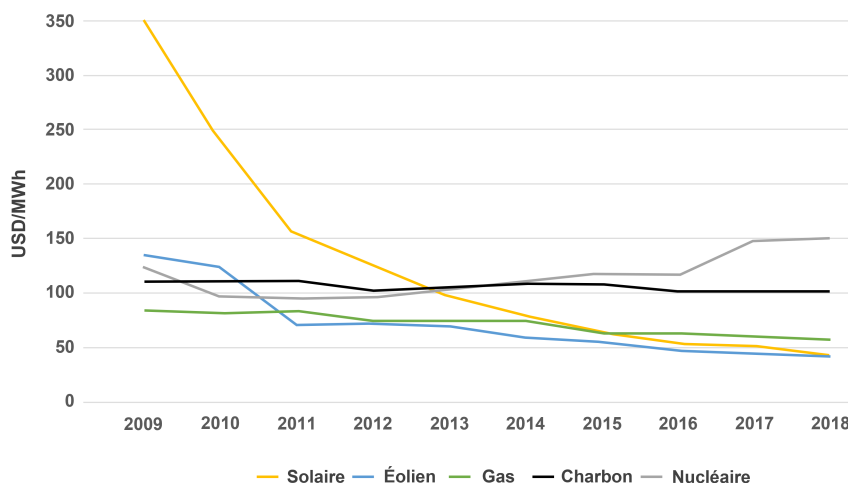


FIGURE 1.1 – Évolution des coûts de production d'électricité [4].

1. Source d'Énergie Renouvelable.

2. *Levelised Cost of Energy* : Rapport du coût complet d'une énergie sur l'énergie totale produite durant la période de vie de l'équipement.

Un réacteur nucléaire de 900[MW] produit en moyenne 8.76[TWh] annuellement, ce qui est équivalent à 5500 hectares de couverture photovoltaïque[5]. En 2020, la majeure partie des installations photovoltaïques sont chez des particuliers et de faibles superficies. En effet, 75.1% de la production photovoltaïque wallonne est assurée par des unités inférieures à 10[kw] (voir figure 1.2b), s'additionnant à un total de 623.2 hectares. Cela s'explique par le manque d'espaces disponibles, conséquences de la densité de population élevée en Belgique[6]. Malheureusement, ce type d'installation arrivera à bout de souffle, les superficies exploitables chez les particuliers se faisant de plus en plus rares. Il est donc de l'intérêt général de développer un système d'exploitation photovoltaïque sur de grandes parcelles, pouvant impacter significativement la production d'énergie solaire belge. Une possibilité pour y parvenir est de profiter de grands espaces en appliquant le principe du "Dual Use". Ce concept combine la production photovoltaïque avec une autre activité comme la couverture de parkings, d'autoroutes, de friches industrielles ou encore de cultures agricoles. Cette dernière option peu exploitée pour l'instant (voir figure 1.2a), définie comme l'agrivoltaïsme, permettrait de tirer avantage des nombreuses plaines agricoles de nos territoires et offrirait aux agriculteurs une source d'énergie et de revenu complémentaire.

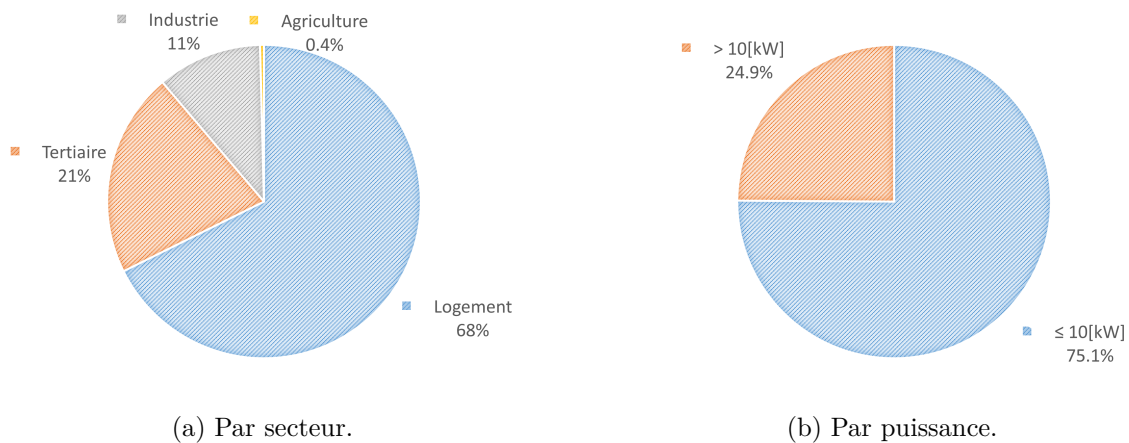


FIGURE 1.2 – Pourcentage de production des modules solaires par secteur et par classe de puissance en Wallonie (2020)[2].

Dans ce domaine, plusieurs solutions existent et seront présentées plus loin. La plus étudiée est celle qui consiste à placer des panneaux au-dessus de cultures ou pâtures, partageant l'ensoleillement et créant de l'ombre pour les parcelles sous-jacentes. En Belgique, le consortium politique n'encourage pas toujours la mise en place de telles infrastructures par crainte qu'elles ne se prêtent pas à notre climat déjà peu ensoleillé. Cependant, les courbes de saturation lumineuse corroborent que l'application de l'agrivoltaïsme dans nos régions est pertinente. Illustrées à la figure 1.3, elles mettent en relation le taux de photosynthèse d'une plante et la lumière qu'elle perçoit. On peut voir qu'à partir d'une certaine quantité de lumière, la production de photosynthèse cesse d'augmenter[7]. Le surplus lumineux peut être valorisé afin de maximiser l'exploitation du capital de lumière en essayant d'atteindre un équilibre de production photo-synthétique et électrique. Une expertise est nécessaire afin de s'approcher du meilleur compromis. Outre le profit de ce surplus de lumière, l'agrivoltaïsme présente d'autres atouts. Il permet notamment la protection des plantes contre les aléas climatiques tels que la grêle et le gel. Une couverture photovoltaïque permet également de rafraîchir une culture de par sa capacité ombrière et limite l'évaporation, éléments clés au vu des périodes de sécheresse de plus en plus fréquentes que connaissent nos régions. Un autre avantage est l'utilisation plus optimisée d'une même parcelle permettant un meilleur rendement économique.

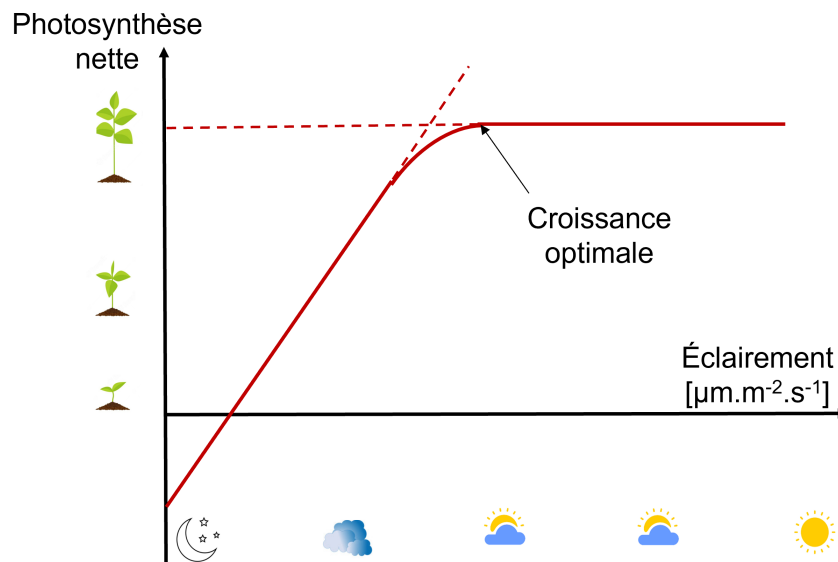


FIGURE 1.3 – Exemple de courbe de saturation lumineuse de la photosynthèse.

Bref historique

Bien que le terme "agrivoltaïque" ne soit apparu pour la première fois qu'en 2011, ce concept a pris naissance quelques années auparavant en Allemagne, en 1971 [8]. Adolf Goetzberger et Armin Zastrow sont les premiers à avoir proposé la co-existence d'une culture agricole et d'une centrale de production photovoltaïque sur une même terre. Les premières serres photovoltaïques (figure 1.4b) apparaissent en Europe au début des années 2000, mais il ne s'agit pas encore du concept d'agrivoltaïsme tel qu'on le définit aujourd'hui. Un japonais, nommé Akira Nagashima, développe en 2004 les premières structures agrivoltaïques destinées à être installées en plein champs (figure 1.4a). C'est notamment lui qui utilise pour la première fois l'excédent de lumière à la photosynthèse des plantes afin de produire de l'énergie solaire, dans le but de nuire au minimum aux cultures [9]. Dès lors, l'agri-PV³ s'est étendu sur pratiquement tous les continents jusqu'à ce jour, avec une puissance installée globale en 2021 de 14 [GW_c][1].



(a) Première structure agrivoltaïque en plein champs, 2004, Akira Nagashima [9].



(b) Exemple de serres agrivoltaïques [10].

FIGURE 1.4 – Exemples structures agrivoltaïques.

Au fil des années, la production d'énergie solaire dans le milieu agricole s'est déclinée sous une multitude de formes et dans des contextes très différents. L'entreprise *Rem Tec* [11] est un des acteurs principaux de l'agrivoltaïsme dans le monde et a investi notamment l'Italie en 2009

3. Agrivoltaïque.

avec son projet à Mantova [11] ou encore la Chine en 2016 dans la province de Jinzhai [12]. Au cours de la même période, d'autres projets sont nés tout autour du globe dans des pays moins développés comme le Chili ou le Vietnam. Des prototypes ont été bâtis dans ces pays en 2017 et les résultats sont encourageants [13].

Les leaders mondiaux de l'agrivoltaïsme sont la Chine, la France, l'Allemagne, l'Italie et le Japon et tous montrent des résultats probants au regard des diverses exploitations qu'ils ont mises en place [14]. Il y a notamment le projet "Agrivoltaics in vineyards" de la société française *Sun'Agri* [15] qui permet aux vignobles de moins souffrir des vagues de chaleur (figure 1.5a). *L'Université des sciences et technologies de Chine* a, quant à elle, développé une structure permettant de diminuer l'ombrage sur les cultures créé par de tels édifices grâce à des diffuseurs lumineux (figure 1.5b) [16].



(a) Installation photovoltaïque au-dessus de vignobles, *Sun'Agri* [15].



(b) Structure agrivoltaïque limitant l'ombrage sur les cultures, *Université des sciences et technologies de Chine* [16].

FIGURE 1.5 – Solutions de structures agrivoltaïques en France et Chine.

État actuel de la technologie

Aujourd'hui, il existe une multitude de solutions agrivoltaïques sur la scène mondiale et on observe une perpétuelle recherche d'efficacité et d'innovations. Un des intérêts majeurs de l'agri-PV est sa capacité à se décliner sous toutes les formes pour satisfaire à des projets de niche. Il est malgré tout possible de catégoriser les propositions existantes et de faire un bilan de ces dernières comprenant leurs spécificités propres. *L'Institut pour les systèmes énergétiques solaires Fraunhofer* propose une classification des solutions existantes [1]. Une version simplifiée est proposée à la figure 1.6.

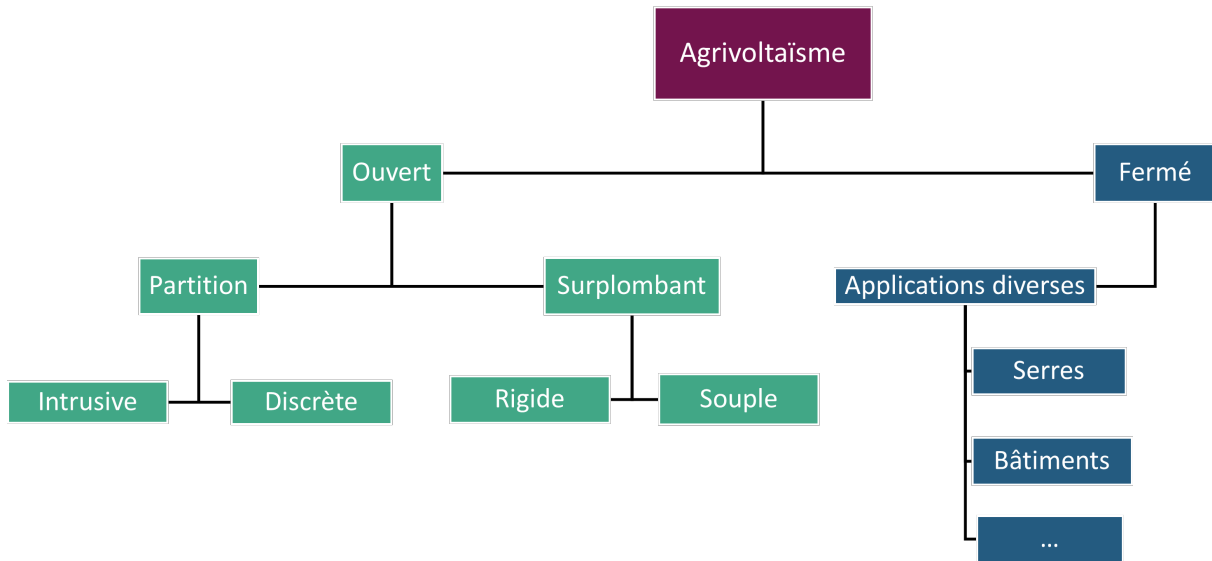
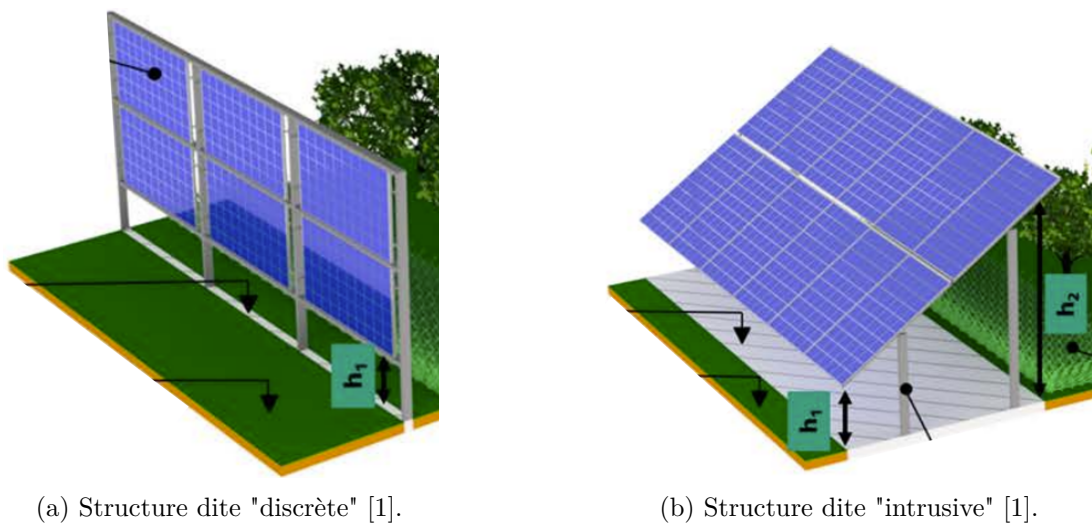


FIGURE 1.6 – Catégorisation de l'agrivoltaïsme actuel.

Les appellations "ouvert" et "fermé" de la figure 1.6 font référence à l'essence même de la structure : ou bien celle-ci ferme l'accès à l'extérieur, ou bien cet accès est préservé et on parle alors de structures ouvertes. Les grandes nuances dans les structures ouvertes se jouent sur leur relation au terrain sur lequel elles sont posées. Elles peuvent soit le fractionner en zones exploitables et créer des partitions, soit être l'équivalent d'une toiture pour ce terrain, surplombant donc les cultures.

Les structures dites de partition (figure 1.6) sont divisibles en deux catégories : intrusives ou discrètes. Les structures intrusives sont définies comme ayant une empreinte significative sur le terrain sur lequel elles se trouvent, limitant donc l'espace exploitable. À l'inverse, les structures discrètes veulent limiter au maximum l'espace au sol utilisé afin de maximiser les zones d'exploitation. Afin de différencier les deux, les figures 1.7a et 1.7b montrent deux exemples de ces structures.



(a) Structure dite "discrète" [1].

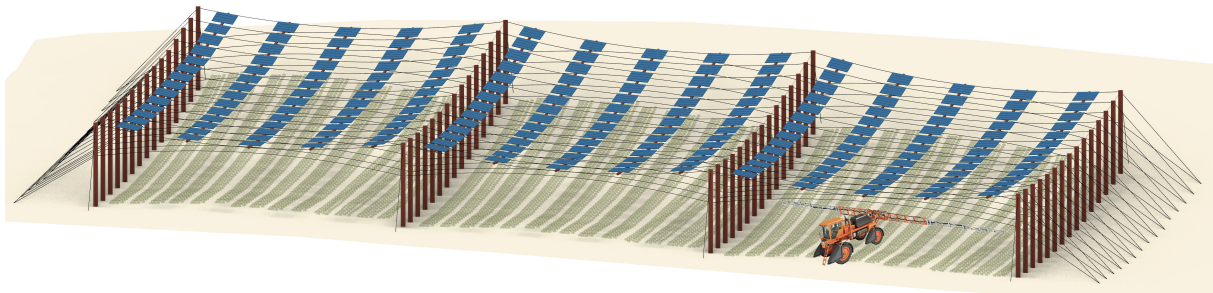
(b) Structure dite "intrusive" [1].

FIGURE 1.7 – Structures agrivoltaïques partitions.

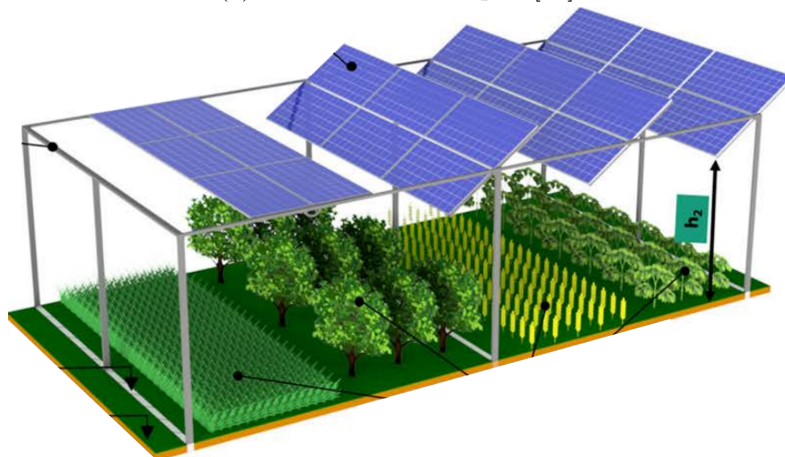
Les structures partitions illustrées dans les figures 1.7a et 1.7b se présentent souvent avec une ossature métallique et sont généralement de faible hauteur, même s'il existe des variantes pour lesquelles les panneaux sont surélevés par rapport au sol. On voit bien que sous la structure intrusive de la figure 1.7b, la zone sous les panneaux n'est pas propice à l'exploitation agricole et il y a donc une perte de surface utile au sol au profit de l'exposition des panneaux. La structure discrète, quant à elle, se présente plutôt comme un écran qui portionne le terrain. Elle est propice à l'agriculture mais, de par sa présence, peut gêner le passage de machines.

Les structures surplombantes, comme présentées à la figure 1.6, possèdent le grand avantage de ne pas nuire à la superficie exploitable du terrain. En effet, elles s'élèvent au-dessus de la parcelle, permettant à la fois aux cultures de pousser et aux engins de passer. Elles peuvent offrir une couverture photovoltaïque dense ou aérée. On peut différencier deux axes conceptuels principaux : les structures rigides ou souples. Les structures dites "rigides" se présentent souvent sous la forme de portiques métalliques, en quelque sorte une charpente de support pour les panneaux solaires. Ces structures sont limitées par la longueur des éléments qui les composent et ne sont donc pas capables de proposer de longues portées. Dans le cas des structures dites "souples", les panneaux sont supportés par des câbles qui font le lien entre les supports verticaux, permettant ainsi d'atteindre de plus longues inter-distances [17].

Il convient d'ajouter que pour le cas des structures souples une attention particulière doit être portée aux vibrations induites par le vent dans la mesure où les câbles sont sensibles aux effets dynamiques[18]. Les figures 1.8a et 1.8b présentent deux exemples de structures, l'une souple, l'autre rigide.



(a) Structure dite "souple" [19].



(b) Structure dite "rigide" [1].

FIGURE 1.8 – Structures agrivoltaïques surplombantes.

Manquements au secteur photovoltaïque et agrivoltaïque

Le secteur du photovoltaïque est en pleine expansion et en mutation constante. L'énergie fossile est polluante et représente un danger. Dans ces conditions, les énergies renouvelables se voient être une solution crédible pour subvenir aux besoins de la communauté [20]. Suite à la mise en place des certificats verts faisant partie d'une stratégie financière et fiscale initiée par les instances européennes, le photovoltaïque dit "individuel" a pris un réel essor. Ainsi, l'installation de panneaux solaires sur les maisons de particuliers permettait une production électrique locale et intelligente, le surplus de production pouvant être renvoyé sur le réseau général [21]. Néanmoins, l'investissement initial pour de telles installations reste relativement coûteux et n'est pas applicable à tous les particuliers au vu de ses besoins d'orientation et des considérations esthétiques, de nature très subjectives. Toutes ces considérations justifient que tout un chacun n'adhère pas nécessairement à l'installation de tels équipements sur son habitation. À cela s'ajoute la disparition progressive des aides financières et la prise en charge des taxes "prosumer" par le propriétaire ; qui enlèvent aux projets d'équipements photovoltaïques individuels leur attrait initial. Les exploitations commerciales ou industrielles, propres aux chaînes de magasins ou aux usines, offrent de plus grandes surfaces à équiper mais souffrent des mêmes inconvénients que ceux décrits pour les équipements chez les particuliers.

En parallèle aux équipements solaires chez les particuliers, des centrales photovoltaïques de grande envergure se sont également développées. Il s'agit de champs de panneaux solaires placés en rangées, en hauteur ou non, et couvrant un grand espace au sol. Elles ont le grand avantage d'avoir une production énergétique conséquente de par leur taille et leur orientation adaptées au cas par cas. De plus, elles sont relativement discrètes dans le paysage en comparaison à leur concurrentes directes, les éoliennes, qui marquent fortement l'horizon. Cependant, comme mentionné précédemment, elles occupent de telles superficies au sol qu'elles ne s'avèrent pertinentes que dans les pays dotés de grands espaces peu peuplés ; ce qui n'est pas le cas de la Belgique.

Afin de pallier à l'exploitation unique et exclusive d'un espace à des fins énergétiques, les centrales agrivoltaïques en partitions et surplombantes sont apparues. Ces centrales permettent de maximiser le rendement d'un terrain sans monopoliser l'espace, ce dernier étant déjà utilisé pour une exploitation agricole. Les structures qui y sont associées sont pour l'instant uniquement en acier. Bien que l'acier soit un matériau de construction fiable, recyclable et très performant, son bilan carbone reste peu intéressant [22]. De plus, le capital à investir est non-négligeable au vu du cours actuel de l'acier. D'aucuns pourraient aussi remettre en question l'esthétique des structures en acier dans un environnement campagnard. En somme, ces structures métalliques sont une révolution autant dans le monde du photovoltaïque que celui agricole mais ne sont pas complètement pertinentes dans la dynamique écologique actuelle. Il y a donc une lacune dans l'offre agrivoltaïque courante, qui ne peut répondre suffisamment et simultanément aux exigences écologiques, énergétiques et agricoles.

La structure agrivoltaïque en bois est donc de grand intérêt si l'on prend en compte plusieurs critères. Son intégration dans le paysage est douce de par ses matériaux plus naturels et bruts. Son coût reste moindre. Bien que le bois soit onéreux, en le maintenant à sa forme la plus simple, à savoir la grume, il est possible de réaliser des centrales photovoltaïques à plus faible investissement initial. La grume de bois est définie comme le tronc d'un arbre qui a été coupé, ébranché et écorcé ou non. Pour exprimer son avantage économique, nous pouvons prendre l'exemple de la structure décrite au chapitre 3 pour laquelle une colonne en grume de bois est 30% moins chère que l'équivalente en acier. Le bilan carbone du bois permet également d'inscrire les projets agrivoltaïques qui l'utilisent dans les valeurs environnementales actuelles [22]. Bien sûr,

les performances mécaniques du bois permettent de rester compétitif par rapport aux structures en acier lorsqu'il est mis en oeuvre avec des câbles. Une telle association permet de faire travailler chaque matériau dans des conditions optimales, l'acier donnant accès à de longues portées et le bois travaillant comme support.

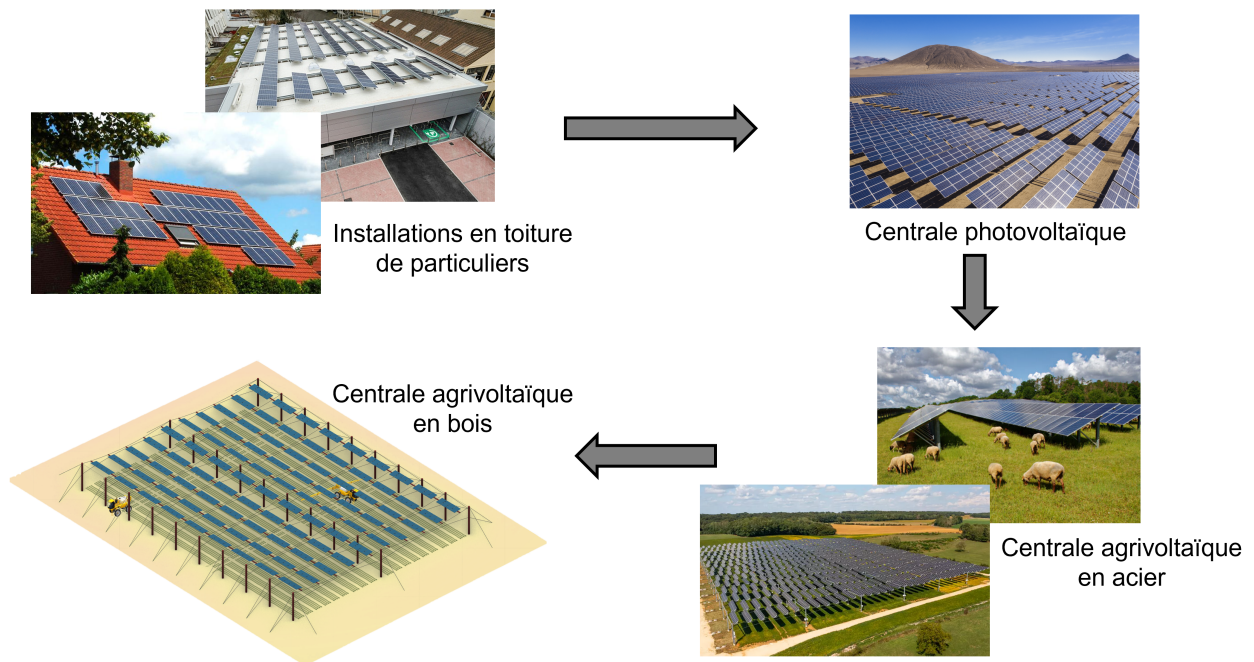


FIGURE 1.9 – Évolution du photovoltaïque⁴.

Pour aller plus loin, on pourrait questionner les ombrages créés par de telles structures et leurs conséquences sur la culture sous-jacente. Comme le montre la figure 1.10, la couverture photovoltaïque cause une alternance d'irradiance au sol, pouvant perturber la bonne croissance des plantes. Une proposition d'installer des diffuseurs de lumière afin de limiter ces clairs-obscurs a été faite par un consortium lors du dépôt du projet POLYVOLT⁵. Cette idée mérite d'être explorée mais ne sera pas prise en considération dans ce travail.

Les structures agrivoltaïques ont été présentées jusqu'ici comme dédiées au monde de l'agriculture mais leurs caractéristiques permettraient de les valoriser dans d'autres champs d'application. En effet, il serait envisageable de les utiliser au-dessus de parkings comme ombrières ou encore au-dessus d'une autoroute ou d'un fleuve. Le champ des possibilités est quasiment infini et ces structures peuvent être adaptées à diverses applications, les rendant très polyvalentes. Le concept de "Dual-Use" dépasse le domaine de l'agriculture et la possibilité d'exploiter doublement un même espace peut s'étendre à une multitude de domaines.

4. Sources, consultées le 22/05/2023 : Ooreka Maison - Panneaux solaires, Linéaires - Lidl teste un concept écolo, AirZen - Chili : une centrale solaire hors normes installée, Réussir, Nourrir Votre Performance - Energie solaire : l'énergéticien TSE, PleinChamps - Agrivoltaïsme : "le tout début" d'une filière mondiale.

5. Projet déposé en mars 2023 par le consortium UClouvain, Uliège, SigueSol et LuciSun. En attente d'approbation pour le financement Greenwin.

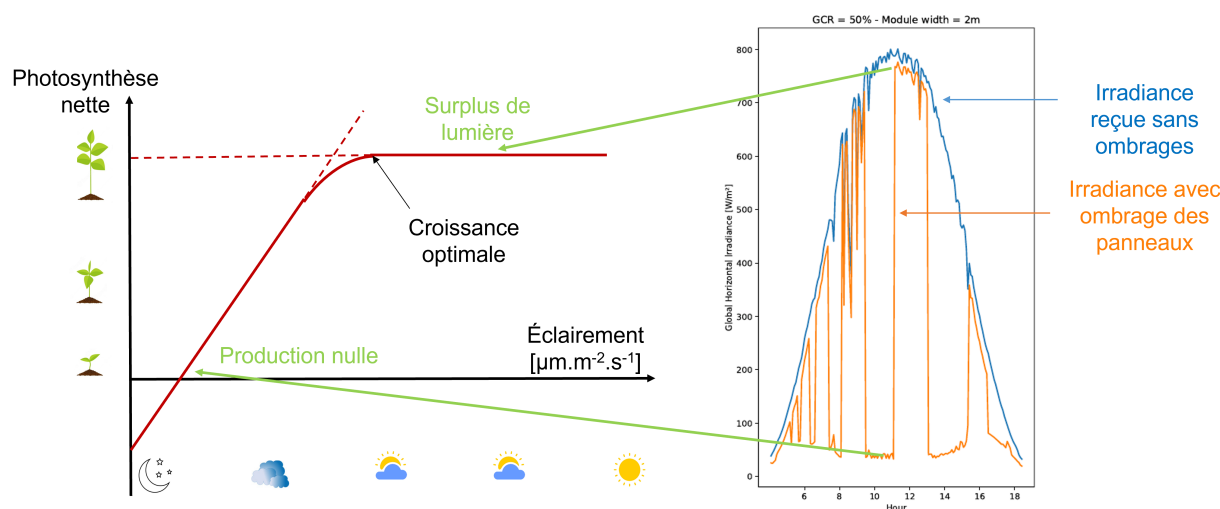


FIGURE 1.10 – Irradiance au sol sous une structure agrivoltaïque au cours d'une journée ⁶.

Initiative des projets de recherche POLYVOLT et BOIVOLTAÏQUE

Dans le but de développer le secteur agrivoltaïque dans nos régions, des instances belges proposent une série de projets de recherche tels que les projets POLYVOLT et BOIVOLTAÏQUE. Alors que ce dernier a obtenu un financement récemment, le projet POLYVOLT est en soumission auprès du pôle GreenWin, déposé par un consortium de collaborateurs.

Siguesol, l'un des leaders belges dans la construction des centrales photovoltaïques au sol, observe une évolution de la demande vers des centrales dont la fonction de production d'énergie est combinée avec une autre fonction, en particulier la production agricole. Ce phénomène est aussi observé par *Lucisun*, entreprise qui fournit des produits et services spécialisés pour la conception, la simulation et l'optimisation de systèmes solaires photovoltaïques. Cependant, les structures agrivoltaïques ne sont pas encore développées en Belgique, pour différentes raisons politiques, climatologiques et d'impératifs pratiques tels que notamment la circulation des engins agricoles. Une réflexion est donc nécessaire afin non seulement de les concevoir de manière efficace, rentable et écologique, mais aussi afin de convaincre les pouvoirs politiques.

Une demande de financement du projet de recherche POLYVOLT, planifié sur 4 ans, a été soumise en mars 2023 par le pôle GCE de l'*UCLouvain*, en partenariat avec *Siguesol*, *Lucisun* et l'*ULiège*. Ce projet a pour but de leur donner les moyens de concevoir et construire des projets agrivoltaïques. Dans ce projet, l'*UCLouvain* est chargée de développer la partie structurale en se servant de son expertise en structures en bois et câblées, en optimisation des structures et en modélisation paramétrique. L'*ULiège* complètera avec son expertise dans le développement de modèles de croissance des plantes et d'ACV ⁷.

Si le financement est octroyé pour POLYVOLT, *Siguesol* commercialisera le(s) produit(s) créé(s) auprès des développeurs de centrales, et *Lucisun* pourra compléter son logiciel *Lusim* par les modèles de croissance des plantes, d'ACV et d'optimisation structurale. L'*UCLouvain* agira également comme conseil dans le développement des structures en fonction des spécificités des projets futurs.

Ce mémoire s'inscrit donc comme prémisse à la contribution de l'*UCLouvain* aux projets BOIVOLTAÏQUE et POLYVOLT.

6. Source : projet POLYVOLT.

7. Analyse du Cycle de Vie.

1.2 Objectifs du mémoire

L'objectif de ce mémoire est de concevoir des structures porteuses écologiques pour des centrales photovoltaïques compatibles avec d'autres activités telles que des parkings, des friches industrielles, des cultures ou encore des élevages. L'accent sera mis sur ces deux dernières activités pour lesquelles il faut considérer la production agricole en plus de celle électrique. L'utilisation de bois peu transformés ainsi que la minimisation du volume de matière mis en place permet d'améliorer les performances écologiques de ces structures. De plus, de grandes portées peuvent être atteintes en utilisant des câbles, libérant l'espace au sol propice au développement d'autres activités.

La conception générale de ces structures porteuses sera divisée en trois phases, ayant chacune leur intérêt propre.

- **Conception des structures et dimensionnement** : discussion sur le design et étude de faisabilité
- **Optimisation structurale et financière** : application des indicateurs morphologiques aux structures afin de déterminer des dimensions optimales
- **Modélisation des structures** : création d'une interface paramétrique synthétique

1.2.1 Conception des structures et dimensionnement

Deux types de structures sont à étudier afin de couvrir deux applications différentes. On parle de structures en bois dites de partitions ou surplombantes, aussi appelées respectivement basses et hautes. Il s'agit là de deux branches majeures des structures agrivoltaïques, comme présentées à la figure 1.6 en page 7, qui sont déclinables en plusieurs versions afin de satisfaire aux multiples spécificités du projet concerné. Les solutions imaginées pour ces deux types de structures ne se veulent donc pas uniques et sont présentées comme notre vision de structures agrivoltaïques en bois efficaces et élégantes.

Cette phase consiste donc à présenter une synthèse des choix réalisés dans l'optique de proposer des structures légères et faciles à mettre en oeuvre. Un point d'honneur a été réservé autour de la simplicité des assemblages afin de garantir leur facilité d'entretien et de montage. En parallèle à cette recherche de simplicité, les choix sont orientés afin de présenter une solution économique.

Pour chaque structure, une description des solutions retenues ainsi qu'une discussion sur les choix réalisés sont présentées, justifiant ainsi ces derniers. Une étude de faisabilité complète est également faite afin de s'assurer de la crédibilité des ces structures. Les charges s'y appliquant ainsi que les efforts qui en découlent sont calculés. De ces derniers, il est possible de dimensionner les éléments des structures, nous permettant ainsi d'évaluer la possibilité de les construire ou non.

1.2.2 Optimisation structurale et financière

Comme mentionné supra, il est intéressant d'optimiser les structures agrivoltaïques proposées. Il est possible de le faire sous plusieurs approches : la distribution des efforts, les déformations observées, le volume de matériaux, leur distance d'importation... Il a été choisi de réaliser cette optimisation afin de minimiser la quantité de matière première utilisée. Cette approche a un double avantage. D'une part, réduire le volume de matériaux permet de faire des économies sur l'achat de ces derniers et, d'autre part, cela inclut une dimension éthique au projet. En effet, la société actuelle a tendance à sur-consommer. N'utiliser que le nécessaire à la réalisation d'un ouvrage est un pas vers une dynamique de production réfléchie pour le domaine agrivoltaïque,

plus en phase avec les risques de sur-exploitation de la Terre.

L'optimisation du volume des matériaux est réalisée en utilisant les indicateurs morphologiques, outil mathématique permettant de réduire l'expression du volume d'un élément à quelques paramètres clés. Pour ce faire, un classement des paramètres du projet est défini et l'étude de l'impact de chacun d'eux est faite afin de mettre en avant les plus pertinents. Cette étude d'optimisation permet donc de dégager d'un projet un ou des optimum(s) en ne se basant que sur quelques variables prépondérantes.

1.2.3 Modélisation des structures par une interface Rhino Grasshopper

Un design n'est pas facilement compréhensible sans visualisation. Une interface, de préférence "user-friendly"⁸, permettant la représentation des structures est donc nécessaire. Le but premier de l'implémentation informatique est de modéliser les structures sur leur topographie. Cela permet au concepteur de s'assurer de la cohérence globale de son design, et au client de visualiser son projet avant la phase d'exécution. Un projet en phase d'étude est sujet à modification car ses dimensions, ses matériaux, son implantation... sont susceptibles de varier. La création d'un modèle numérique peut être longue et ces changements de paramètres constants peuvent être fastidieux et compliqués. Il est donc intéressant de rendre le programme intuitif et clair ainsi que de faciliter les changements de paramètres d'entrées afin d'aider le concepteur à visualiser son projet sous toutes ses phases. Pour cela, le programme *Rhino Grasshopper* permet une modélisation paramétrique intéressante, créant une géométrie dont les données initiales sont facilement modifiables comme illustré en figure 1.11.

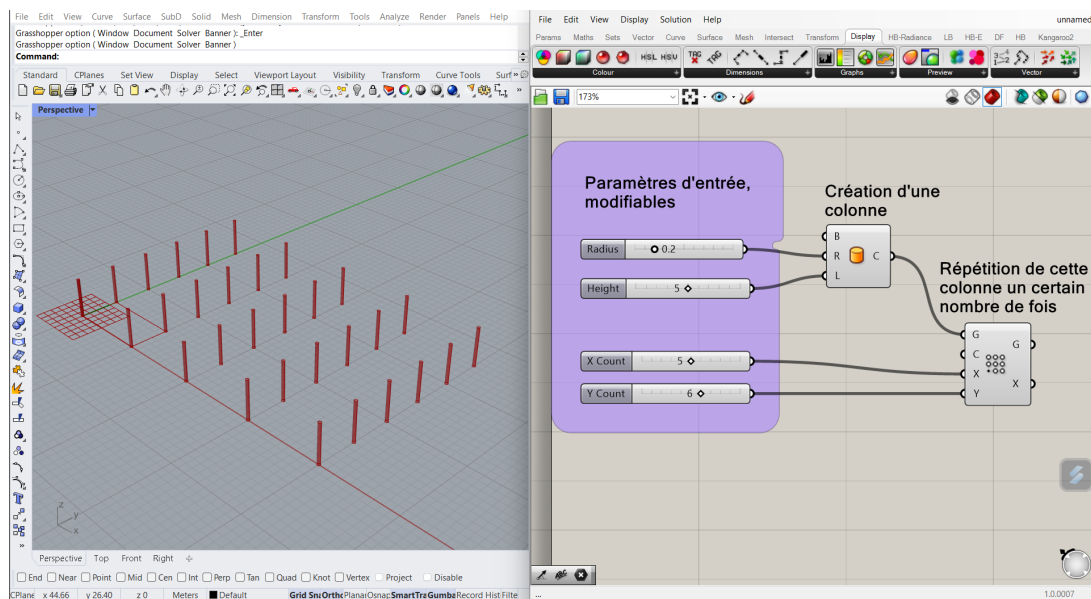


FIGURE 1.11 – Exemple d'utilisation du programme *Rhino* avec l'extension *Grasshopper*.

Afin de tirer profit de cette flexibilité, l'objectif est de greffer à l'interface *Rhino Grasshopper* le dimensionnement des sections et l'optimisation multi-paramétrique. Cela permet de calculer automatiquement les optima et d'illustrer la structure correspondante. Corollairement, il est possible d'évaluer l'écart à l'optimum qu'une structure pourrait avoir. Outre sa capacité de visualisation, cet outil permet au concepteur de suivre son projet et d'y introduire chaque

8. Aisé d'utilisation.

changement instantanément, lui montrant ainsi l'évolution de son design et les conséquences directes de ses choix. Il s'agit pratiquement d'un guide au dimensionnement, laissant l'utilisateur essayer différentes versions d'un même projet sans passer par une étude détaillée.

Le modèle fourni par l'interface peut également être utilisé comme support afin de réaliser des simulations d'ensoleillement et de croissance des plantes. Un métré⁹ peut être exporté du programme afin d'estimer le prix de l'installation photovoltaïque qui y est modélisée. En somme, il s'agit autant d'un logiciel de calcul que d'un outil BIM¹⁰.

9. Quantité de matériaux utilisés pour un projet.

10. Building Information Modeling.

Première partie

Conception des structures et dimensionnement

Chapitre 2

Les structures basses

Une proposition de structures agrivoltaïques dites "basses" est décrite dans ce chapitre. Ensuite, une proposition de structures agrivoltaïques dites "hautes" est présentée dans le chapitre 3 afin de couvrir une large gamme d'applications pour ces édifices. Néanmoins, seules les structures hautes feront l'objet d'une optimisation, développée dans le chapitre 5.

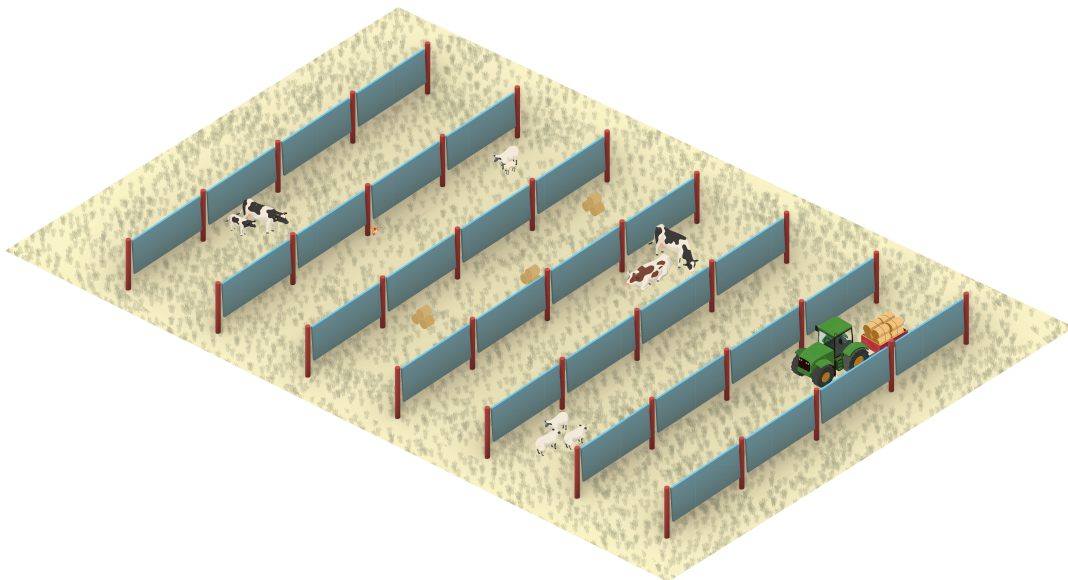


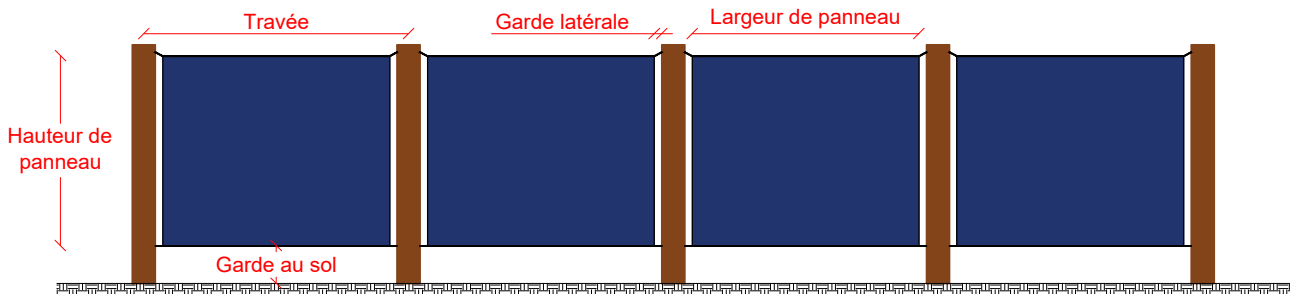
FIGURE 2.1 – Visualisation 3D d'une structure de partitions.

2.1 Description générale des structures basses

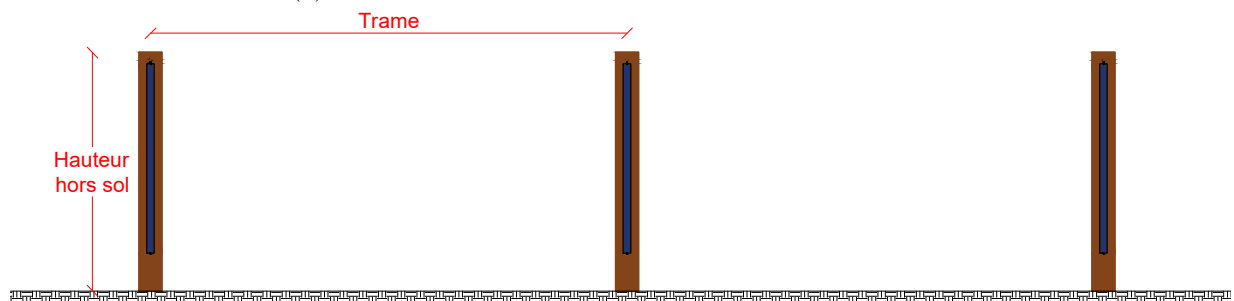
Les structures dites "basses" sont des structures à objectif agrivoltaïque. Il s'agit de structures supportant des panneaux solaires verticaux, qui seraient disposés dans des champs, prairies, terrains pollués, etc. Avec un souci constant de rentabilité et d'élégance, la solution proposée pour ces structures se veut simple et efficace tout en se conformant aux limites imposées par les matériaux utilisés.

Les structures de partitions sont constituées de poteaux en grumes de bois enfoncés dans le sol par pré-forage et battage. Ces grumes sont transpercées en tête et en pied par un câble tendu, servant de support aux panneaux photovoltaïques verticaux. Les poteaux sont disposés linéairement et les travées créées accueillent les panneaux. Plusieurs lignes peuvent être disposées

parallèlement afin de créer des trames et couvrir une parcelle. Les câbles supportant les panneaux ne sont pas libres de glisser dans leur percement et sont donc fixes latéralement. Les panneaux sont attachés en quatre points aux câbles et bloqués latéralement de part et d'autre. Une garde au sol est prévue pour permettre le passage d'éventuel bétail et la bonne durabilité des éléments photovoltaïques. Une garde latérale est également prévue entre le panneau et le poteau afin d'éviter tout dommage en cas de déplacement excessif du panneau.

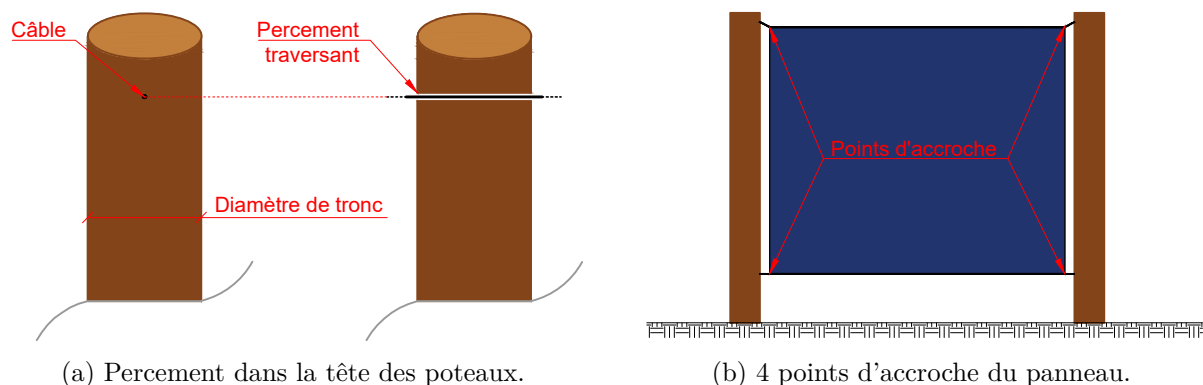


(a) Élévation en travée d'une structure basse.



(b) Élévation en trame d'une structure basse.

FIGURE 2.2 – Représentation d'une structure basse.



(a) Percement dans la tête des poteaux.

(b) 4 points d'accroche du panneau.

FIGURE 2.3 – Systèmes porteurs et points d'accroche des câbles.

2.2 Étude de faisabilité des structures de partitions

Cette section a pour but de démontrer la faisabilité technique des solutions structurales proposées. Cette étude prend la forme d'une note de calcul présentant d'une part les efforts généraux que subit la structure et d'autre part le dimensionnement des sections et assemblages proposés.

La structure proposée afin d'étudier la faisabilité du projet est illustrée à la figure 2.4.

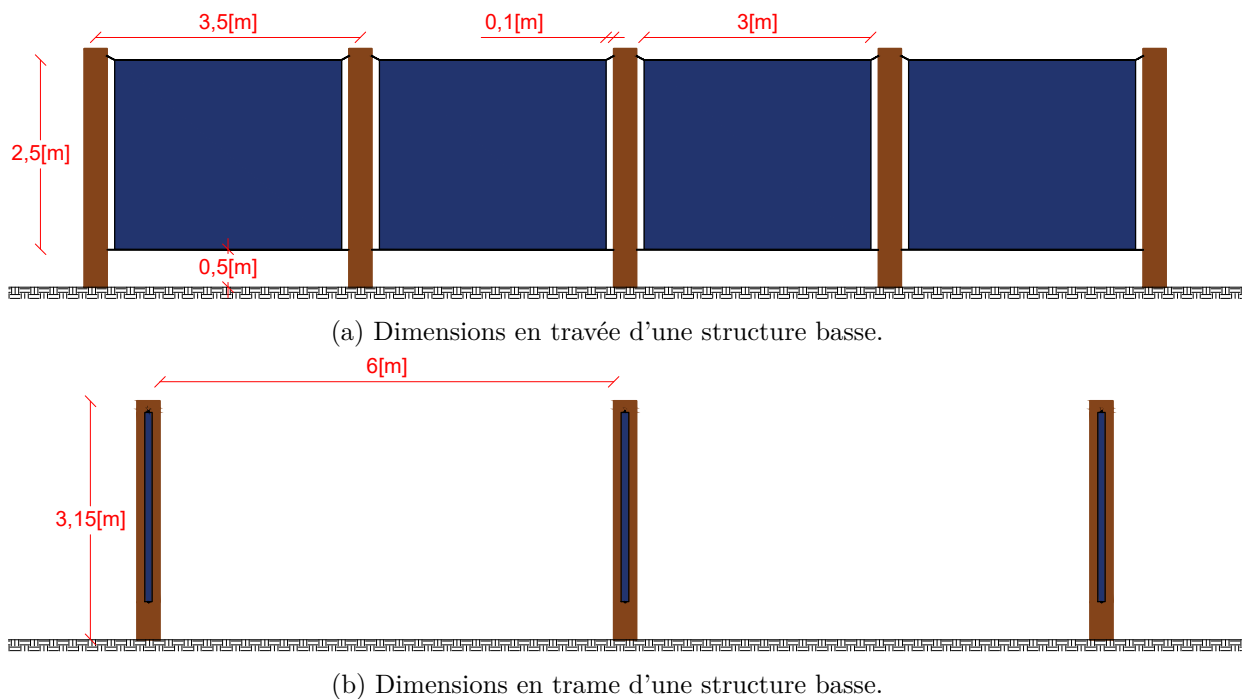


FIGURE 2.4 – Dimensions générales de la structure basse étudiée.

2.2.1 Cas de charge des structures basses

Deux types de charges sont considérées pour le dimensionnement des structures basses : l'action du vent sur les panneaux photovoltaïques et le poids propre de ces derniers. Ces structures peuvent s'apparenter à des panneaux publicitaires pour lesquels l'Eurocode décrit une procédure spécifique afin de leur appliquer des charges de vent.

2.2.1.1 Poids propre

La masse des panneaux solaires est supposée de $20[kg/m^2]$ [23]. Ce poids est supposé uniquement appliqué sur le câble supérieur.

Le poids propre des panneaux solaires est directement déduit de la surface des panneaux entre chaque poteau. L'aire de panneaux entre deux poteaux dans cet exemple est $A = 3[m] \times 2.5[m]$.

$$F_{pan} = \rho * g * A * CS = 1.99[kN]$$

- Avec :
- $\rho = 20[kg/m^2]$ la masse surfacique des panneaux
 - $g = 9.81[m/s^2]$ la gravité
 - $A = 7.5[m^2]$ la surface des panneaux entre deux poteaux
 - $CS = 1.35[/]$ le coefficient de sécurité sur les charges permanentes recommandé par l'Eurocode 1 pour le calcul à l'état limite ultime

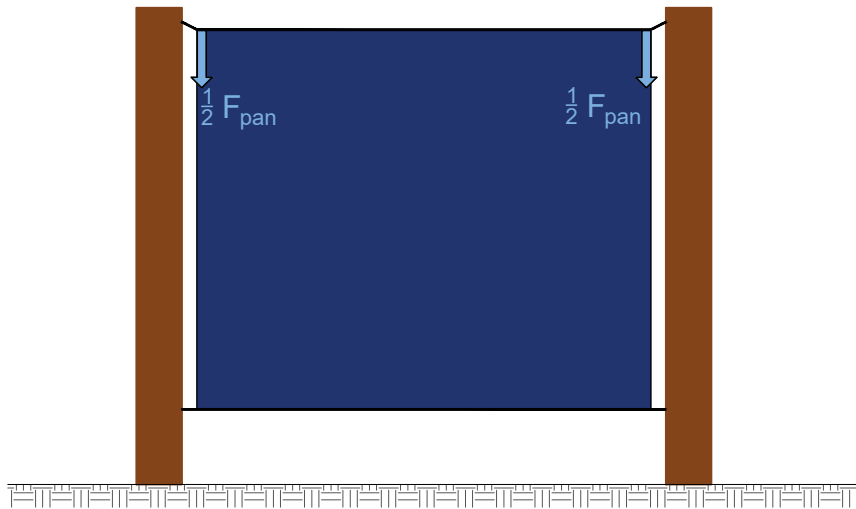


FIGURE 2.5 – Point d'application du poids propre des panneaux.

2.2.1.2 L'action du vent

La charge de vent a été déterminée en suivant les méthodes décrites dans l'Eurocode 1 : Actions sur les structures - Part 1-4 : Actions générales - Actions du vent [24].

Le site internet "Eurocode Zoning" [25] nous fournit la pression dynamique de pointe du vent en fonction de la localisation. Dans notre cas, il s'agit des sites agricoles belges. Autrement dit, de telles centrales photovoltaïques prennent majoritairement place dans des zones dégagées, exposées au vent. Le détail du calcul du site internet se trouve à l'annexe F et donne une pression dynamique de pointe maximale de $q_p(z) = 748[N/m^2]$. Cette pression est commune à toutes les structures étudiées et est arrondie de manière sécuritaire à $q_p(z) = 1[kN/m^2]$. Étant donné que la localisation précise des futurs projets agrivoltaïques que ce mémoire touchera n'est pas connue, fixer la pression dynamique de pointe de vent à $1[kN/m^2]$ est cohérent.

Le paragraphe (3) de la section 7.4.3 de l'Eurocode 1 stipule que : "Les panneaux de signalisation séparés du sol par une hauteur z_g inférieure à $h/4$ et dont $b/h > 1$ doivent être traités comme des murs de bords, voir 7.4.1.". Dans ce cas, z_g représente la garde au sol et n'excédera jamais la valeur $h/4$ puisque la principe même de la structure est que les panneaux soient à basse hauteur et aient une faible garde. En se référant au tableau 7.9 de l'Eurocode, on obtient que le coefficient $c_{p,net}$ peut être assimilé à 1.2 pour chacun des panneaux. La charge de vent à considérer est donc : $q_p(z)c_{p,net} = q_{vent} = 1.2[kN/m^2]$.

La charge de vent surfacique s'applique sur l'aire totale de chaque panneau et est reportée aux points d'accroche entre le panneau et les câbles. C'est par ces jonctions que l'effort transitera entre les panneaux et les poteaux.

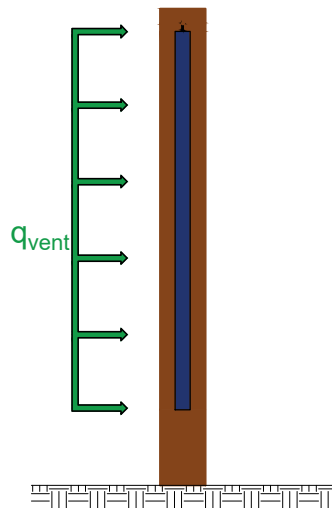


FIGURE 2.6 – Charge de vent sur les panneaux verticaux.

La force du vent sur un panneau est donc exprimée comme :

$$F_{vent} = q_p * A * CS = 13.5[kN]$$

Avec : $q_p = 1.2[kN/m^2]$ la pression dynamique de pointe du vent

$A = 7.5[m^2]$ la surface de panneau

$CS = 1.5[/math>] le coefficient de sécurité sur les charges recommandé par l'Eurocode 1$

Contrairement aux charges de poids propre, le vent agit frontalement sur les panneaux et donc, les deux câbles (supérieur et inférieur) sont supposés supporter les efforts de vent. Ces derniers sont transmis par les 4 points d'accroche et sont normaux au plan des panneaux.

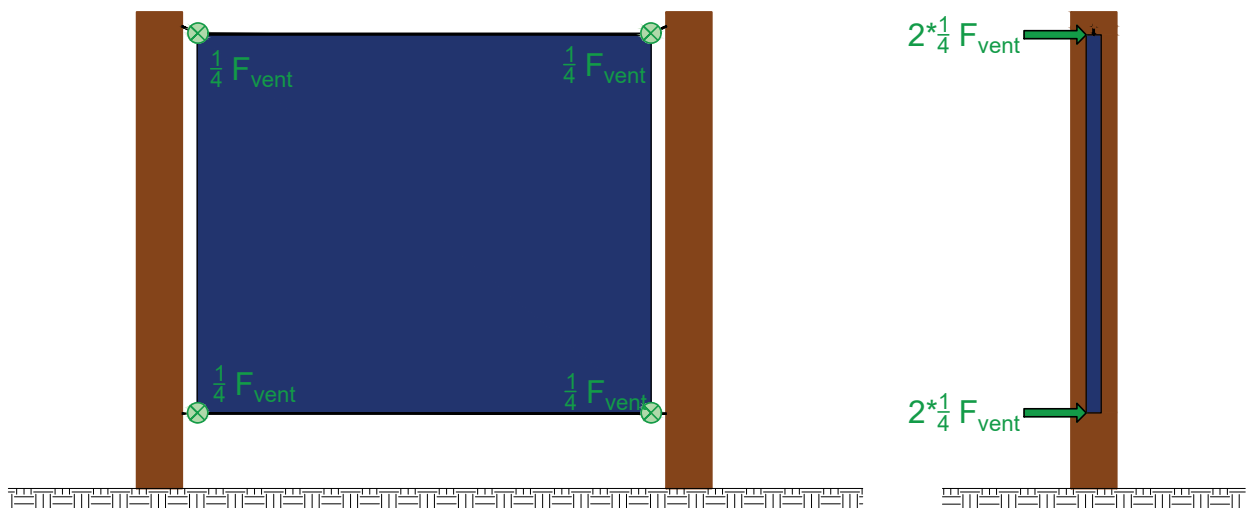


FIGURE 2.7 – Points d'application de la charge de vent.

2.2.2 Efforts internes

Les poteaux sont sollicités dans les trois directions et selon deux axes de rotation comme illustré en figure 2.11. Deux cas sont à différencier : les poteaux de travée ou de bout. On appelle poteau

de travée les poteaux qui supportent des panneaux de part et d'autre tandis qu'un poteau de bout est un poteau qui se trouve sur une extrémité et n'est donc chargé que d'un côté.

2.2.2.1 Poteau de travée

Comme mentionné précédemment, un poteau de travée est chargé des deux côtés. Il subit des efforts de vent en tête et en pied de poteau et des efforts de poids propre uniquement en tête. Les efforts exercés sur un poteau sont représentés à la figure 2.8, ces derniers faisant référence aux efforts déduits dans la section des cas de charge 2.2.1.

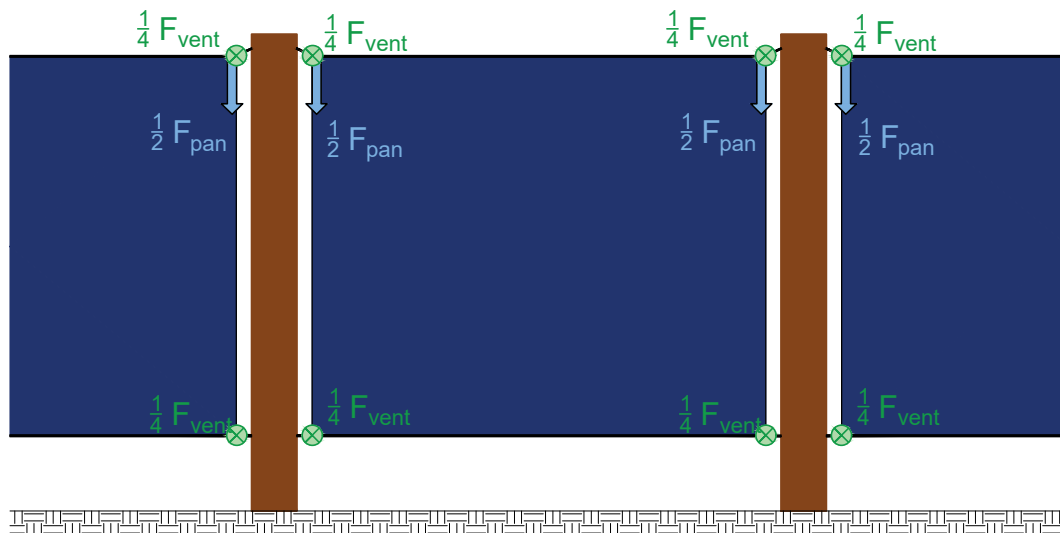


FIGURE 2.8 – Efforts de vent et de poids propre sur un poteau de travée.

Les charges de vent et de poids propre n'agissant pas dans les mêmes directions, il est supposé que le panneau se positionne différemment selon le chargement. Les deux cas extrêmes seront analysés pour déterminer les efforts et réactions d'appuis. Sans l'action du vent, le câble supérieur supportant le panneau présente une flèche verticale de 5[cm]. Lorsque le vent fait effet, il déplace horizontalement le panneau et peut créer une flèche horizontale que nous considérerons de 5[cm] au maximum. Ces déplacements sont représentés aux figures 2.9 et 2.10.

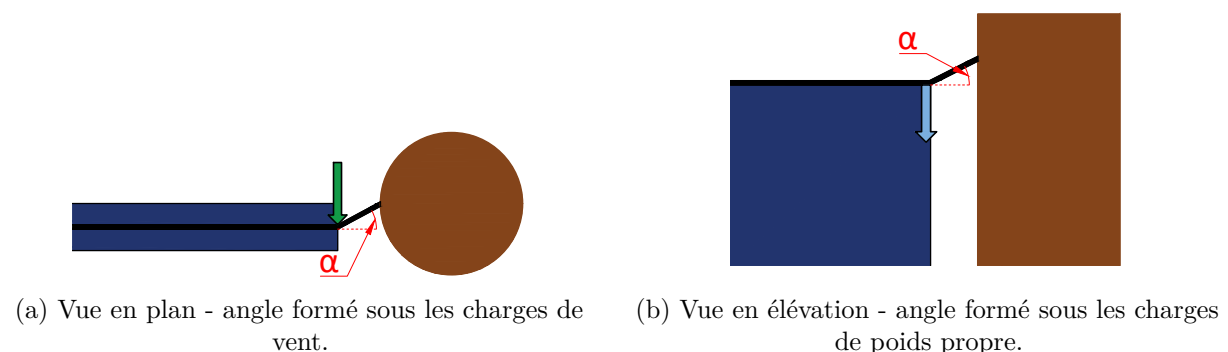


FIGURE 2.9 – Angles formés lorsque le câble est en chargement.

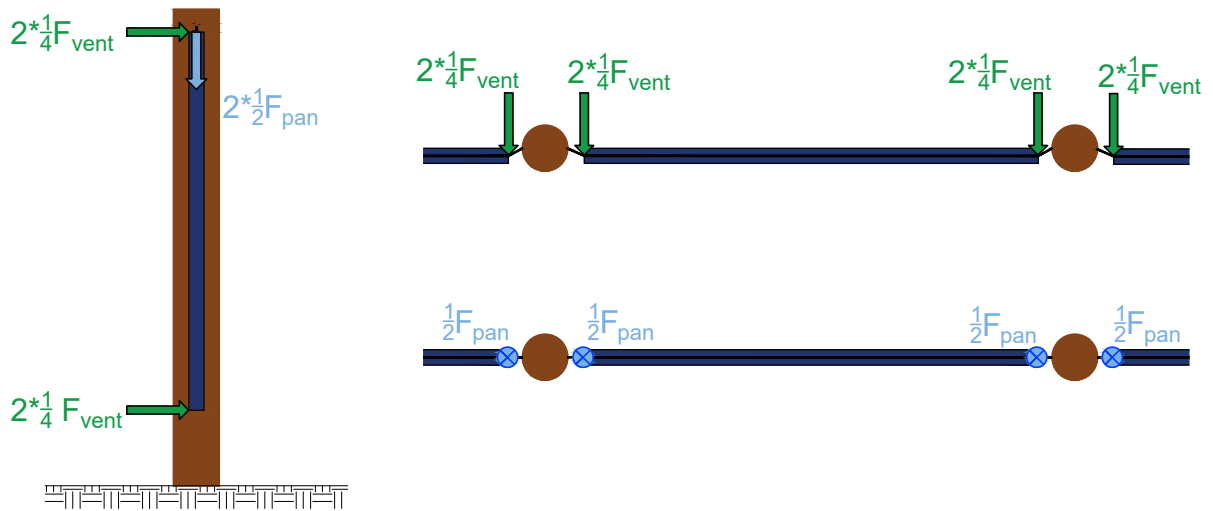


FIGURE 2.10 – Forces de vent et de poids propre sur les panneaux.

L'angle α formé par ces efforts vaut dans les deux cas de la figure 2.9 : $\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{0.05}{0.1}\right) = 26.57^\circ$, ayant une flèche arbitraire de 5 centimètres et un écart entre le panneau et le poteau, lui aussi arbitraire, de 10 centimètres.

Cet angle nous permet de déduire les réactions d'appui du poteau. La direction x est considérée hors-plan au panneau et y dans son plan. Ces axes sont représentés à la figure 2.11.

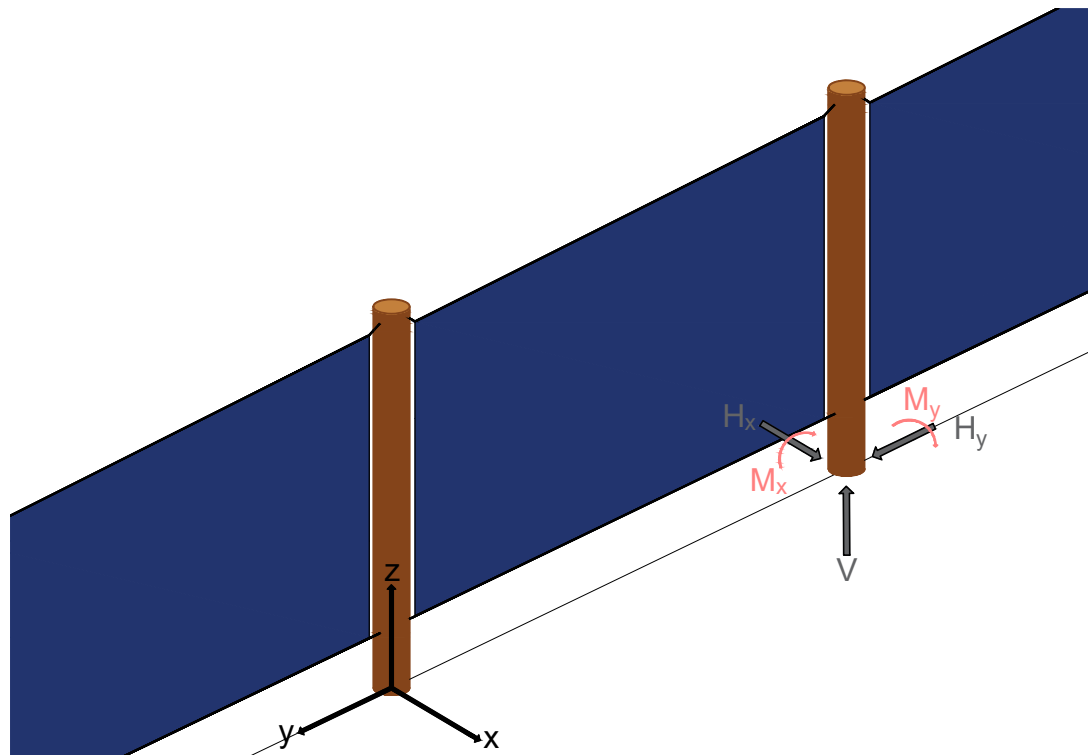


FIGURE 2.11 – Réactions d'appui d'un poteau de travée.

Les réactions d'appui pour un poteau de travée sont données ci-dessous :

$$V = 1.99[kN] \quad (2.1)$$

$$H_x = 13.5[kN] \quad (2.2)$$

$$H_y = 0[kN] \quad (2.3)$$

$$M_x = 0[kN] \quad (2.4)$$

$$M_y = 23.63[kN] \quad (2.5)$$

2.2.2.2 Poteau de bout

Toutes les figures présentées dans la section 2.2.2.1 du poteau de travée sont valables. La seule différence est que, étant chargé unilatéralement, le poteau subira des efforts supplémentaires dans la direction y ainsi que des moments fléchissants selon l'axe x . En effet, ces efforts s'annulent pour le poteau de travée dû à la symétrie de son chargement. Les réactions d'appui pour le poteau de bout sont les suivantes :

$$V = 0.99[kN] \quad (2.6)$$

$$H_x = 6.75[kN] \quad (2.7)$$

$$H_y = 15.49[kN] \quad (2.8)$$

$$M_x = 29.68[kN] \quad (2.9)$$

$$M_y = 11.81[kN] \quad (2.10)$$

2.2.2.3 Efforts dans le câble

L'effort dans le câble est déduit grâce à l'angle α calculé précédemment ainsi qu'aux efforts de vent et de poids propre. Contrairement au calcul des réactions d'appuis, on considère que seul le câble supérieur reprend des efforts de vent. En effet, l'objectif de calculer les efforts dans le câble est d'en déduire sa section et il est donc conservatif de supposer que seul le câble supérieur travaille.

$$N_{cable,PP} = \frac{F_{pan}/2}{\sin(\alpha)} = 2.22[kN] \quad (2.11)$$

$$N_{cable,vent} = \frac{F_{vent}/2}{\sin(\alpha)} = 15.09[kN] \quad (2.12)$$

2.2.3 Dimensionnement

Tous les calculs de dimensionnement ont été faits avec deux classes de résistances de bois afin de comparer deux solutions distinctes. Elles représentent deux choix d'essence de bois à qualités économiques et de durabilités différentes.

2.2.3.1 Poteaux

Un calcul au flambement est nécessaire étant donné que les poteaux sont sollicités en flexion composée.

$$\frac{N_{Ed} * \gamma_m}{k_{mod} * k_c * A * f_{c,0,k}} + \frac{M_{Ed} * \gamma_m}{k_{mod} * W_{el} * f_{mk}} \leq 1 \quad (2.13)$$

Avec :

- N_{Ed} l'effort axial maximum sollicitant
- M_{Ed} le moment de flexion maximal sollicitant
- A l'aire de la section de bois
- W_{el} le module de flexion élastique de la section
- f_{c0k} la résistance à la compression parallèle aux fibres du bois
- f_{mk} la résistance en flexion du bois
- γ_m le coefficient de sécurité sur le matériau bois
- k_{mod} le coefficient prenant en compte la classe d'utilisation du bois
- k_c le coefficient prenant en compte la sensibilité au flambement du bois

Tous les coefficient présentés ci-dessus sont prescrits par l'Eurocode 3, traitant du calcul des structures en bois.

		Poteau de travée	Poteau de bout
$N_{Ed}[kN]$		1.99	0.99
$M_{Ed}[kNm]$		23.63	29.68
$f_{c,0,k}[MPa]$	Robinier D40	27	27
	Pin sylvestre traité C24	21	21
$f_{mk}[MPa]$	Robinier D40	40	40
	Pin sylvestre traité C24	24	24
$k_{mod}[/math>]$		0.7	0.7
$\gamma_m[/math>]$		1.3	1.3

TABLE 2.1 – Valeurs utilisées pour le dimensionnement des poteaux.

Ces valeurs nous permettent de déduire le diamètre de bois nécessaire et la sensibilité au flambement correspondante, afin de se rapprocher d'un taux de travail¹ de 1 :

		Poteau de travée	Poteau de bout
$D[m]$	Robinier D40	0.22	0.24
	Pin sylvestre traité C24	0.27	0.29
$k_c[/math>]$	Robinier D40	0.29	0.34
	Pin sylvestre traité C24	0.38	0.43
Taux de travail	Robinier D40	1.06	1.02
	Pin sylvestre traité C24	0.96	0.96

TABLE 2.2 – Diamètres nécessaires pour les poteaux et taux de travail de chaque poteaux.

1. Rapport de l'effort sollicitant sur l'effort résistant.

2.2.3.2 Câbles

Les équations 2.11 et 2.12 donnent les efforts repris par le câble supérieur. En utilisant le catalogue fourni par *La Cablerie Namuroise* [26], on peut déduire la section de câble nécessaire. En choisissant un câble en inox 19×7 , il faut un minimum de 6 millimètres de diamètre pour une charge à la rupture de $18.54[kN]$. Pour des raisons pratiques et de sécurité, le diamètre sera de $8[mm]$ avec un chargement à la rupture de $33[kN]$.

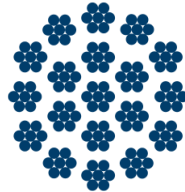


FIGURE 2.12 – Câble inox 19×7 de *La Cablerie Namuroise*.

2.2.3.3 Profondeur d'enfoncement

Afin de déterminer l'enfoncement nécessaire dans le sol, la méthode de Broms a été utilisée. Il s'agit d'une méthode développée en 1965 permettant de calculer le chargement latéral en tête de pieu². Cette méthode permet également de déterminer le déplacement latéral à cet endroit. La procédure ci-après est décrite en détail dans le livre de Braja Das : *Principle of Foundation Engineering* [27]. Cette méthode est efficace afin d'obtenir la profondeur d'enfoncement nécessaire et se prête bien au calcul manuel. Malheureusement, étant basée sur de la lecture graphique, elle est difficilement implémentable et n'est donc pas exploitée pour le dimensionnement automatisé dans l'interface *Rhino Grasshopper*.

De nombreuses hypothèses sont nécessaires dans cette étude de faisabilité. D'abord, le pieu est considéré comme "court" et le sol cohésif. Ensuite, les caractéristiques du sol choisies sont les suivantes :

- **Nature du sol** : sol argileux commun en Belgique
- **Module d'élasticité** : $E_s = 30[MPa]$
- **Le coefficient de poisson du sol** : $\nu_s = 0.3[/math>$
- **Résistance à la compression non-drainée** : $q_u = 500[kN/m^2]$
- **La cohésion non-drainée du sol** : $c_u = 0.375q_u = 112.5[kN/m^2]$
- **Rigidité du sol** : $K = \frac{E_s}{1-\nu_s^2} = 32967.03[kN/m^2]$

Les caractéristiques concernant le pieu ont déjà été traitées. Le diamètre d'un pieu $D40$ est supposé de $0.24[m]$. La charge sur la partie en surface du pieu peut être assimilée à une charge ponctuelle avec une certaine excentricité par rapport à la tête de pieu. Cette excentricité est de $e = \frac{3.05-0.5}{2} + 0.5 = 1.775[m]$. Le déplacement latéral Δ maximum en pied de poteau est défini arbitrairement à $L/100$. En fixant la longueur d'enfoncement $L = 2.5[m]$ on trouve que $x_z(x=0) = L/150 = 1.67[cm]$. Ce déplacement latéral est représenté sur la figure ci-dessous :

2. Le pieu est la partie du poteau enfoncée dans le sol. La tête de pieu correspond donc à la portion de grume à hauteur du sol.

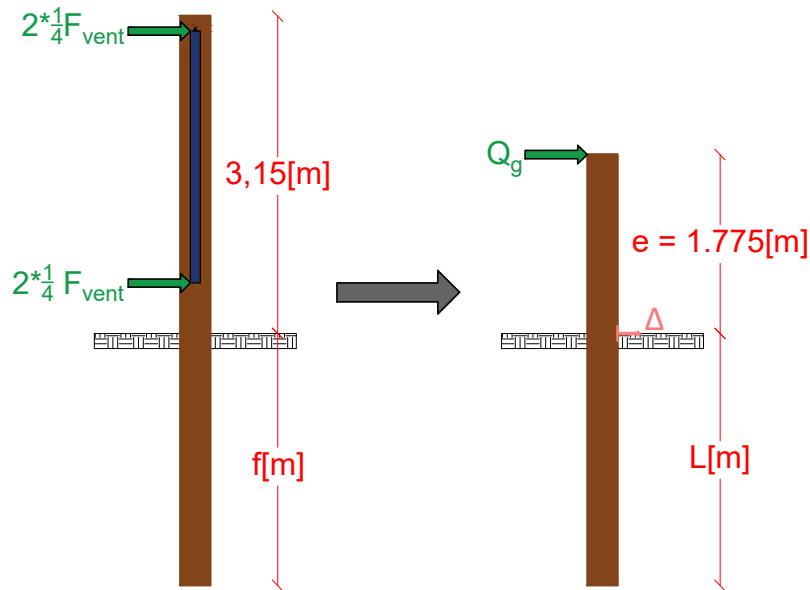


FIGURE 2.13 – Représentation du déplacement de la tête de pieu et de l'excentricité de la charge.

La lecture du graphe de la figure 2.14 nous permet de déduire le chargement latéral maximum afin de respecter la flèche fixée :

$$Q_{g,max} = \frac{\text{Dimensionless lateral deflection}}{x_z(z=0)KDL} = 18.55[kN] \quad (2.14)$$

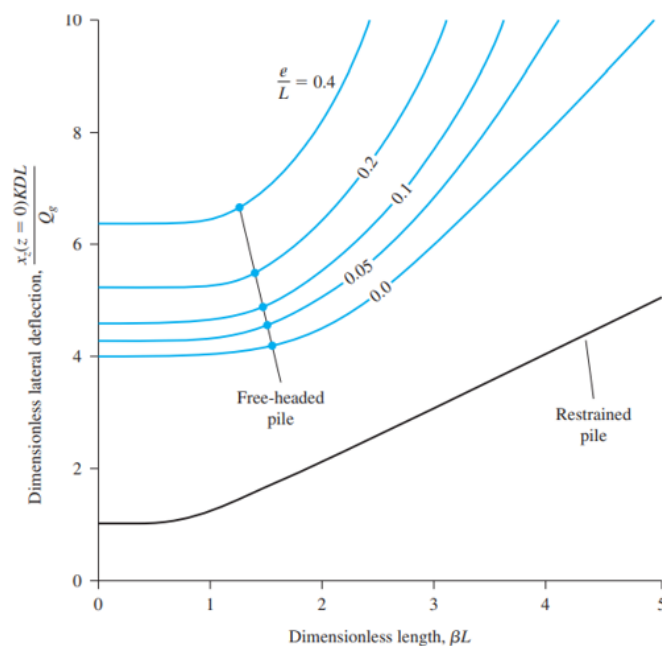


FIGURE 2.14 – Graphique de Broms pour le déplacement latéral, tiré du livre de Braja Das [27].

Ce chargement maximal $Q_{g,max}$ est bien supérieur au chargement réel subi, à savoir $H_{y,bout} = 15.5[kN]$. On peut donc en déduire que $2.5[m]$ d'enfoncement est suffisant pour répondre aux critères de déplacement et de résistance.

2.2.3.4 Assemblage en tête de poteau

L'assemblage en tête de poteau des structures basses, visible à la figure 2.15, consiste en un percement traversant la grume de bois. Ce percement est gainé avec un cylindre métallique creux afin de répartir au mieux les efforts transmis par le câble et éviter les points de pression élevée aux extrémités du percement. Le seul aspect à vérifier est la résistance à la pression diamétrale du bois. Cette dernière s'exprime de la manière suivante :

$$F_{v,Rk} = 0.5 f_{h,0,k} * d * t = 135.27[kN] \gg 1.99[kN] \quad (2.15)$$

Avec : $f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho = 45.09[MPa]$	la portance locale du bois
$d = 0.02[m]$	le diamètre du percement
$\rho = 550[kg/m^3]$	la densité du bois D40
$t = 0.3[m]$	l'épaisseur de bois traversé

L'assemblage de tête peut donc supporter les efforts qui y transitent.

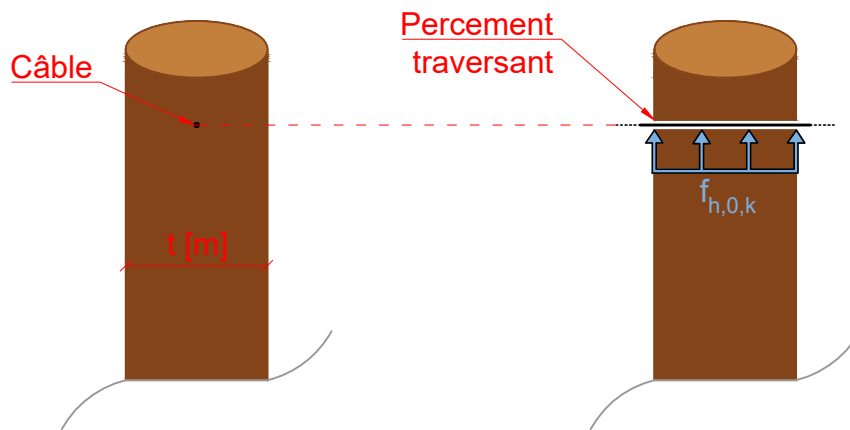


FIGURE 2.15 – Assemblage de tête des structures basses.

Conclusion de chapitre

Les structures de partitions décrites dans ce chapitre se révèlent pertinentes pour le domaine de l'agrivoltaïsme de par leur dimensionnement raisonnable. Une des déclinaisons possibles du cas étudié propose des poteaux D40 en grumes de bois de 5.5[m] de long, dont 2.5[m] est la fiche d'enfoncement, et de 0.24[m] de diamètre. Ils sont reliés par des câbles 19 × 7 de 8[mm] de diamètre qui supportent des panneaux de 3[m] de large par 2.5[m] de haut.

Chapitre 3

Les structures hautes

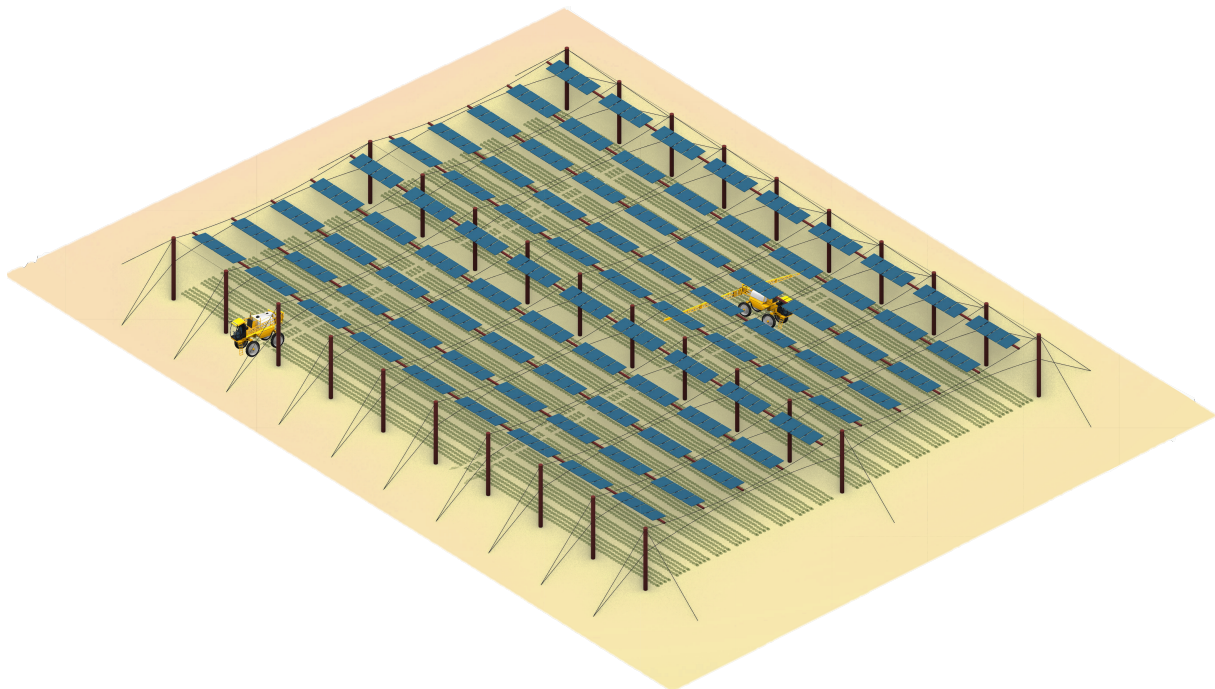


FIGURE 3.1 – Visualisation 3D d'une structure surplombante.

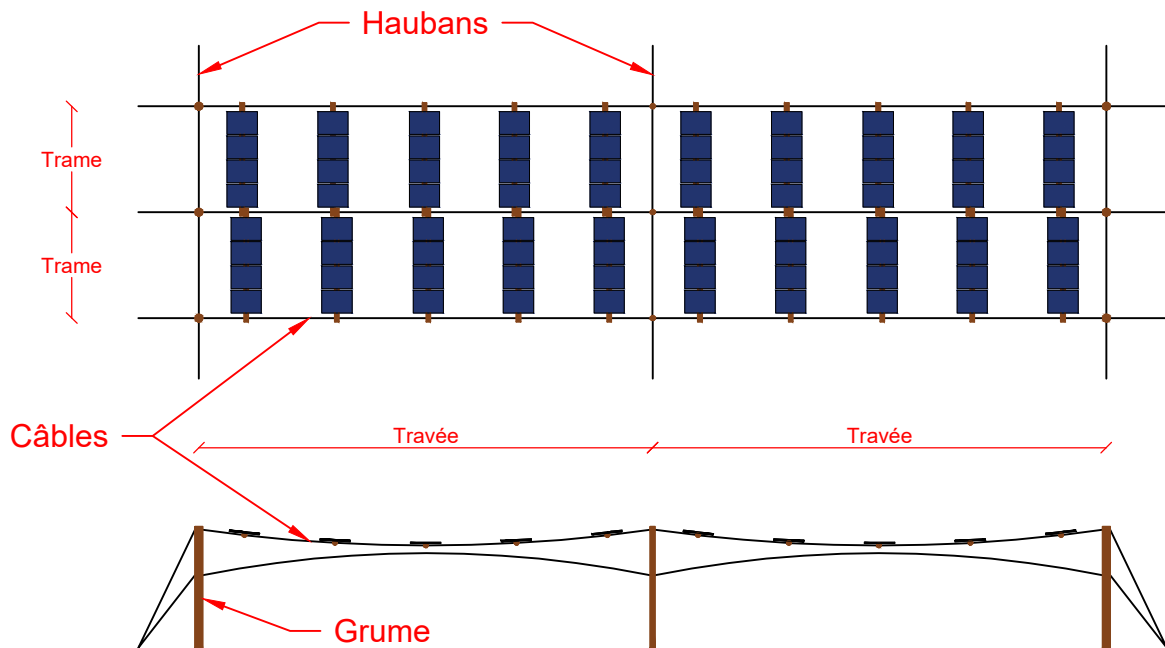
3.1 Description générale des structures hautes

Les structures dites "hautes" ont d'autres applications que les structures basses. Elles offrent une couverture photovoltaïque en hauteur avec de grandes portées, permettant la libre circulation d'engins agricoles par dessous. En raison de la dimension de ces machines, il est nécessaire de limiter l'encombrement au sol. Au cours des réflexions autour des composantes de ces structures, l'accent a été mis sur la simplicité des assemblages, la réduction de leurs coûts et le maintien de leur aspect écologique.

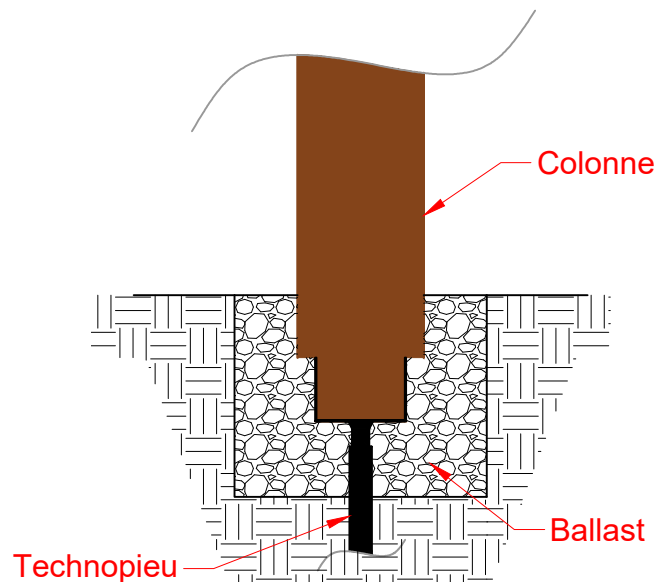
Une structure se compose de colonnes en grume de bois reliées en leur tête par des câbles dans les deux directions, celles des travées et des trames visibles à la figure 3.2a. Les câbles de trame ne sont pas supposés reprendre d'efforts majeurs mais bien seulement "parasitaires". Les câbles de travée sont reliés entre eux par des poutres servant de support aux panneaux photovoltaïques. Cet arrangement est visible à la figure 3.3b et permet d'être à la fois économique et performant

de par le faible coût des colonnes en bois et la capacité des câbles à reprendre de grands efforts de traction. Néanmoins, le bois est un matériau capricieux et nécessite des attentions particulières relatives à sa durabilité et à son orthotropie¹.

Les colonnes reposent dans un puit de ballast et sont ancrées en leur pied par un micropieu vissé. Les colonnes de bord de la parcelle sont ancrées au sol par des haubans qui assurent la stabilité générale de l'ouvrage, la tension dans les câbles et empêchent le tout de se comporter comme un château de cartes.



(a) Vue générale des structures hautes.



(b) Fondations d'une colonne.

FIGURE 3.2 – Représentation des structures surplombantes.

1. Les caractéristiques mécaniques du bois dépendent de la direction de ses fibres.

On pourrait être tentés d'utiliser des câbles comme support des panneaux solaires. Néanmoins, leur nature flexible leur induit une courbe même lorsqu'ils sont tendus entre deux points, ce qui transmet des efforts verticaux et horizontaux aux points d'accroche. En effet, si les panneaux photovoltaïques étaient posés sur des câbles, les efforts horizontaux obligerait à ancrer les extrémités des câbles de support avec des tendeurs. Ceux-ci seraient répartis le long des câbles de travées et iraient jusqu'au sol, annulant ainsi l'intérêt des grandes portées en empêchant la circulation d'engins agricoles. La comparaison entre une centrale avec des poutres de support ou des câbles de support est visible à la figure 3.3.

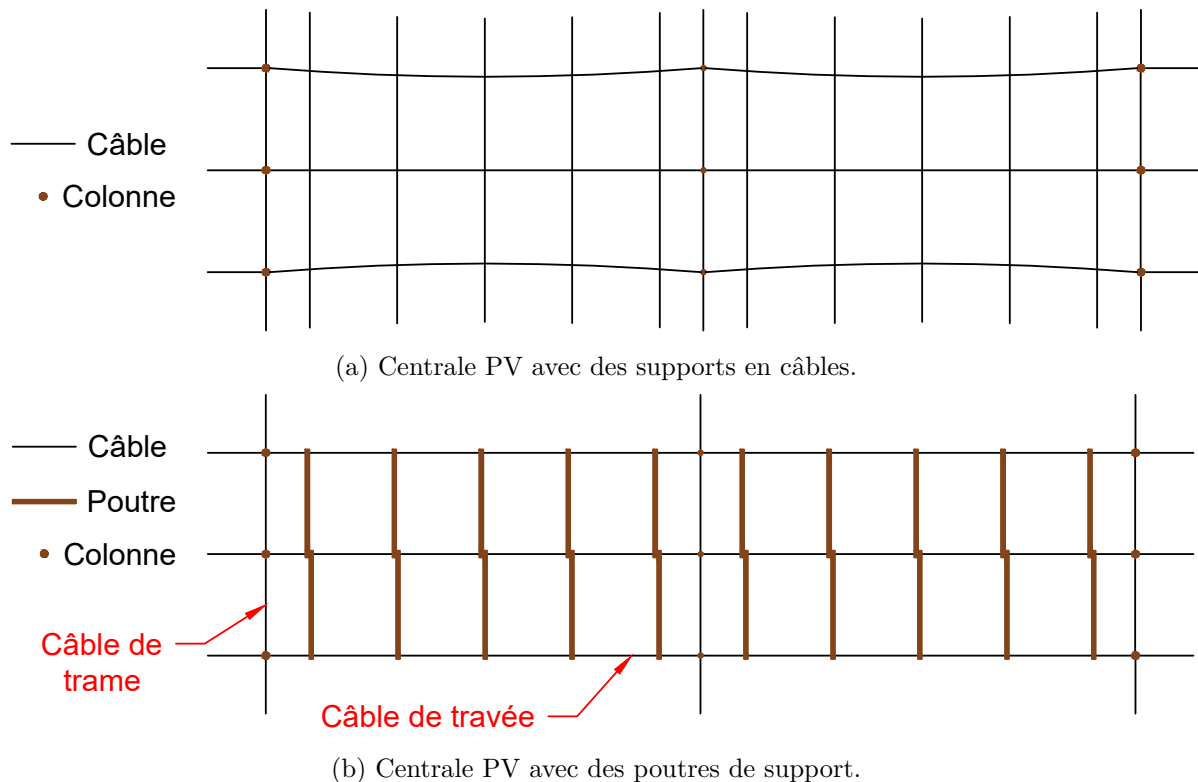


FIGURE 3.3 – Différents systèmes de support pour les panneaux photovoltaïques.

Le support des panneaux PV² peut être assuré par des grumes de bois ou des profilés métalliques. Ces poutres doivent seulement garantir une largeur de trame suffisante afin qu'un engin agricole puisse circuler aisément entre les poteaux. Cette double solution bois-métal est discutée dans la section 3.1.1. Le nombre de poutres par travée est dicté par une couverture PV à ne pas dépasser, nécessaire afin que les cultures sous-jacentes reçoivent un rayonnement suffisant.

3.1.1 Double solution pour les poutres de support

Les panneaux photovoltaïques sont supportés par des poutres dites "de support", ayant un sens de portée transversal de câble à câble. Il est intéressant de proposer deux solutions structurales pour ces poutres, permettant d'élargir le domaine de compétence des structures agrivoltaïques hautes ainsi que de comparer deux options.

D'une part, des poutres en grumes sont les plus cohérentes. Dans un souci d'uniformité de la structure, l'utilisation de ces grumes permet de faire écho aux grumes des colonnes et de

2. Photovoltaïque

donner au projet un caractère écologique et local plus marqué. En effet, il est possible de trouver des essences de bois compatibles avec ce type de projet en Europe. Bien entendu, la disponibilité des essences de bois est très variable et la notion de proximité pour s'en fournir est spéculative.

Néanmoins, un tronc d'arbre a ses limites et ne pourra pas forcément atteindre certaines longueurs. Quand bien même ce tronc atteindrait des sommets, rien ne garantit qu'il soit suffisamment droit ou ait des caractéristiques acceptables pour une application au génie civil. Ces fortes incertitudes sur le matériau, bien qu'il soit très ancré dans la dynamique des structures décrites dans ce travail, pourraient nous faire douter de son utilisation. C'est pourquoi d'autre part une solution alternative est proposée : l'utilisation de profilés métalliques en guise de poutres de support.

Un profilé métallique présente certains avantages que les grumes en bois n'ont pas, malgré des inconvénients indéniables qu'il convient de relever. La notion d'incertitude sur le matériau est complètement effacée avec l'acier. En effet, ce matériau nécessite peu de coefficients de sécurité lors du dimensionnement dû à sa grande fiabilité. Il est également très efficace grâce à ses bonnes caractéristiques mécaniques, que ce soit relatif à sa raideur ou résistance.

Néanmoins, le métal et notamment l'acier, ne sont pas sans reproches. Son défaut principal est son prix. À titre de comparaison, pour une même application, un profilé à section carrée creuse est vendu à $15640[\text{€}/\text{m}^3]$ par *Acier Grosjean* [28], tandis qu'une grume de pin sylvestre d'environ $30[\text{cm}]$ de diamètre sur pied est évaluée par la *Fédération Nationale des Experts Forestiers* [29] à $30[\text{€}/\text{m}^3]$ auquel s'ajoutent les frais d'abattage, de transport, d'écorçage et d'éventuel traitement. Cette grume reviendrait donc à $150[\text{€}/\text{m}^3]$. Mis en oeuvre, malgré les avantages mécaniques de l'acier, un tube métallique de $6[\text{m}]$ reste plus de 5 fois plus cher qu'une grume de classe *C24* réalisant les mêmes performances de portée. On peut nuancer qu'au-delà de $6[\text{m}]$ de portée, il est difficile de trouver des grumes de bois acceptables, ou en tout cas à moindre coût. Au contraire, un tube en acier n'a pas de limite de longueur, si ce n'est de par ses capacités mécaniques non infinies.

Le deuxième défaut de l'acier est son impact écologique, le bois présentant une intégrité environnementale nettement supérieure. Selon le site français *Réseau Action Climat* [30], la production d'une tonne d'acier rejette 1,8 tonne de CO_{2eq} dans l'atmosphère. Quant au bois, Catherine Guy-Quint, membre du parlement européen, affirme dans sa publication appelée *Luttez contre le changement climatique : Utilisez le bois* [31], que "Chaque mètre cube de bois utilisé comme produit de remplacement d'autres matériaux de construction réduit les émissions de CO_2 dans l'atmosphère de 1.1 tonne en moyenne. Si cela est ajouté au 0.9 tonne de CO_2 stocké dans le bois, chaque mètre cube de bois absorbe au total 2 tonnes de CO_2 ". L'avantage écologique du bois est donc indéniable.

3.1.2 Discussions sur la modélisation

3.1.2.1 Répartition de la couverture photovoltaïque : concentrée ou répartie

Durant la conception, un des choix faits concerne la répartition des panneaux sur une travée. Deux options claires existent et sont illustrées en figure 3.4 : concentrer les panneaux sur un des deux côtés de la travée, ou les espacer régulièrement sur l'ensemble de celle-ci. Bien que les concentrer d'un côté permette une inclinaison plus régulière et oriente les panneaux dans la même direction, cette solution est structurellement moins équilibrée et cause de grandes zones d'ombre sur les cultures. En effet, les panneaux épouseront la courbe du câble supérieur et, tant que seule la moitié du câble est couverte, on pourrait tirer profit de cette inclinaison unique pour orienter les panneaux vers le sud. Bien qu'intéressant du point de vue de l'ensoleillement,

cette proposition ne présente pratiquement aucun avantage structural. Ce déséquilibre induirait des efforts horizontaux indésirables dans les colonnes, nuisant à leur résistance au flambement³.

Répartir les panneaux sur le câble a donc plus de sens mais soulève plus de questions quant à leur mise en place dont notamment leur angle d'orientation. Aligner les panneaux avec le câble supérieur permet des assemblages simples et limite les ombres projetées⁴, mais n'offre pas une exposition optimale. Une autre solution est d'incliner tous les panneaux afin d'avoir un meilleur ensoleillement. Néanmoins, cela engendre l'ajout d'éventuelles pièces mobiles ou moteurs afin de suivre la trajectoire du soleil. Malgré l'attrait d'une meilleure exposition, cette solution donne au projet une complexité de design supplémentaire notamment au niveau des assemblages des poutres de support, ce qui se répercute sur le prix de la centrale. Pour ces raisons, les panneaux sont considérés alignés aux câbles supérieurs pour la suite de ce mémoire.

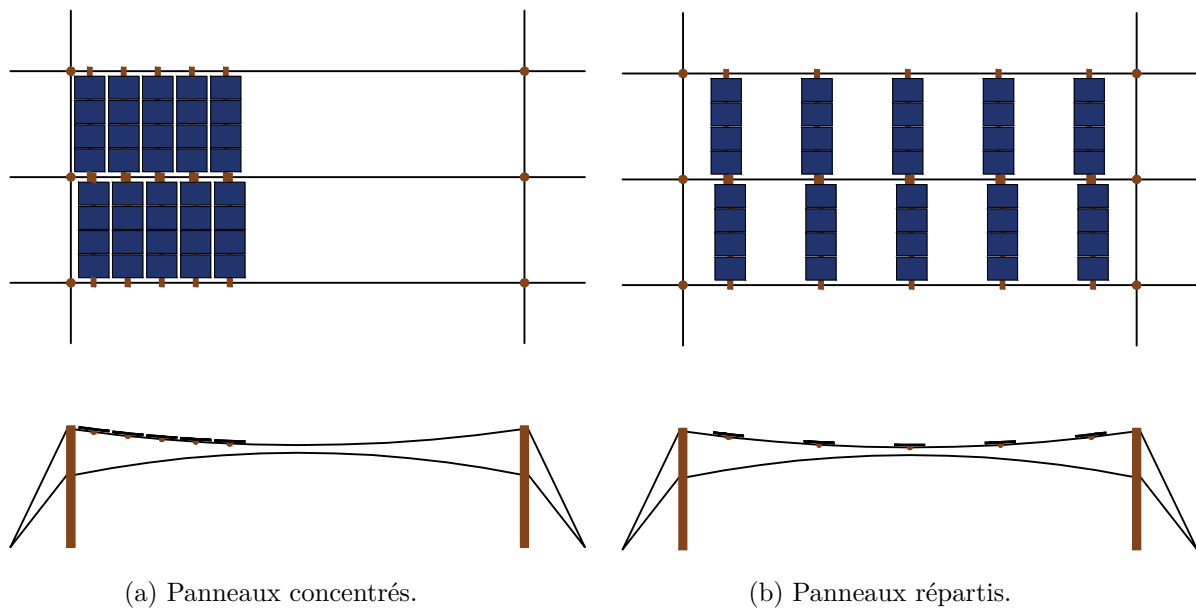


FIGURE 3.4 – Répartitions possibles des panneaux sur une travée.

Dans le reste de l'étude, les panneaux sont considérés comme répartis sur une travée.

3.1.2.2 Modélisation du chargement

Les panneaux étant répartis sur le câble et espacés régulièrement, une question supplémentaire se pose : comment modéliser cette charge ? Les représenter comme des charges ponctuelles est rigoureux mais utiliser une charge répartie simplifie la modélisation. Il est donc intéressant de se demander s'il s'agit d'une hypothèse acceptable. Selon le livre de Pierre Latteur, *Calculer une structure* [32], le fait que le câble soit de grand élanement permet de faire certaines hypothèses. Un grand élanement définit un câble dont le rapport $\frac{L}{H}$ est plus grand ou égal à 10.

3. Phénomène d'instabilité du second d'ordre qui se manifeste dans des pièces soumises à un effort normal de compression.

4. Ombres que les panneaux se font entre eux.

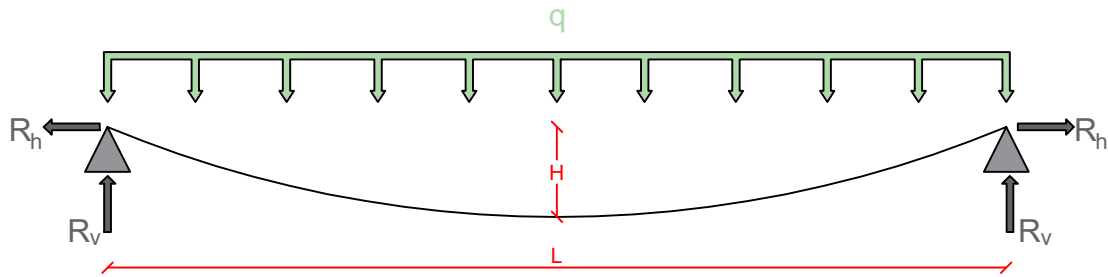


FIGURE 3.5 – Flèche et portée d’un câble parabolique chargé linéairement.

Lorsque le rapport $\frac{L}{H}$ est plus grand que 10, une charge linéique par longueur le long du câble peut être approximée par une charge linéique par longueur horizontale [32]. Le câble prend donc une forme parabolique, cette dernière étant la forme funiculaire⁵ d’un tel chargement. Ce cas est visible à la figure 3.5. La tension maximale dans un câble chargé de telle manière s’exprime comme suit :

$$N_{max,répartie} = \sqrt{R_v^2 + R_h^2} = \frac{qL^2}{8H} \sqrt{1 + \left(\frac{4H}{L}\right)^2} \quad (3.1)$$

Le cas pour lequel le chargement est représenté par des charges ponctuelles espacées régulièrement sur le câble est représenté à la figure 3.6. Le chargement total est supposé équivalent, la quantité q étant la même d’un chargement à l’autre.

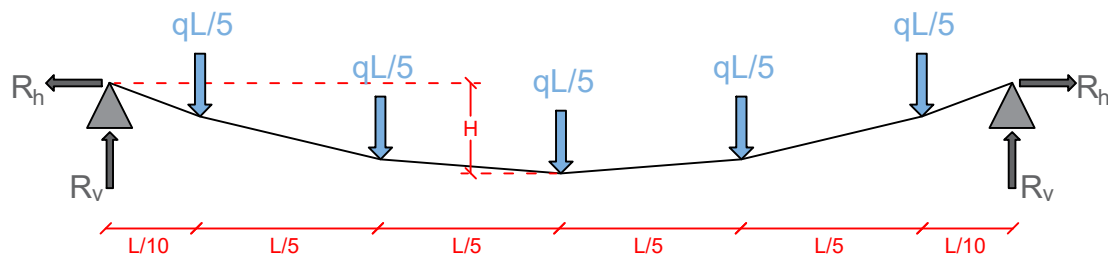


FIGURE 3.6 – Câble chargé ponctuellement.

L’effort de tension maximale dans le câble pour un tel chargement s’écrit comme suit :

$$N_{max,ponctuel} = \sqrt{R_v^2 + R_h^2} \quad (3.2)$$

Avec R_v et R_h les réactions d’appui, déterminées par un équilibre des forces sur le câble. Les paramètres suivant sont considérés : $L = 30[m]$, $H = 1.5[m]$ et $q = 5[kN/m]$.

Le tableau 3.1 reprend les efforts de tension maximaux pour la charge répartie sur le câble ainsi que pour les charges ponctuelles.

	Chargement réparti	Chargement ponctuel
$N_{max}[kN]$	382.43	397.15

TABLE 3.1 – Comparaison de la tension maximale dans un câble chargé linéairement et ponctuellement.

5. Forme associée à un chargement qui n’introduit à la structure que des efforts normaux.

Comme on peut le voir, les deux résultats sont similaires, à 3.7% près. Cela nous permet de conclure que modéliser la charge d'une manière ou d'une autre n'impacte sensiblement pas le dimensionnement du câble ou des poteaux de la structure. La représentation par charges ponctuelles est retenue pour le dimensionnement et l'étude de faisabilité, mais cette observation retiendra notre attention dans le cadre des calculs d'optimisation de la structure.

3.2 Étude de faisabilité des structures surplombantes

Cette section a pour but de démontrer la faisabilité technique des solutions structurales proposées. Elle prend la forme d'une note de calcul présentant d'une part les efforts généraux que subit une déclinaison possible de la structure et d'autre part le dimensionnement des sections et assemblages proposés. Une couverture photovoltaïque de 33% a été utilisée.

Les dimensions générales choisies pour cette étude de faisabilité sont visibles à la figure 3.7.

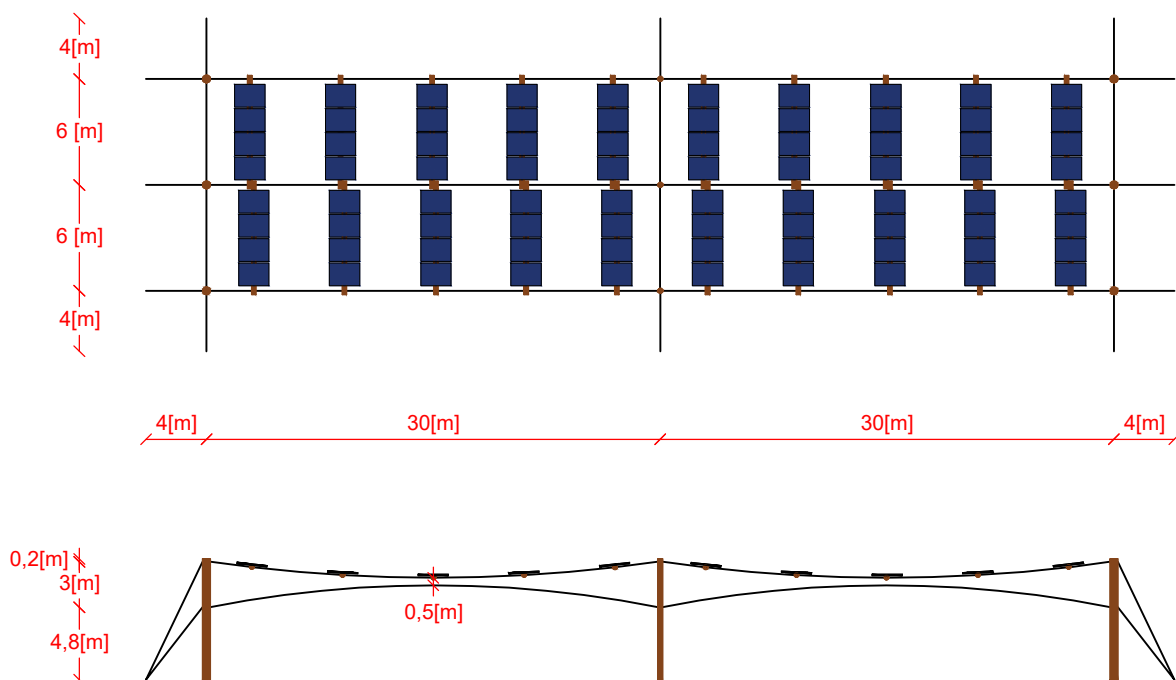


FIGURE 3.7 – Dimensions générales de la structure haute étudiée.

Les panneaux solaires choisis font $2[m]$ de haut et sont répartis uniformément en 5 rangées de 6 mètres entre deux poteaux.

3.2.1 Cas de charge des structures hautes

Trois types de charges sont à considérer pour le dimensionnement des structures hautes : l'action du vent sur les panneaux photovoltaïques, l'action de la neige et le poids propre des panneaux.

3.2.1.1 Poids propre

À l'instar des structures basses, le poids propre des panneaux supportés est assimilé à $20[kg/m^2]$ de couverture [23]. Dans le cas des structures hautes, une rangée de panneaux entre deux trames est supportée en un point sur le câble, nous permettant de représenter cette force de manière

ponctuelle, comme justifié à la section "Modélisation du chargement" 3.1.2.2. L'un des avantages de ce choix est qu'il est légèrement sécuritaire étant donné qu'il génère plus d'efforts dans la structure. Si le nombre de points d'accroche des panneaux augmente, cette hypothèse serait toujours valide car on se rapprocherait d'une charge répartie, qui sollicite moins le câble.

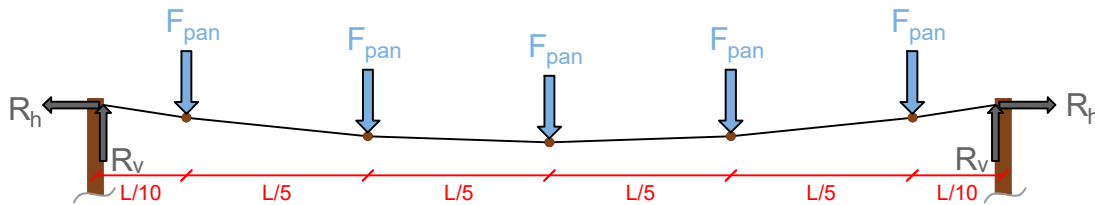


FIGURE 3.8 – Poids propre des panneaux sur le câble supérieur.

Le poids propre des panneaux s'exprime tel que :

$$F_{Pan} = \rho_{Pan} * g * A * CS = 3.178[kN] \quad (3.3)$$

Avec : $\rho_{Pan} = 20[kg/m^2]$	la masse surfacique des panneaux
$g = 9.81[m/s^2]$	la gravité
$A = 12[m^2]$	la surface de panneaux supportée en un point de câble
$CS = 1.35[/]$	le coefficient de sécurité sur les charges permanentes recommandé par l'Eurocode 1

Le poids propre du câble en lui-même peut être négligé. Ce fait a été démontré dans le livre de Pierre Lateur, *Calculer une Structure* [32], qui cite à son chapitre 13 : "De façon générale, lorsqu'un câble est dimensionné pour reprendre des charges extérieures et qu'il travaille à une contrainte proche de sa limite d'élasticité, le poids propre est négligeable".

3.2.1.2 L'action du vent

Plusieurs cas de chargement au vent sont à analyser. Les deux cas extrêmes sont ceux où le vent exerce une action verticale sur les panneaux à savoir, de haut en bas et inversement. La valeur de pression dynamique de pointe du vent est la même que celle étudiée pour les structures basses à la section 2.2.1.2, soit $q_p(z) = 1[kN/m^2]$

Les structures hautes peuvent être associées au cas des préaux dans l'Eurocode 1 [24]. Il faut définir un degré de blocage ϕ correspondant à l'obstruction sous la toiture ; dans notre cas, il n'y a aucun blocage sous les panneaux et donc, le coefficient est : $\phi = 0$. S'il y a des cultures sous cette toiture, elles sont supposées de hauteur négligeable au vu de celle des panneaux.

En utilisant le tableau *Table 7.6 - Valeurs $c_{p,net}$ et c_f pour préaux à un versant* de l'Eurocode 1 [24], le coefficient de force c_f , permettant de majorer ou minorer la pression dynamique de pointe $q_p(z)$, est déterminé. Dans ce cas-ci, l'angle des panneaux par rapport à l'horizontale est variable et la valeur de $c_f = 1$ est retenue.

La charge de vent considérée est $q_p(z) * c_f = q_{vent} = 1[kN/m^2]$. Ce vent s'applique perpendiculairement aux panneaux solaires. Les deux situations sont représentées aux figures 3.9 et 3.10.

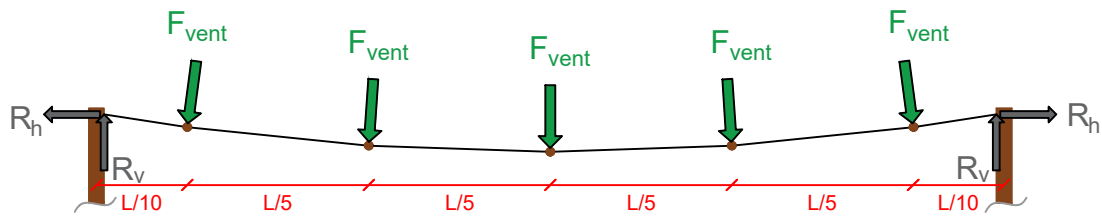


FIGURE 3.9 – Charge de vent sur le câble supérieur.

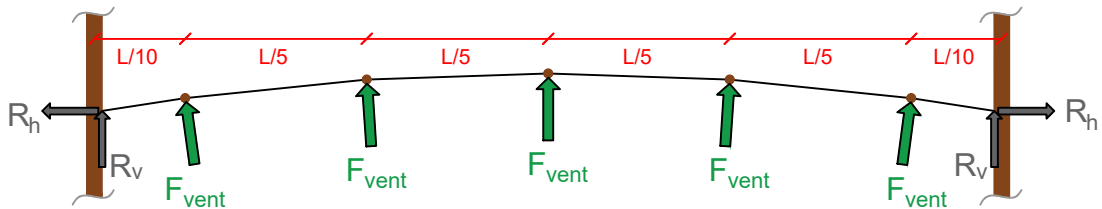


FIGURE 3.10 – Charge de vent sur le câble inférieur.

La charge de vent sur les panneaux s'exprime telle que :

$$F_{Vent} = q_{vent} * A * CS = 18[kN] \quad (3.4)$$

Avec : $q_{vent} = 1[kN/m^2]$ la pression de pointe du vent
 $A = 12[m^2]$ la surface de panneaux supportée en un point de câble
 $CS = 1.5[/]$ le coefficient de sécurité sur les charges variables
 recommandé par l'Eurocode 1

3.2.1.3 L'action de la neige

L'annexe nationale belge de l'Eurocode 1 [24] définit l'action de la neige comme étant égale à $0.5[kN/m^2]$ verticalement. La faible pente des panneaux solaires par rapport à l'horizontale nous permet d'approximer la charge de neige par une charge répartie par longueur de panneau.

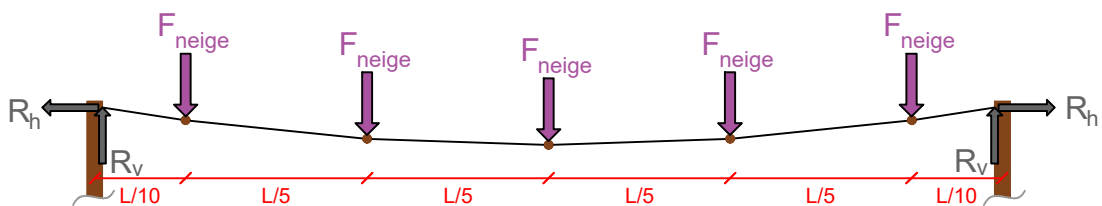


FIGURE 3.11 – Charge de neige sur le câble supérieur.

La charge de neige sur les panneaux s'exprime telle que :

$$F_{Neige} = q_{neige} * A * CS = 9[kN] \quad (3.5)$$

Avec : $q_{neige} = 0.5[kN/m^2]$ le poids surfacique de la neige
 $A = 12[m^2]$ la surface de panneaux supportée en un point de câble
 $CS = 1.5[/]$ le coefficient de sécurité sur les charges variables
 recommandé par l'Eurocode 1

3.2.2 Efforts internes

Les méthodes de calcul utilisées sont tirées du livre *Calculer une structure : de la théorie à l'exemple* [32].

Il s'agit ici de vérifier la faisabilité technique de cet ouvrage. Pour ce faire, nous allons utiliser des dimensions moyennes de trame, à savoir une portée de 30 mètres entre deux poteaux et un espacement entre le câble supérieur et inférieur au poteau de 3 mètres, comme montré sur la figure 3.7. La trame⁶ est de 6 mètres. Ces dimensions sont données à titre d'exemple, l'interface *Rhino Grasshopper* proposant une solution optimisée pour chaque cas spécifique. Les points d'attache des câbles sont supposés rotulés.

Nous allons étudier les efforts dans chaque partie de la structure : le câble supérieur, le câble inférieur, et les poteaux dits "de travées" ou "de bout". Un poteau de bout est à l'extrémité d'une travée et est haubané. Les poteaux de travées sont tous les autres, réceptionnant chacun deux câbles de travée opposés. Le tableau 3.2 au bas de cette section récapitule les efforts calculés.

3.2.2.1 Câble supérieur en travée

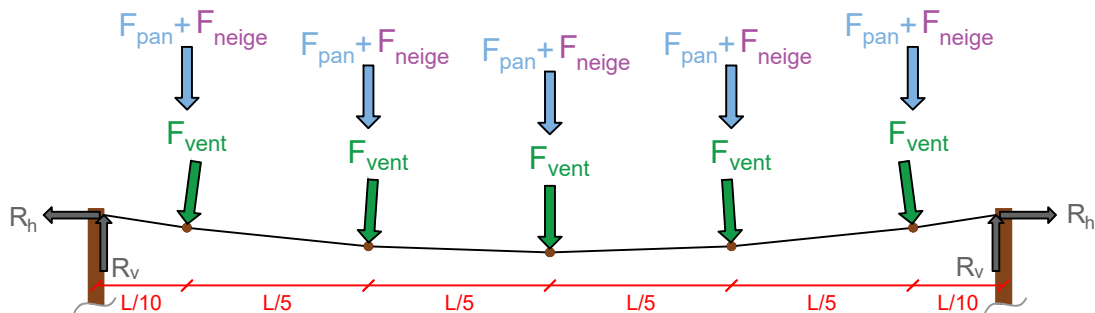


FIGURE 3.12 – Schéma statique du câble supérieur lorsqu'il est sollicité.

La tension maximale dans le câble s'exprime grâce à un équilibre des forces sur une de ses extrémités.

$$N_{\text{c\grave{a}ble,sup}} = \sqrt{R_v^2 + R_h^2} \quad (3.6)$$

Avec : R_v la réaction verticale au point d'accroche du câble
 R_h la réaction horizontale au point d'accroche du câble

Les réactions aux points d'accroche du câble sont déterminées à l'aide d'un équilibre des forces sur le câble. Cet équilibre est repris ci-dessous :

$$\sum F_v = 0 \quad \Leftrightarrow \quad 2R_v = 5F_{Pan} + 5F_{Neige} + 5F_{Vent} \cos \alpha \quad (3.7)$$

$$\sum M_{\text{Extr\^e}mit\^e \text{ gauche}} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad LR_v = (F_{Pan} + F_{Neige} + F_{Vent}) \frac{L}{2} \quad (3.8)$$

$$+ (F_{Pan} + F_{Neige} + F_{Vent} \cos \alpha) \left(\frac{L}{10} + \frac{3L}{10} + \frac{7L}{10} + \frac{9L}{10} \right) \quad (3.9)$$

6. Inter-distance entre deux poteaux, voir figure 3.2a

La pente du câble est supposée constante sur la mi-portée et vaut :

$$\alpha = \arctan\left(\frac{H}{L/2}\right) = \arctan\left(\frac{1.25}{30/2}\right) = 4.76^\circ$$

Les deux équations 3.7 et 3.8 nous donnent indépendamment l'une de l'autre la même réaction verticale, soit $R_v = 75.29[kN]$. La réaction horizontale est, quant à elle, déterminée en faisant un équilibre des moments de la partie gauche du câble autour de son point le plus bas, à savoir la mi-portée.

$$\begin{aligned} \frac{L}{2}R_v &= 1.25R_h + F_{Vent} \sin \alpha \left(\frac{L}{5} \tan \alpha + \frac{2L}{5} \tan \alpha\right) \\ &+ (F_{Pan} + F_{Neige} + F_{Vent} \cos \alpha) \left(\frac{L}{5} + \frac{2L}{5}\right) \end{aligned}$$

La réaction horizontale au point d'accroche du câble est $R_h = 468.02[kN]$ et la tension maximale dans le câble est donc $N_{c\grave{a}ble,sup} = 474.04[kN]$. Les réactions d'appuis du poteau découlent directement des réactions au point d'accroche du câble. Nous considérons un poteau "de travée" lorsque deux câbles supérieurs et inférieurs prennent accroche dessus. Ses réactions sont :

$$V = 2R_v = 150.58[kN] \tag{3.10}$$

$$H = R_{h,gauche} + R_{h,droite} = 0[kN] \tag{3.11}$$

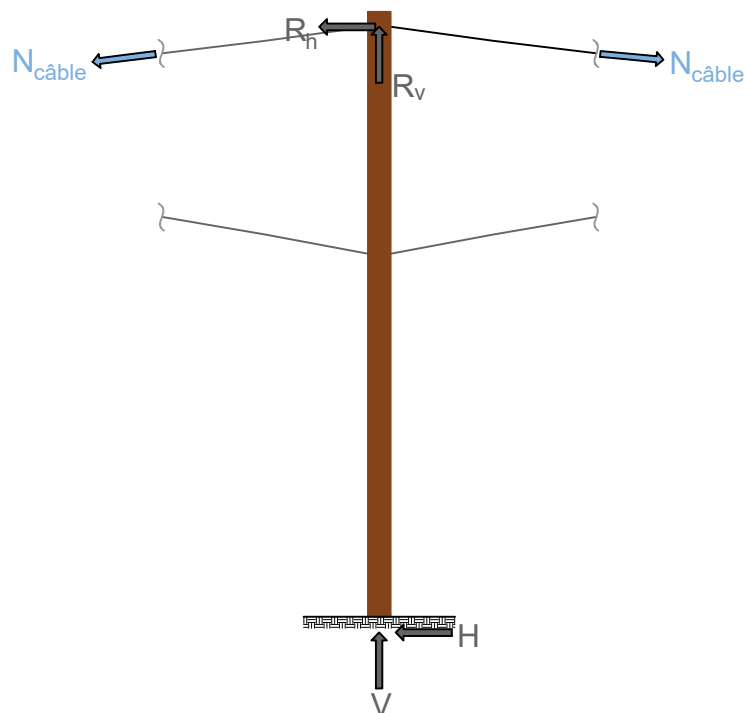


FIGURE 3.13 – Réactions d'appuis d'un poteau de travée lorsque le câble supérieur est sollicité.

3.2.2.2 Câble inférieur en travée

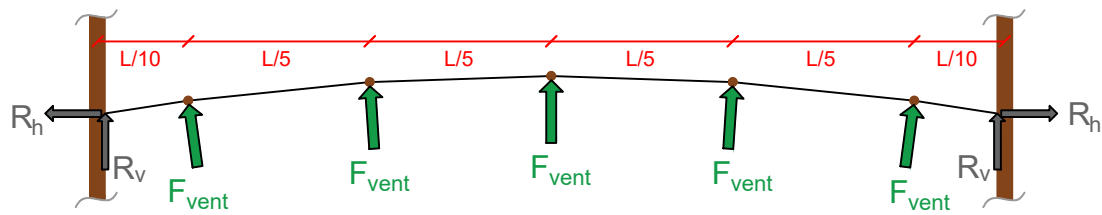


FIGURE 3.14 – Schéma statique du câble inférieur lorsqu’il est sollicité.

La seule charge à prendre en compte sur le câble est celle du vent. En effet, dans le cas d’un soulèvement, le poids propre et la neige sont favorables à la sécurité et ils sont donc négligés lors du calcul de la tension dans le câble.

Les réactions d’appuis aux points d’accroche du câble sont calculées par équilibre des forces et de moments sur le câble :

$$R_v = \frac{4F_{vent} \cos \alpha + F_{vent}}{2} = 44.88[kN] \quad (3.12)$$

$$R_h = \left(\frac{L}{2} R_v - F_{vent} \cos \alpha \left(\frac{L}{5} + \frac{2L}{5} \right) - F_{vent} \sin \alpha \left(\frac{L}{5} \tan \alpha + \frac{2L}{5} \tan \alpha \right) \right) / 1.25 \quad (3.13)$$

$$= 278.46[kN] \quad (3.14)$$

La tension maximale dans le câble est donnée par la relation suivante [32] :

$$N_{c\grave{a}ble,sup} = \sqrt{R_v^2 + R_h^2} = 282.05[kN] \quad (3.15)$$

Des réaction R_v et R_h découlent directement les réactions d’appuis du poteau. Elles sont visibles à la figure 3.15. Pour un poteau de travée :

$$V = 2 * R_v = -89.76[kN] \quad (3.16)$$

$$H = R_{h,gauche} + R_{h,droite} = 0[kN] \quad (3.17)$$

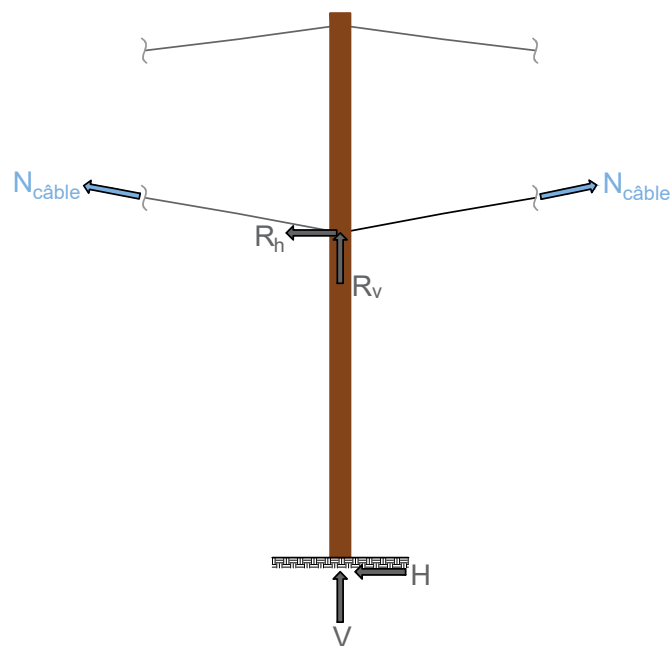


FIGURE 3.15 – Réactions d’appuis d’un poteau de travée lorsque le câble inférieur est sollicité.

3.2.2.3 Haubans et poteau de bout

Deux cas sont à considérer pour calculer les poteaux de bouts et les haubans qui les soutiennent :

- le câble supérieur de travée arrivant sur le poteau est sollicité
- le câble inférieur de travée est sollicité par effet de soulèvement du vent

Nous nous attardons en premier lieu au cas où le câble supérieur est sollicité, ce qui est illustré à la figure 3.16. Les efforts dans les haubans ont été calculés à l'aide du logiciel *ISSD* [33], software développé par Pierre Latteur.

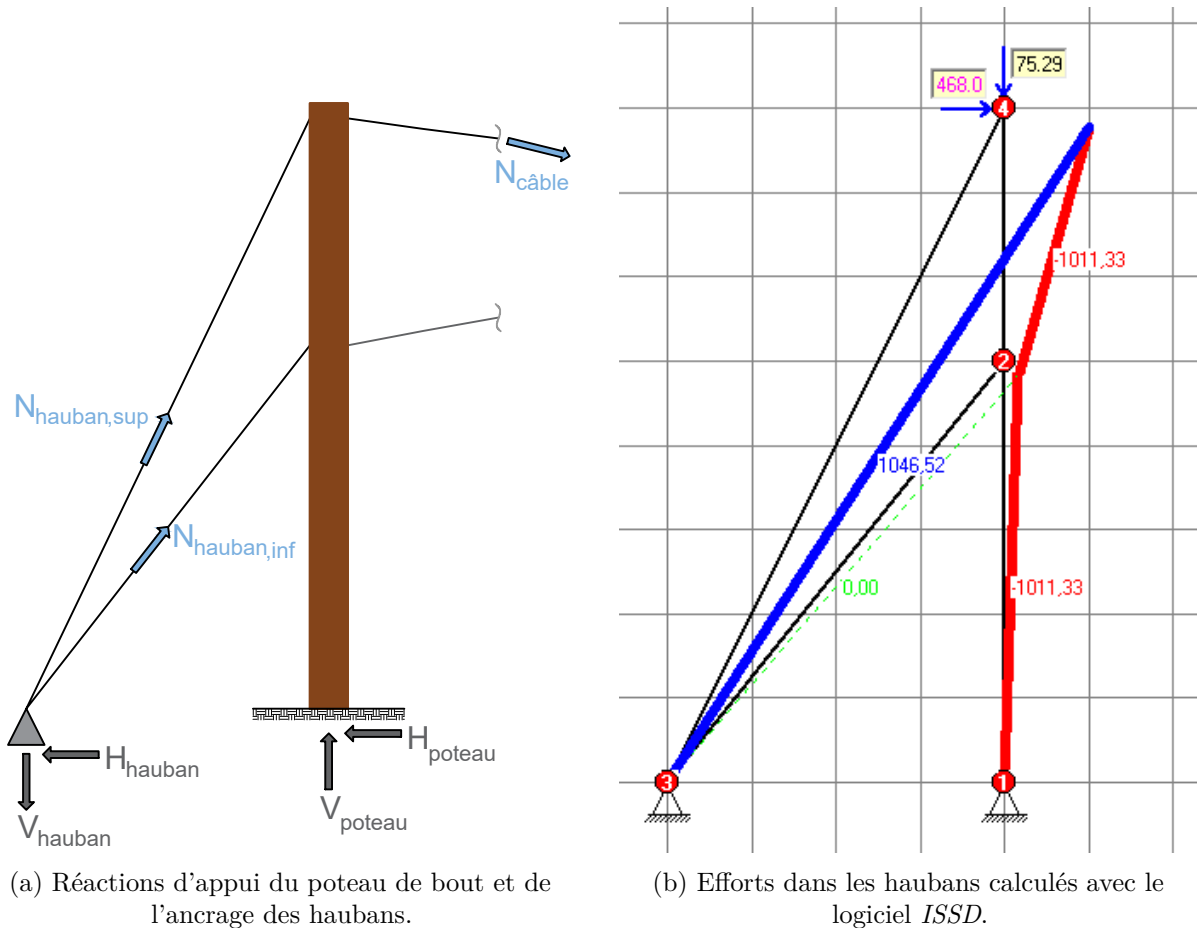


FIGURE 3.16 – Efforts dans les haubans lorsque le câble supérieur est sollicité.

On observe un effort de traction de $1046.52[kN]$ dans le hauban supérieur, ce qui se traduit par une réaction d'appui verticale à l'ancrage du hauban de $V_{hauban} = -936.04[kN]$ et horizontale $H_{hauban} = -468.02[kN]$. Le poteau, quant à lui, subit une compression de $1011.33[kN]$.

La figure 3.17 représente la situation où le câble inférieur est sollicité :

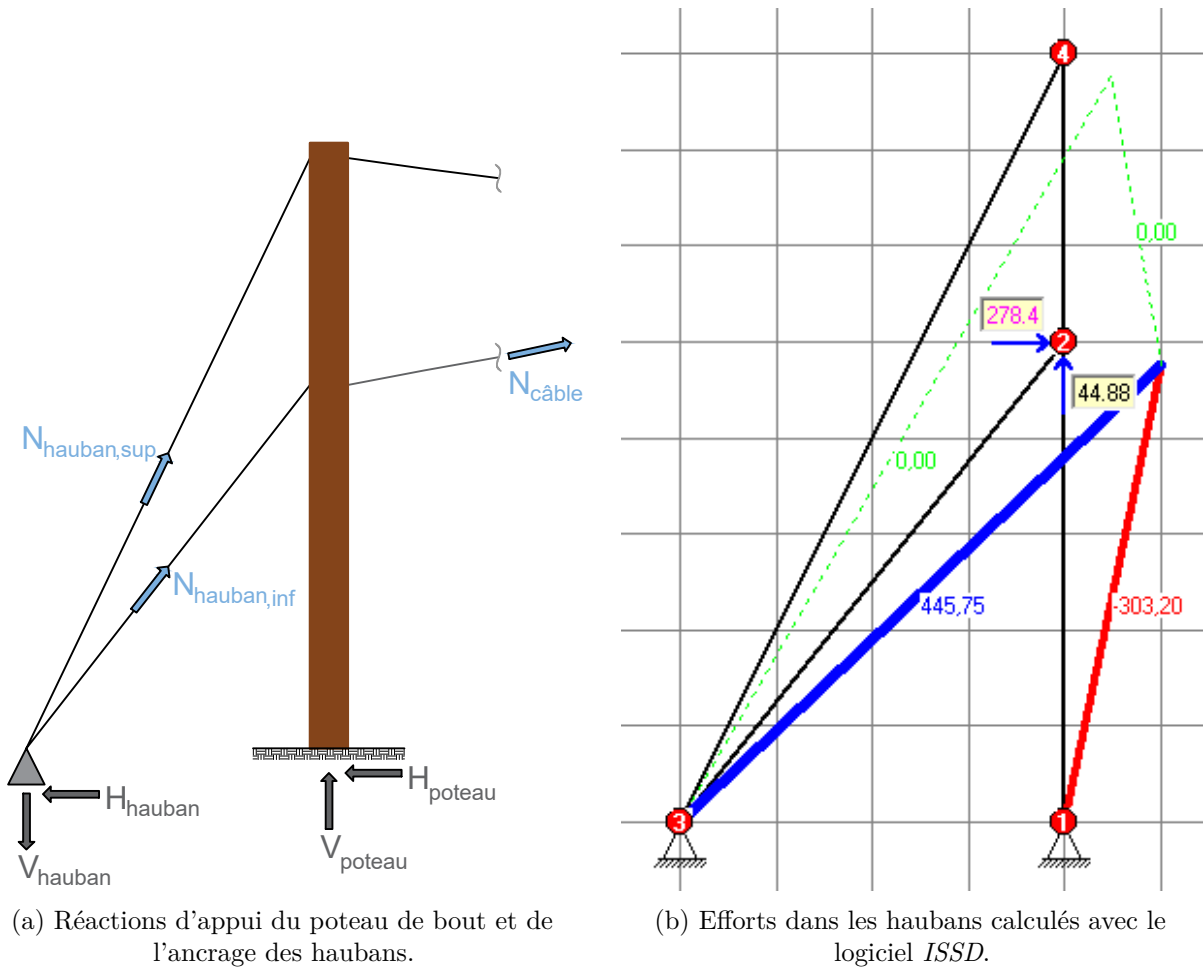


FIGURE 3.17 – Efforts dans les haubans lorsque le câble inférieur est sollicité.

On observe un effort de traction de $445.75[kN]$ dans le hauban inférieur, traduit par des réactions d'appui verticales et horizontales au point d'ancrage des haubans égales à $-348.08[kN]$ et $-278.46[kN]$, respectivement. Le poteau subit une compression de $303.2[kN]$.

3.2.2.4 Efforts internes : tableau récapitulatif

		Cas de charge	
		Câble supérieur sollicité	Câble inférieur sollicité
Efforts dans les câbles	$N_{c\grave{a}ble,sup}$	474.04	0
	$N_{c\grave{a}ble,inf}$	0	282.05
	$N_{hauban,sup}$	1046.52	0
	$N_{hauban,inf}$	0	445.75
Réactions d'appui du poteau de travée	$V_{trav\acute{e}e}$	150.58	-89.76
	$H_{trav\acute{e}e}$	0	0
Réactions d'appui du poteau de bout	V_{bout}	1011.33	303.2
	H_{bout}	0	0
Réactions d'appui de l'ancrage des haubans	V_{hauban}	-936.04	-348.08
	H_{hauban}	-468.02	-278.46

TABLE 3.2 – Efforts internes dans les différentes parties de la structure en $[kN]$.

3.2.3 Dimensionnement

3.2.3.1 Poteaux

Les poteaux travaillent majoritairement en compression, bien qu'ils subissent occasionnellement des efforts de traction. L'Eurocode 5 [34] définit la démarche de dimensionnement de tels éléments en bois. La condition à respecter afin que l'élément ne soit pas sensible au flambement est exprimée à l'équation 3.18. Le calcul est itératif étant donné qu'il présuppose une aire de la section et une résistance caractéristique du matériau. Pour des raisons de durabilité et de résistance, les troncs d'arbres sont en bois massif de classe de résistance $D40$ ou $C40$. Leur classe de service est la troisième : en extérieur et exposé aux intempéries. L'élément le plus sollicité en compression de la structure est le poteau de bout. Avec les valeurs décrites ci-dessous, on obtient un taux de travail de 99% pour un tronc de 46 centimètres de diamètre. Le même exercice a été réalisé pour les poteaux de travée qui sont moins sollicités et ils nécessitent un diamètre minimal de $27[cm]$.

$$\text{Taux de travail} = \frac{N_{Ed}\gamma_m}{(\pi D^2/4)k_{mod}k_{c,f,c,0,k}} \leq 1 \quad (3.18)$$

avec : $N_{Ed} = 1011.33[kN]$	effort sollicitant
$\gamma_m = 1.3[/math>$	coefficient de sécurité sur le matériau
$k_{mod} = 0.5[/math>$	coefficient tenant compte de la classe d'exposition du bois
$k_c = 0.6[/math>$	coefficient de sécurité au flambement
$f_{c,0,k} = 27[MPa]$	résistance caractéristique en compression du D40
$D = 0.455[m]$	diamètre de la section

3.2.3.2 Poutres de support en grumes de bois

Les poutres en grumes de bois, aussi appelées "pannes", sont soutenues par les câbles de travée représentés à la figure 3.18 au moyen de supports triangulaires rotulés. En charpenterie, une panne est un élément transversal soutenant la toiture d'un édifice. L'analogie avec les structures agrivoltaïques hautes et les panneaux solaires semble opportune. C'est pourquoi, afin de ne pas confondre les grumes utilisées comme poteaux et celles utilisées comme poutres, il a été décidé d'appeler les poutres de support en grumes de bois "pannes".

Elles sont vérifiées aux critères de résistance et de déformation. Étant moins sollicitées et moins exposées que les poteaux, une classe de bois moins résistante est utilisée, à savoir du C24.

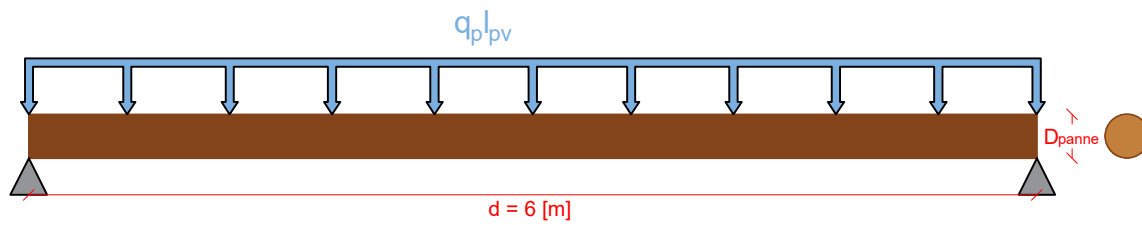


FIGURE 3.18 – Charge linéique sur les grumes de support.

Le critère de résistance pour une section ronde s'écrit comme suit :

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{él}} = \frac{q_p l_{pv} d^2 D_{panne}}{16 I_{panne}} \leq \frac{f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_m} \quad (3.19)$$

$$\text{Avec : } I_{panne} = \frac{\pi D_{panne}^4}{64} \quad (3.20)$$

$$\Rightarrow D_{panne} = \sqrt[3]{4 \frac{q_p l_{pv} d^2 \gamma_m}{\pi f_{m,k} k_{mod}}} = 26.1[cm] \quad (3.21)$$

La flèche d'une poutre sur deux appuis est donnée par la relation suivante. Le diamètre obtenu avec le critère de résistance est utilisé.

$$\delta = \frac{5 q_p l_{pv} d^4}{384 E_{panne} I_{panne}} \quad (3.22)$$

$$\Rightarrow \delta = 3.4[cm] \quad (3.23)$$

Avec : $q_p = 2.51[kN/m^2]$	le poids surfacique des panneaux, du vent et de la neige, pondérés selon l'Eurocode
$l_{pv} = 2[m]$	la hauteur des panneaux
$f_{m,k} = 24[MPa]$	la contrainte de flexion résistante des grumes C24
$E_{panne} = E_{0,moyen} = 11000[MPa]$	le module élastique moyen des grumes C24
$\gamma_m = 1.3[/math>$	le coefficient de sécurité sur le matériau bois massif
$k_{mod} = 0.7[/math>$	le coefficient réducteur sur le bois de classe d'exposition 3

Le diamètre des grumes doit donc être de $26.1[cm]$ et la poutre présentera une flèche de $3.4[cm]$, correspondant à un ratio de $\frac{d}{178}$.

3.2.3.3 Profilés métalliques de support

À l'instar du dimensionnement des grumes de support de la section 3.2.3.2, les profilés métalliques à dimensionner sont supportés de part et d'autre par les câbles tendus entre deux poteaux.

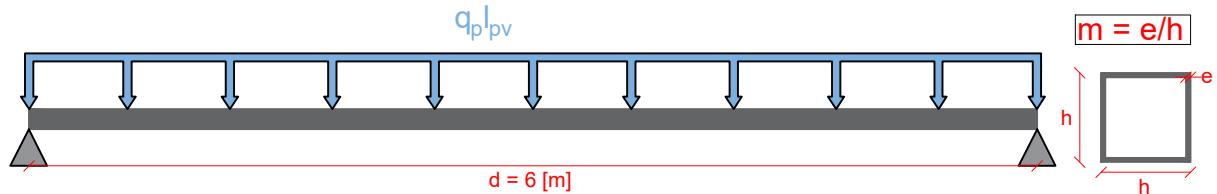


FIGURE 3.19 – Charge linéique sur les profilés de support.

Le critère de résistance à respecter provient de la théorie des poutres de Bernouilli-Euler :

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{él}} = \frac{q_p l_{pv} d^2 h}{16 I_{profilé}} \leq f_{y,profilé} \quad (3.24)$$

$$\text{Avec : } I_{profilé} = \frac{h^4}{12} - \frac{(h - 2e)^4}{12} \quad (3.25)$$

$$= \frac{1}{12} (1 - (1 - 2m)^4) h^4 \quad (3.26)$$

Il est proposé de fixer le paramètre m qui reflète le rapport épaisseur/dimension latérale du profilé à 0.05. La section du profilé est définie comme une section carré creuse, et il est donc possible d'obtenir la hauteur résistante nécessaire de la manière suivante :

$$h = \sqrt[3]{\frac{3q_p l_{pv} d^2}{4f_{y,profilé}(1 - (1 - 2m)^4)}} = 11.9[cm] \quad (3.27)$$

Avec : $q_p = 2.51[kN/m^2]$	le poids surfacique des panneaux, du vent et de la neige, pondérés selon l'Eurocode 1
$l_{pv} = 2[m]$	la hauteur des panneaux
$f_{y,profilé} = 235[MPa]$	la contrainte élastique résistante des profilés

On peut aussi déterminer la flèche de cette poutre.

$$\delta = \frac{5q_p l_{pv} d^4}{384 E_{profilé} I_{profilé}} \quad (3.28)$$

$$\Rightarrow \delta = 7[cm] \quad (3.29)$$

Avec : $E_{profilé} = 210[GPa]$

le module élastique de l'acier

La hauteur des profilés doit donc être de $11.9[cm]$ et la poutre présente une flèche de $7[cm]$, correspondant à un ratio de $\frac{d}{85}$.

3.2.3.4 Câbles

De manière similaire avec ce qui a été retenu pour les structures basses, le catalogue de *La Cablerie Namuroise* [26] fournit la section de câble nécessaire en fonction de sa sollicitation. Les efforts endurés par les câbles sont repris dans le tableau 3.2 en page 43. Le plus important vaut $1046.52[kN]$ et se trouve dans les haubans supérieurs. Le catalogue propose des câbles galvanisés avec une âme en acier 6×36 de 40 millimètres de diamètre capable de reprendre $1120[kN]$.

Pour les câbles supportant les poutres et se trouvant donc entre deux poteaux de travée, l'effort à reprendre est moindre et vaut $474.04[kN]$. Le catalogue de *La Cablerie Namuroise* propose des câbles galvanisés 6×36 de 28 millimètres de diamètre capables de reprendre $547[kN]$.

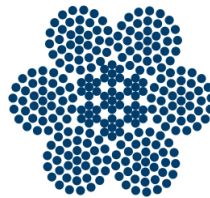


FIGURE 3.20 – Câble inox 6×36 de *La Cablerie Namuroise*.

3.2.3.5 Fondations

Les fondations des poteaux des structures hautes se veulent assez simples à mettre en oeuvre. Il en va de même pour ce qui concerne leur dimensionnement. En effet, elles sont sujettes à de fortes modifications dues à leur dépendance à la nature du sol, qui est variable d'un projet à l'autre. En pratique, le poteau en grume est enfui dans une excavation remplie de ballast, garantissant à la fois sa durabilité par le bon drainage du pied du poteau, mais aussi la bonne distribution des contraintes latérales au sol. Les efforts verticaux sont quant à eux trop importants pour être transférés au sol par le ballast. Pour palier à ce manquement, démontré à l'annexe C, les charges verticales seront reprises par un micropieu vissé. La jonction entre ce micropieu et la colonne de bois est détaillée à la section 3.2.3.7. Il a été choisi d'utiliser des pieux vissés de la marque *Techno Pieux* [35].

Les poteaux de travée sont soumis à un effort de compression de $150.58[kN]$ et un effort de traction verticale de $-89.76[kN]$. Le catalogue de chez *Techno Pieux* fournit un modèle de pieu, le *P3*, capable de reprendre $112.5[kN]$ en traction et $225[kN]$ en compression, suffisant pour cette application.

Les poteaux de bout peuvent, quant à eux, être comprimés à hauteur de $1011.33[kN]$. Les pieux *P4HD* de chez *Techno Pieux* sont capables de reprendre jusqu'à $337.5[kN]$. Trois exemplaires sont donc nécessaires pour supporter les efforts de compression dans les poteaux. Les poteaux de bout ne seront en pratique jamais sollicités en traction mais à titre informatif, 3 pieux vissés *P4HD* sont capables de reprendre $3 \times 168.8[kN] = 506.4[kN]$.

À la figure 3.21 se trouve un schéma d'un micropieu générique. Il ne s'agit pas des modèles choisis pour les structures hautes, cette image est à titre informatif.

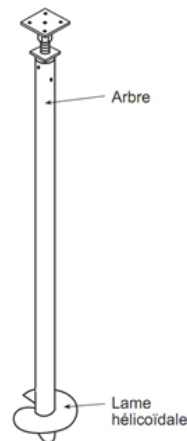


FIGURE 3.21 – Représentation d'un micropieu vissé [36]

Techno Pieux mentionne sur son site internet que des vérifications et essais sur site sont nécessaires pour chaque projet au vu de la grande incertitude sur les caractéristiques du sol disponibles. Il s'agit donc de valeurs informatives, suffisantes pour une première évaluation.

Il reste à déterminer l'enfoncement de la colonne dans le ballast et les dimensions de l'excavation, dictés par la capacité portante latérale du sol. L'enfoncement et la largeur d'excavation sont réglés de telle sorte que, sous l'action d'une charge latérale, le sol plastifiera avant que les parties en surface ou enfouies de la colonne ne se brisent, évitant un effondrement général.

La largeur de l'excavation doit être assez grande pour accueillir la colonne qui fait approximativement $46[cm]$ de diamètre. Une excavation de $B = 1[m]$ de large est propice pour rendre le travail sur chantier réalisable. Il reste donc à fixer la profondeur d'enfoncement en la bornant par le haut, de telle manière qu'elle soit toujours suffisamment faible pour que le sol rompe avant le bois. Une représentation de la fondation se trouve à la figure 3.22.

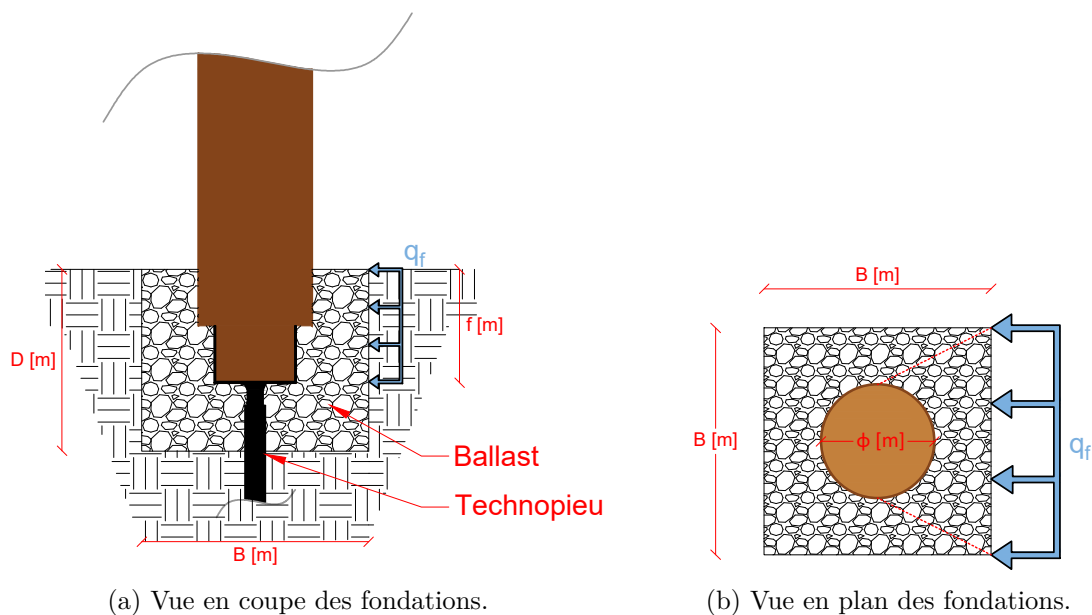


FIGURE 3.22 – Fondation des structures hautes.

Il faut que le bois résiste à l'effort de contact avec le ballast. Cette condition peut s'écrire par la relation suivante :

$$0.3 \frac{f_{c,90,k} k_{mod}}{\gamma_m} f \phi \geq q_f f B \quad (3.30)$$

Avec : $f_{c,90,k} = 5.5[MPa]$	contrainte de compression perpendiculaire aux fibres résistante du $D40$
$k_{mod} = 0.7$	coefficient tenant compte de la classe d'exposition du bois
$\gamma_m = 1.3$	coefficient de sécurité sur le matériau
$q_f = K_0 \gamma \frac{f}{2} [kN/m^2]$	la capacité portante du sol
$B = 1[m]$	largeur de la fondation
$\phi = 46[cm]$	diamètre d'une colonne

Il est supposé qu'il n'y a que 30% de contact entre le bois et le ballast. En posant les mêmes conditions de sol que pour l'équation 5.2 décrite en annexe C on obtient que la fiche f doit valoir au plus $81.74[m]$. Cette borne supérieure est évidemment respectée au vu de sa valeur très élevée.

On peut également calculer la fiche f maximale de telle sorte que le sol rompe avant que la colonne ne cède en flexion ou en cisaillement. En supposant un effort horizontal à $1[m]$ du pied de la colonne comme sur le figure 3.23, qui correspondrait à un engin agricole heurtant la colonne, la force nécessaire pour briser la colonne en flexion devrait valoir $24615[kN]$, en considérant une essence de bois $D40$. La fiche devrait valoir $1460[m]$. Pour une rupture en cisaillement de la colonne avec une force à $1[m]$ du pied de colonne, il faudrait une force de $160.7[kN]$. Cette force serait équilibrée par une fiche f de $5.7[m]$.

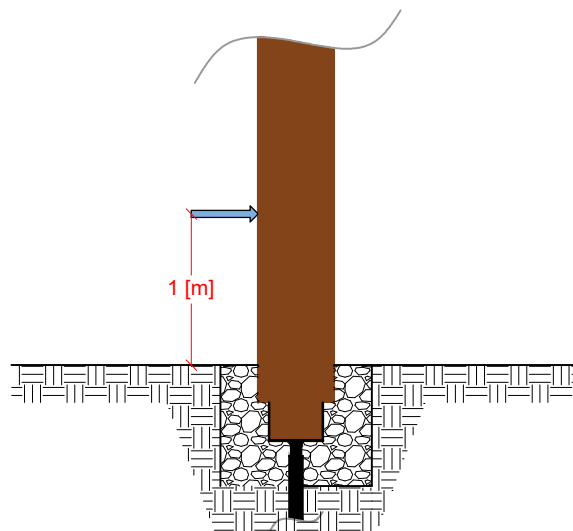


FIGURE 3.23 – Force à $1[m]$ du pied de colonne.

La profondeur d'enfoncement est donc bornée par le haut à $5.7[m]$. Évidemment, cette profondeur n'est pas réaliste et il est décidé de la fixer à $f = 50[cm]$, correspondant donc à la moitié de la largeur de l'excavation. Il est prévu de creuser à $D = 80[cm]$ afin d'assurer $30[cm]$ de ballast sous la colonne, permettant un bon drainage.

3.2.3.6 Assemblages en tête de poteau

La compression parallèle aux fibres du bois est à privilégier car cette dernière est plus performante. Les câbles sont reliés par une tige filetée métallique traversant le poteau. Cela permet de transmettre l'importante composante horizontale des forces qui transitent de câble à câble à travers l'acier, évitant ainsi les contraintes perpendiculaires aux fibres du bois.

La composante verticale induit une pression diamétrale dans le percement. L'inconvénient de cette solution est la nécessité de maintenir latéralement l'assemblage afin d'éviter tout glissement. Pour pallier à cela, les rondelles présentes sur la figure 3.24 sont dimensionnées infra.

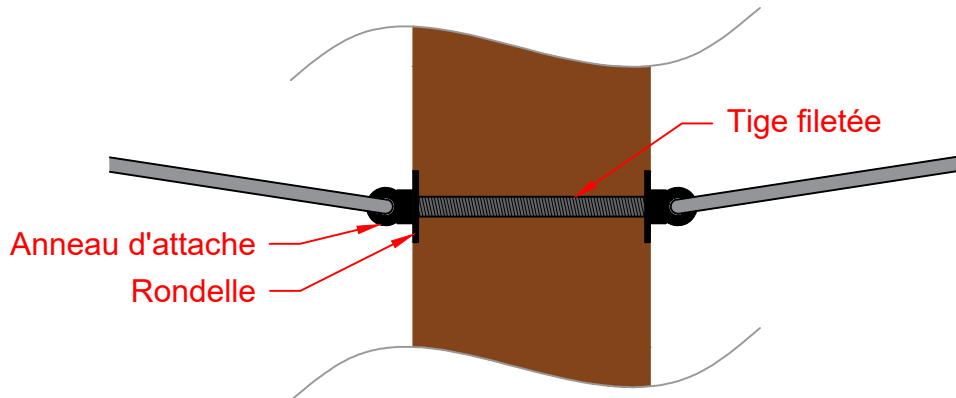


FIGURE 3.24 – Coupe verticale de l'assemblage reliant les câbles principaux et un poteau.

Quatre configurations de cet assemblage sont représentées en figure 3.25. Pour chacune, la résistance de la section d'acier est vérifiée horizontalement et la résistance à la pression diamétrale du bois est vérifiée verticalement. Le moment d'écoulement plastique⁷ de la tige filetée est aussi pris en compte. L'acier est de type 8.8. En outre, les poteaux de travées sont considérés avoir un diamètre de 30[cm] tandis que ceux de bout ont un diamètre de 45[cm].

$$N_h \leq A_{steel} * f_{yb} * \gamma_{m0} \quad (3.31)$$

$$N_v \leq \frac{k_{mod}}{\gamma_{ass}} \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,0,k} t d \\ 3.2 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,0,k} d} \end{array} \right. \quad (3.32)$$

7. Critère d'écoulement plastique : critère permettant de savoir, sous des sollicitations données, si une pièce se déforme plastiquement ou si elle reste dans le domaine élastique.

Avec : $N_h[kN]$

$A_{steel}[m^2]$

$f_{yb} = 640[MPa]$

$\gamma_{m0} = 1[/math>$

$N_v[kN]$

$k_{mod} = 0.7[/math>$

$f_{h,0,k}[MPa] = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k$

$M_{y,Rk}[kNm] = 0.3f_{ub}d^{2.6}$

$f_{ub} = 800[MPa]$

$d[m]$

$t[m]$

$\gamma_{ass} = 1.3[/math>$

$\rho_k = 550[kg/m^3]$

la composante horizontale des forces dans les câbles,
égale de chaque côté de l'assemblage

l'aire de section d'acier

la résistance élastique de l'acier de tige filetée

le coefficient de sécurité prescrit par l'Eurocode

le total des composantes verticales

des forces dans les câbles

coefficient minorant permettant de prendre

en compte la classe d'exposition du bois

la pression diamétrale admissible

le moment d'écoulement plastique de la tige filetée

la résistance ultime de l'acier de tige filetée

le diamètre d'acier plein, valeur recherchée

longueur d'application de la pression diamétrale,

égale au diamètre du poteau

coefficient de sécurité sur les assemblages

la densité du bois D40

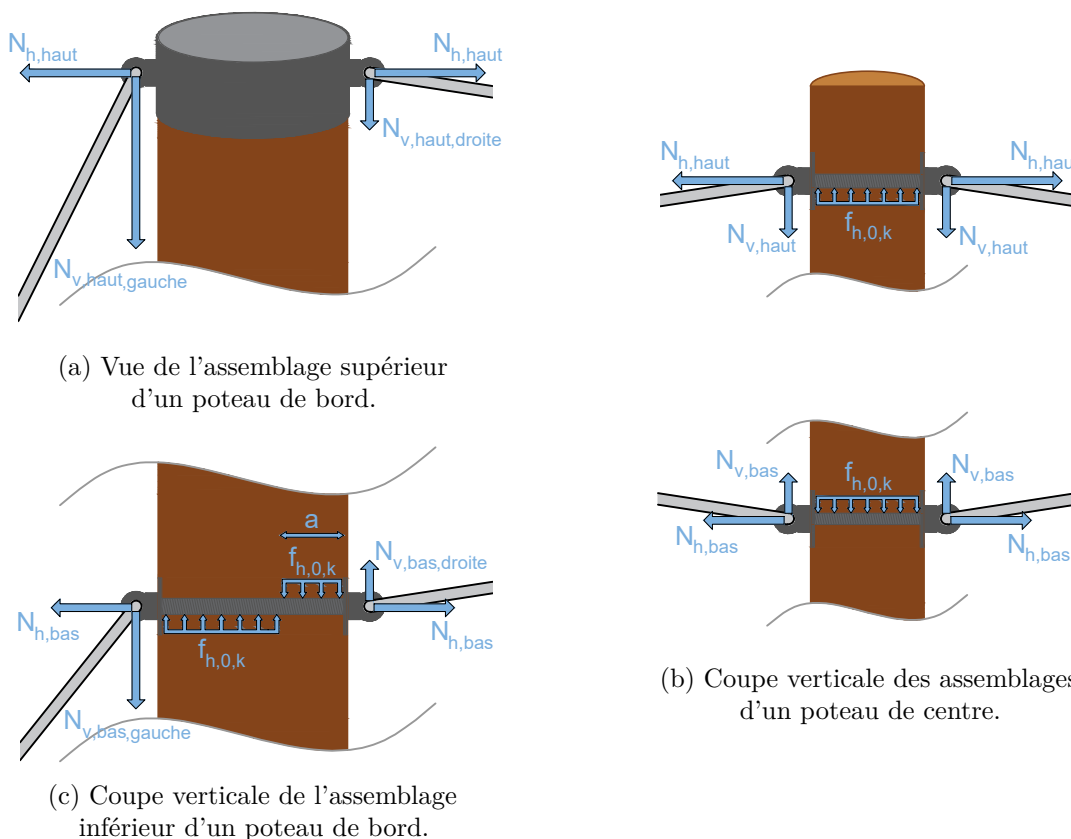


FIGURE 3.25 – Forces transisant dans les assemblages en tête de poteau.

L'acier est dimensionnant pour les assemblages de poteaux de travée, illustrés en figure 3.25b. Les assemblages supérieurs demandent un diamètre d'acier plein de $3.1[cm]$, équivalent à un filet *M36*, et les assemblages inférieurs de $2.4[cm]$, équivalent à du *M30*.

Les poteaux de bord sont particuliers de par la présence des haubans. L'inclinaison du hauban de l'assemblage inférieur est opposée à celle du câble de travée, comme visible à la figure 3.25c. La méthodologie est inspirée de la théorie des assemblages à tiges de Johansen, utilisée dans l'Eurocode 5 [34]. Dans ce cas, la résistance du bois nécessite un diamètre d'acier plein de $3.6[cm]$ correspondant à un filet *M42*.

L'assemblage supérieur, visible à la figure 3.25a, reprend une force verticale de $1086[kN]$. L'assemblage utilisant une tige filetée n'est pas réaliste pour cet effort. D'une part, il faudrait un percement de $10[cm]$ de diamètre afin d'éviter l'écrasement du bois, ce qui est énorme. D'autre part, cette solution représenterait un budget d'acier trop important.

À la place, les poteaux de bout sont coiffés d'un chapeau d'acier *S235* qui transmet de la compression sur toute la section de la grume. Un diamètre de grume de $30.84[cm]$ en tête de colonne est le minimum nécessaire pour reprendre les forces verticales présentes. Les efforts de traction sont transmis à travers la couronne d'acier de la coiffe de $20[cm]$ de haut, qui nécessite une épaisseur minimum de $3[mm]$, arrondie à $5[mm]$ pour des raisons technologiques de résistance de soudure. Une alternative à cette option serait d'augmenter l'angle des haubans, actuellement 26.57 deg , pour diminuer la composante verticale de l'effort. Un angle de 45 deg diminue le diamètre de tige filetée nécessaire à $7.5[cm]$, ce qui reste déraisonnable.

Comme mentionné, des rondelles sont nécessaires de part et d'autre de l'assemblage à tige filetée pour éviter son déplacement latéral. Le cas de la mise en tension d'un câble supérieur, auquel pend le câble inférieur, est pris en compte. Les seules charges sont donc les poids propres des deux câbles, le reste de la structure n'étant pas encore installé. Les réactions d'appui d'un câble élané soumis à son poids propre sont données dans le livre *Calculer une Structure* [32] :

$$R_h = \frac{qL^2}{8H}$$

Le poids linéique du câble est donné dans le catalogue du constructeur, et induit une charge latérale dans l'assemblage de $N_{h,Ed} = 15.59[kN]$. Connaissant le diamètre des filets, on peut calculer le diamètre externe des rondelles nécessaire pour que la grume résiste à l'effort de compression perpendiculaire aux fibres.

$$r_{ext} = \sqrt{\frac{N_{h,Ed}\gamma_m}{k_{mod}f_{c,90,k}\pi}} + r_{int}^2 \quad (3.33)$$

Avec $r_{int} = 0.019[m]$, on obtient un rayon extérieur nécessaire de $r_{ext} \geq 0.045[m]$. Le diamètre extérieur de la rondelle sera fixé sécuritairement à $15[cm]$, équivalent à un plat métallique carré de $13[cm]$ de côté.

3.2.3.7 Assemblage en pied de poteau

L'assemblage en pied de poteau permet de faire passer les efforts de traction et de compression de la grume à la fondation. La grume est supportée par un sabot métallique en forme de "U" ; deux entailles plates doivent être réalisées sur le pied de la grume afin d'accueillir ce sabot. Des boulons traversants solidarissent les deux éléments. Deux modèles de calcul sont possibles : soit les

boulons sont capables de reprendre la totalité de la compression sur la colonne, soit la grume est simplement déposée sur le sabot et les boulons permettent juste le couplement. Afin de limiter la section des boulons et de proposer un assemblage économique, la seconde option est choisie. La capacité du bois à supporter ces efforts de compression a déjà été vérifiée implicitement lors du dimensionnement du diamètre des colonnes au flambement et ne sera donc pas vérifiée à nouveau.

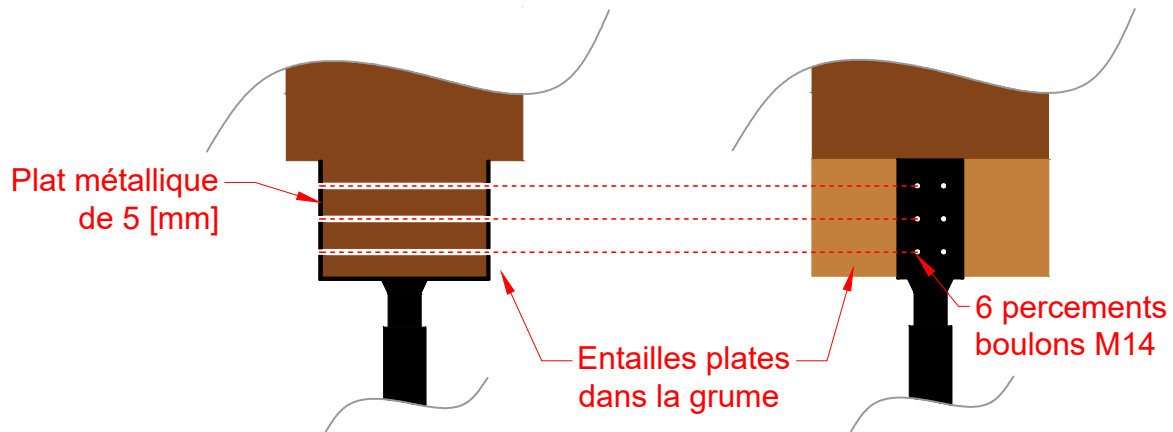


FIGURE 3.26 – Assemblage de pied des poteaux de la structure haute.

Pour ce qui est des boulons, deux rangées de trois boulons sont préconisées afin d'assurer un encastrement suffisant entre la grume et le sabot. Dans les modèles de calcul, cet assemblage est considéré comme rotulé. En effet, les boulons ne permettent pas d'obtenir un encastrement parfait, d'autant plus que le bois est un matériau moins raide que l'acier.

Plusieurs éléments sont à vérifier afin d'assurer la solidité de l'assemblage :

- l'épaisseur des plats métalliques
- la résistance au cisaillement des boulons
- la résistance à la pression diamétrale du plat ainsi que celle du bois
- la résistance à la traction de la colonne

Les plats métalliques de part et d'autre de la grume sont vérifiés en suivant les recommandations de l'Eurocode 3 [37]. La largeur nécessaire de plat est dictée par l'écartement minimum entre les boulons. Les valeurs d'écartement des percements sont plus contraignantes dans les normes pour le bois [34]. Pour deux lignes parallèles à l'effort composées de 3 boulons *M14* de classe 5.6, les recommandations sont les suivantes : l'écartement transversal entre deux boulons doit valoir $4d$, avec d le diamètre des vis utilisées. Cette valeur est identique pour la garde au bord longitudinal. L'écartement longitudinal entre deux percements doit valoir $(4 + \cos\alpha)d$, avec α l'angle d'inclinaison avec la direction de la force, dans notre cas il vaut 0. La garde au bord transversal doit, quant à elle, valoir $3d$. Avec des vis de diamètre *M14*, les dimensions à respecter sont les suivantes :

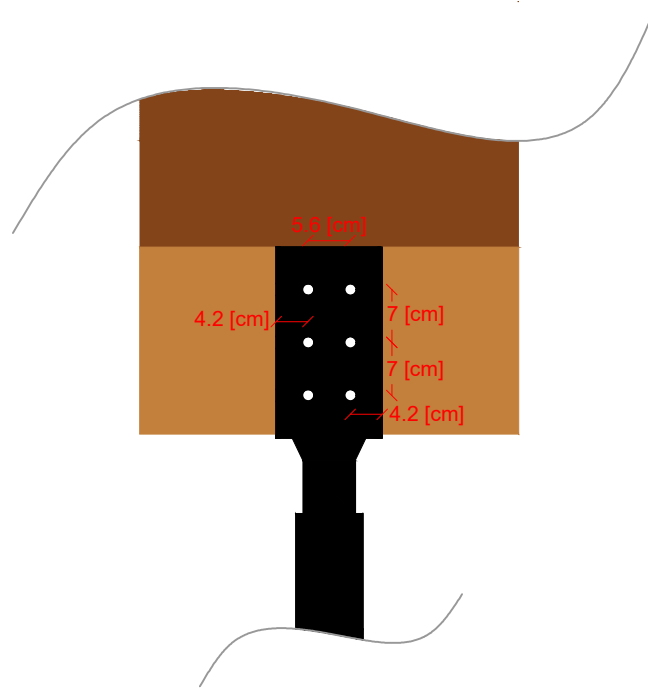


FIGURE 3.27 – Écartement des percements en pied de poteau.

Épaisseur des plats métalliques

Les épaisseurs minimum pour les sections brutes et nettes des plats, en sachant qu'il y a un plat de part et d'autre de la grume, sont les suivantes :

$$e_{brute} = \frac{N_{Ed} \gamma_{m0}}{t f_y} = 1.13 [mm] \quad (3.34)$$

$$e_{nette} = \frac{N_{Ed} \gamma_{m2}}{0.9 f_y (t - 2d_0)} = 2.46 [mm] \quad (3.35)$$

Avec : $N_{Ed} = 89.76 [kN]$

$\gamma_{m0} = 1 []$

$\gamma_{m2} = 1.25 []$

$f_y = 235 [MPa]$

$t = 0.14 [m]$

$d_0 = 0.016 [m]$

l'effort de traction subit par l'assemblage

le coefficient de sécurité sur le matériau

le coefficient de sécurité sur le matériau

la résistance élastique du plat métallique

la largeur minimum de plat nécessaire

le diamètre des percements

Pour des raisons de simplicité technique et de raideur, les plats ont une épaisseur de 5 millimètres.

Cisaillement des boulons

La résistance au cisaillement des boulons s'écrit comme suit :

$$F_{v,Rd} = n_b n_v \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{m2}} = 1321.92 [kN] \gg \gg 89.76 [kN] \quad (3.36)$$

Avec : $\alpha_v = 0.6[/]$	coefficient dépendant de la résistance au cisaillement et à la qualité d'acier des boulons
$f_{ub} = 500[MPa]$	la résistance ultime des boulons
$A_s = 459[mm^2]$	la section efficace des boulons
$n_b = 6$	le nombre de boulons
$n_v = 2$	le nombre de sections cisailées

La résistance au cisaillement des boulons est amplement suffisante pour reprendre les efforts de traction à l'assemblage de pied de colonne.

Résistances à la pression diamétrale

La pression diamétrale des boulons sur les plats doit aussi être contrôlée. L'Eurocode différencie la résistance des boulons sur l'extrémité du plat de celle des autres.

$$F_{b,Rd,ext} = n_v n_{ext} \frac{\alpha_{b,ext} k_{1,ext} f_u e d}{\gamma_{m2}} = 201.6[kN] \quad (3.37)$$

$$F_{b,Rd,int} = n_v n_{int} \frac{\alpha_{b,int} k_{1,int} f_u e d}{\gamma_{m2}} = 403.2[kN] \quad (3.38)$$

$$\Rightarrow F_{b,Rd,tot} = F_{b,Rd,ext} + F_{b,Rd,int} = 604.8[kN] \gg \gg 89.76[kN] \quad (3.39)$$

Avec : $\alpha_{b,ext/int} = 1[/]$	coefficient dépendant de la position par rapport au bord des boulons
$k_{1,ext/int} = 2.5[/]$	coefficient dépendant de l'écartement entre les boulons
$f_u = 360[MPa]$	résistance ultime des plats
$d = 14[mm]$	diamètre des boulons
$e = 5[mm]$	épaisseur des plats
$n_v = 2$	nombre de sections cisailées
$n_{ext} = 2$	nombre de boulons extérieurs
$n_{int} = 4$	nombre de boulons intérieurs

Les plats sont capables de supporter la pression diamétrale exercée par les boulons.

Il n'y a plus qu'à vérifier la résistance à la pression diamétrale du bois. L'Eurocode 3 [34] prescrit les équations ci-dessous pour des plats minces, ces derniers étant définis par l'expression suivante : $e = 0.005 < 0.5d = 0.007$.

$$F_{v,Rd} = n_{eff} \frac{k_{mod}}{\gamma_{ass}} \min \left\{ \begin{array}{l} 0.5 f_{h,0,k} t d = 110.48[kN] \\ 1.6 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,0,k} d} = 60.57[kN] \end{array} \right. \quad (3.40)$$

$$\Leftrightarrow F_{v,Rd} = 128.83[kN] \quad (3.41)$$

Avec : $d = 14[mm]$	le diamètre des boulons
$t = 35[cm]$	l'épaisseur de bois entre les deux plats
$a_1 = 0.07[m]$	l'espacement entre deux boulons parallèlement à l'effort sollicitant
$n_b = 0.07[m]$	le nombre de boulons
$\rho = 550[kg/m^3]$	la densité du bois D40
$f_{h,0,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho = 45.1[MPa]$	la portance locale du bois
$M_{y,Rk} = 0.3f_{ub}d^{2.6} = 2.27[kNm]$	le moment d'écoulement plastique du boulon
$n_{eff} = \min \left\{ n_b; n_b^{0.9} \left(\frac{a_1}{13 * d} \right)^{0.25} \right\} [mm]$	le nombre de boulons efficaces
$k_{mod} = 0.7[/math>$	coefficient minorant permettant de prendre en compte la classe d'exposition du bois
$\gamma_{ass} = 1.3[/math>$	coefficient de sécurité sur les assemblages

La résistance à la pression diamétrale du bois est également suffisante pour résister à l'effort de traction que subit l'assemblage.

Résistance à la traction de la colonne

Enfin, il faut vérifier que la grume de bois soit capable de reprendre la traction qui y transitera. Comme présenté ci-avant, les sections de bois déjà prescrites sont plus contraignantes et donc, la grume est capable de travailler sous les charges de tractions existantes.

$$A_{grume} = \frac{N_{Ed}\gamma_m}{k_{mod}f_{t,0,k}} = 69.46[cm^2] \quad (3.42)$$

$$\Leftrightarrow D_{grume} = 9.4[cm] \quad (3.43)$$

Avec : $N_{Ed} = 89.76[kN]$	l'effort de traction sollicitant
$k_{mod} = 0.7[/math>$	coefficient minorant permettant de prendre en compte la classe d'exposition du bois
$\gamma_m = 1.3[/math>$	coefficient de sécurité sur les sections de bois brut
$f_{t,0,k} = 24[MPa]$	la résistance caractéristique à la traction du bois

3.2.3.8 Assemblage poutre de support - câble

Qu'elles soient en bois ou en acier, les poutres de support des panneaux doivent se rattacher aux câbles principaux. Pour la solution avec des poutres métalliques, beaucoup de systèmes d'attache sont envisageables. Le choix est donc laissé au concepteur. Les pannes en bois sont plus contraignantes de par leur nature orthotrope. Une possibilité d'assemblage est présentée à la figure 3.28.

Il a été pris en compte que les pannes s'alignent en quinconce telle que sur la figure 3.3b à la page 31 et que leur mise en place doit pouvoir se faire après la mise en tension des câbles de travée.

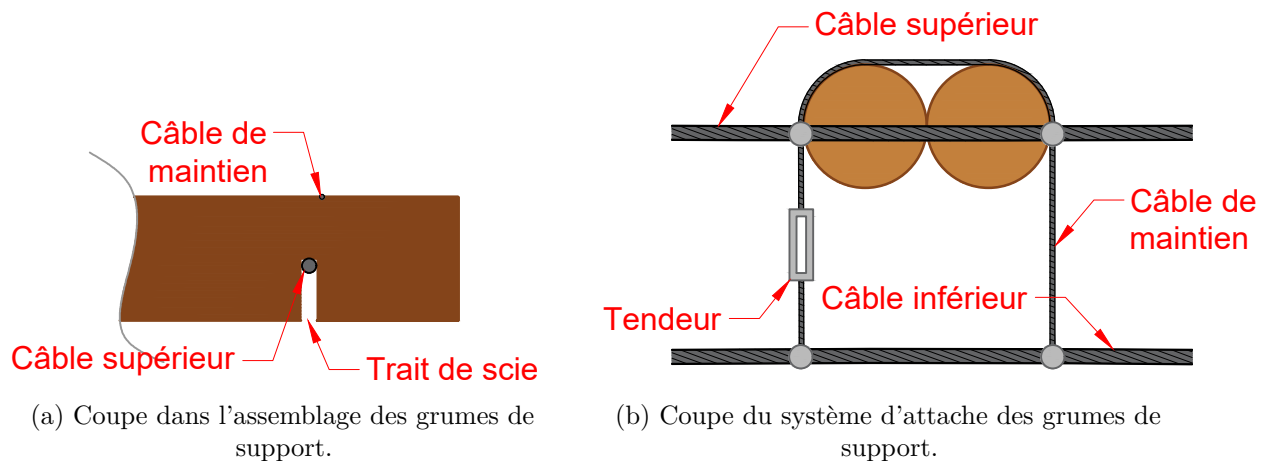


FIGURE 3.28 – Assemblage en bout des poutres de support.

Comme illustré en figure 3.28, un trait de scie jusqu'à la mi-section est réalisé en bout de poutre. Ce dernier permet d'attacher les pannes aux câbles après le levage de la structure tout en restant relativement simple à mettre en oeuvre.

Le calcul de résistance de ce trait de scie se résume à un calcul de pression diamétrale comme fait précédemment, si ce n'est que, cette fois-ci, la pression s'exerce perpendiculairement aux fibres. L'Eurocode nous donne la formule pour la détermination de la résistance à la pression diamétrale avec un angle α ⁸ :

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,0,k}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (3.44)$$

$$\text{Effort sollicitant : } N_{Ed} = \frac{l_{pv} * d * q_p}{2} = 15.08[kN] \quad (3.45)$$

$$\text{Effort résistant : } N_{Rd} = \frac{k_{mod} f_{h,90,k}}{\gamma_{ass}} t * d_{trait} = 96.10[kN] \quad (3.46)$$

Avec : $f_{h,0,k} = 28.69[MPa]$

$d_{trait} = 2.8[mm]$

$t = 0.3[m]$

$k_{90} = 1.35 + 0.015d_{trait}[/math>$

$\alpha = 90[^\circ]$

$l_{pv} = 2[m]$

$d = 6[m]$

$q_p = 2.51[kN/m^2]$

la résistance caractéristique de pression diamétrale parallèle au grain pour du bois C24

le diamètre du trait de scie, égal au diamètre de câble porteur

longueur du trait de scie, égal au diamètre d'une panne

coefficient pondérant la pression diamétrale à 90°

pour du bois résineux

angle créé entre les fibres et la pression exercée

longueur d'un panneau photovoltaïque

inter-distance entre deux travées de câbles porteurs

les charges permanentes et variables pondérées

selon l'Eurocode

De plus, les grumes entaillées s'apparentent à des poutres grugées qui nécessitent une vérification de la résistance au cisaillement.

8. Angle entre la direction de l'effort et celle des fibres.

$$\tau_{Ed,max,1} = \frac{3V}{2k_{cr}bh_{ef}} \leq k_v\tau_{v,d} \quad (3.47)$$

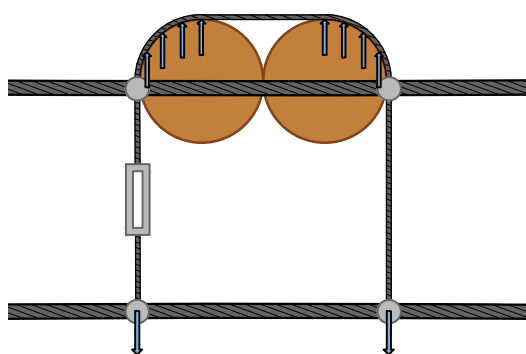
$$\iff 0.75[MPa] \leq 4[MPa] \quad (3.48)$$

Avec : $V = 15.08[kN]$	l'effort sollicitant
$k_{cr} = 0.67[/math>$	coefficient qui tient en compte des éventuelles fissures dans le bois
$b = d_{panne} = 0.3[m]$	largueur de cisaillement
$h_{ef} = \frac{d_{panne}}{2} = 0.15[m]$	hauteur de cisaillement
$k_v = \min(18.25; 1)[/math>$	coefficient réducteur pour les poutres entaillées
$\tau_{v,d} = 4[MPa]$	résistance au cisaillement du bois C24

Le maintien des pannes sur le câble de travée supérieur permet aussi le maintien du câble de travée inférieur. Comme on peut le voir à la figure 3.28b, un câble gainé passe autour des deux pannes se rattache au câble inférieur. Ce câble est placé dans une rainure peu profonde, creusée dans les pannes. Une fois le câble placé, des accastillages sont prévus pour solidariser le câble de maintien à celui porteur supérieur. Ils permettent d'immobiliser latéralement les deux pannes sur le câble.

Le câble est choisi dans le catalogue de la Câblerie Namuroise [26] pour qu'il puisse supporter $19.56[kN]$, soit les efforts de vent et un cinquième du poids du câble inférieur. Le diamètre nécessaire pour reprendre les forces en jeu est $4/5[mm]$ ⁹.

Par ailleurs, il faut encore vérifier la pression diamétrale perpendiculaire aux fibres que le câble de maintien exerce sur les pannes. La longueur d'application est $30[cm]$ puisque le câble s'appuie sur deux demi-grumes (voir figure 3.29a). Un câble de $4/5[mm]$ de diamètre crée une pression trop importante. Un câble $8/10[mm]$ est alors préféré, donnant un effort résistant du bois $N_{Rd} = 34.34[kN] \geq 19.56[kN]$.



(a) Forces agissant sur le câble de maintien.



(b) Câble inox gainé 7×7 de La Câblerie Namuroise.

FIGURE 3.29 – Assemblages des poutres de support des panneaux PV aux câbles de travée.

9. Câble gainé de $4[mm]$ de diamètre intérieur et $5[mm]$ de diamètre extérieur.

Conclusion de chapitre

Les structures surplombantes en bois décrites se révèlent pertinentes pour le domaine de l'agri-voltaïsme de par leur dimensionnement raisonnable, les grandes portées atteintes et leur attrait financier. Comme expliqué en début de chapitre, les grumes de bois ont un réel intérêt économique et écologique. À travers cette étude, elles se sont démarquées et montrent leur compatibilité avec la construction de centrales photovoltaïques.

Une des déclinaisons possibles du cas étudié propose des poteaux $D40$ en grumes de $8[m]$ de long et de $0.46[m]$ de diamètre pour les poteaux de bout et $0.27[m]$ pour les poteaux de travée. Les câbles de travée sont de type 6×36 de $28[mm]$ de diamètre avec une âme en acier et les haubans sont du même type avec $40[mm]$ de diamètre. Les poutres de support en grume $C24$ nécessitent $0.26[m]$ de diamètre et un câble gainé de maintien 7×7 de $8/10[mm]$ de diamètre. Les assemblages de cette structure, qui se veulent épurés, sont détaillés supra.

Deuxième partie

Optimisation structurale et financière par les indicateurs morphologiques

Chapitre 4

Les indicateurs morphologiques : qu'est-ce que c'est ?

4.1 Principe et définition

Pour un même projet, une multitude de solutions sont envisageables : comment choisir la meilleure ? Deux concepteurs avec le même parcours scolaire et professionnel sont susceptibles de proposer des solutions très différentes pour la construction tant d'une maison, d'un gratte-ciel, d'un barrage que d'une cabane dans les bois. Comment les départager et sur quels critères ? Ces derniers sont pratiquement infinis : économique, esthétique, social, environnemental, praticité, efficacité, etc.

Les indicateurs morphologiques sont des nombres adimensionnels mettant en relation plusieurs paramètres avec l'objectif de pouvoir comparer deux structures similaires, tout en gardant un œil sur l'ensemble de ces valeurs. Cette comparaison peut se faire sur base de divers critères tels que la déformation que la structure présentera après chargement, sa sensibilité au flambement ou encore le volume de matière utilisée. Une description beaucoup plus détaillée de ces indicateurs est développée dans le livre de Philippe Samyn "Étude de la morphologie des structures : à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement" [38] ou celui de Pierre Latteur, "Calculer une structure" [32]. Dans ce dernier, deux définitions sont proposées pour les indicateurs dits "primaires" et "secondaires" :

- "Un **indicateur morphologique primaire** est un nombre sans dimension qui dépend explicitement : soit de la forme de la structure tel que l'élancement géométrique, soit de la forme de la section des éléments de la structure, soit d'un ensemble de paramètres."
- "Un **indicateur morphologique secondaire** est un nombre adimensionnel qui dépend implicitement d'un ou plusieurs indicateurs primaires et donc indirectement de la forme des sections ou de la structure. Il est l'image d'un phénomène ou d'une grandeur physique."

Le critère étudié dans le cadre de ce mémoire est le volume de matière et bien entendu sa minimisation. C'est selon ce principe qu'il est possible de définir un indicateur morphologique, présenté dans le livre "Calculer une structure"[32], appelé *indicateur de volume*. Cet indicateur est défini mathématiquement tel que :

$$W = \frac{\sigma V}{FL} \quad (4.1)$$

W est adimensionnel et permet donc d'être un repère "impartial" pour comparer deux structures équivalentes, qui sont définies comme ayant la même portée L , le même chargement F et la

même contrainte de dimensionnement σ . Ces trois paramètres étant invariables, il s'agit bien de l'étude du volume V . Chaque indicateur a une expression analytique associée qui permet de définir les meilleures valeurs pour certaines variables de l'expression. La section 4.2 présente un exemple simple de calcul de W pour un câble tendu et calcule son élancement optimum $\frac{L}{H}$ afin de minimiser le volume de ce dit câble.

Dans le cadre de ce travail, un indicateur similaire à l'indicateur de volume W est recherché. Il sera propre aux spécificités des structures agrivoltaïques hautes présentées dans le chapitre 3. En effet, une optimisation n'a été réalisée que pour les structures hautes, les structures basses présentant un moins grand potentiel d'optimisation au vu de leur moindre complexité géométrique.

4.1.1 Pourquoi utiliser les indicateurs morphologiques pour concevoir ?

Comme mentionné, un grand nombre de variables entrent en compte lors de la conception d'une structure. Elles ont toutes leur importance et vouloir les optimiser dans leur ensemble crée un problème multipliement contraint. Une solution est de créer des graphes afin de visualiser l'influence de chaque paramètre sur les concepts de design que l'on souhaite analyser. Cette technique présente toutefois les inconvénients d'une grande complexité de mise en oeuvre, d'une difficulté de garder un fil conducteur d'idées mais aussi de poser des choix qui font sens sans tomber dans trop de subjectivité.

Les structures avec de nombreux paramètres sont de bonnes candidates pour l'utilisation d'indicateurs morphologiques, puisqu'ils permettent de concaténer plusieurs variables ensemble. Il est donc possible de voir leur effet sur un élément précis de l'ouvrage. Les résultats que ces indicateurs créent présentent un double avantage : leur représentation claire ainsi que la possibilité de les appliquer à une multitude de structures similaires. Outre la visualisation claire de l'optimum, les graphes permettent de mesurer l'écart à ce dernier et sont donc un outil de comparaison intéressant. Dans l'exemple en section 4.2, le graphe donne l'augmentation du volume lorsque la variable $\frac{L}{H}$ s'éloigne de l'optimum. Par ailleurs, les résultats affichés sont applicables pour tout câble appuyé en ses extrémités de portée identique et subissant un chargement linéique horizontal. Les graphes créés sont des outils puissants de comparaison et constituent de bons guides lors de la conception d'une structure.

De par cette capacité de comparaison, il est possible de faire des choix de conception inscrits dans la dynamique écologique actuelle ou, en tout cas, de les poser en connaissance de cause. Les indicateurs permettent en quelque sorte de quantifier l'éthique environnementale et économique d'un projet.

4.2 Exemple pratique utilisant les indicateurs morphologiques : câble de portée L

À titre d'exemple, voici le détail de l'application des indicateurs morphologiques à un câble de portée L chargé linéairement. Ici, L étant une donnée fixe, il s'agit de trouver la flèche optimale H tout en garantissant la résistance du câble et une utilisation optimisée de matière. L'exemple du câble tendu semble pertinent au vu de ses nombreuses utilisations pour les structures surplombantes, sujet de l'optimisation de ce travail. Une représentation de ce câble est visible à la figure 4.1.

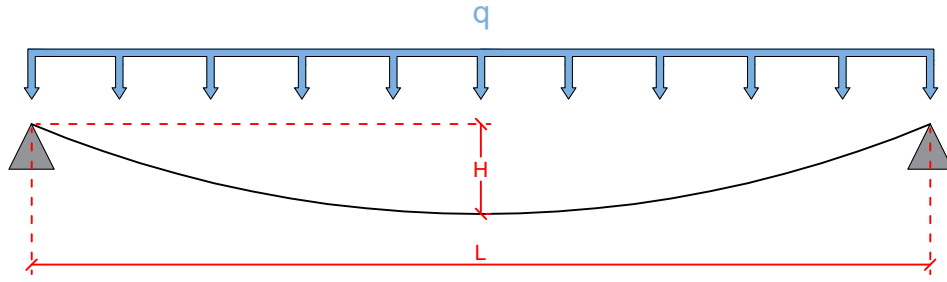


FIGURE 4.1 – Câble de portée L et de flèche H sous chargement linéaire.

L'objectif est de trouver une expression sans dimension exprimant le volume de câble utilisé. La première étape est donc d'exprimer le volume du câble :

$$V_{\text{câble}} = A_{\text{câble}} \times L_{\text{câble}} \quad (4.2)$$

$A_{\text{câble}}$ et $L_{\text{câble}}$ étant respectivement la section et la longueur du câble. Afin de la minimiser, la section est définie comme l'effort résidant dans le câble divisé par la contrainte élastique résistante de ce dernier. Le livre "Calculer une Structure" [32] fournit une expression pour déterminer la longueur d'un câble en fonction de sa portée et de sa flèche, ainsi que l'expression de l'effort maximal dans le câble $N_{\text{câble}}$. Les deux expressions à considérer sont les suivantes :

$$\begin{cases} A_{\text{câble}} = \frac{N_{\text{câble}}}{\sigma_y} \\ L_{\text{câble}} = \frac{L}{2} \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \\ \text{Avec } \kappa = \sqrt{1 + \left(\frac{4H}{L} \right)^2} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} A_{\text{câble}} = \frac{1}{\sigma_y} \frac{qL^2}{8H} \kappa \\ L_{\text{câble}} = \frac{L}{2} \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \end{cases} \quad (4.4)$$

On peut donc obtenir le volume total du câble, qui s'écrit dès lors :

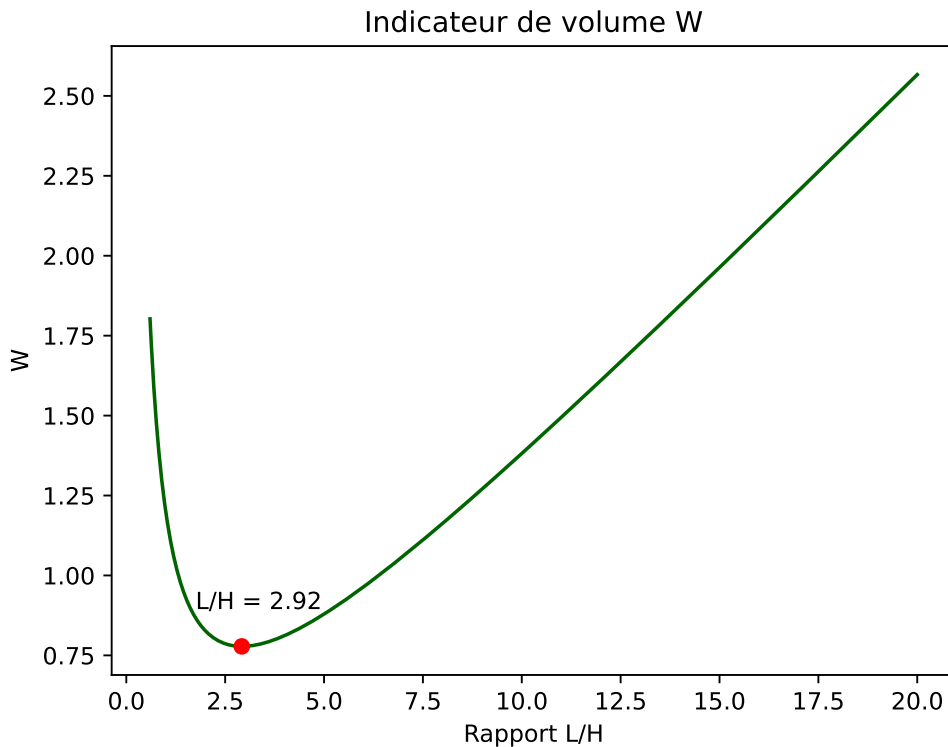
$$V_{\text{câble}} = \frac{1}{\sigma_y} \frac{qL^2}{8H} \kappa \times \frac{L}{2} \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \quad (4.5)$$

Une simple manipulation peut être réalisée afin de faire apparaître le terme de chargement F de l'indicateur de volume W : en effet, F vaut " qL ". En remaniant un peu l'équation 4.5, on obtient :

$$W = \frac{V_{\text{câble}} \sigma_y}{FL} = \frac{L}{16H} \kappa \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) = f \left(\frac{L}{H} \right) \quad (4.6)$$

$$\text{Avec } \kappa = \sqrt{1 + \left(\frac{4H}{L} \right)^2} \quad (4.7)$$

On voit dans l'équation 4.6 que l'indicateur de volume n'est fonction que de l'élançement géométrique du câble, à savoir $\frac{L}{H}$. Autrement dit, pour une structure de portée, chargement et matériaux fixés, le volume du câble peut être minimisé en optimisant le rapport $\frac{L}{H}$. Le même genre de raisonnement est faisable pour les structures agrivoltaïques hautes. En représentant la fonction W de l'équation 4.6, on obtient le graphique à la figure 4.2.

FIGURE 4.2 – Rapport $\frac{L}{H}$ optimum pour un câble chargé linéairement.

L'optimum pour un câble de portée $L = 30[m]$ se trouve à $W = 0.778$ pour $\frac{L}{H} = 2.92$. Pour un câble de contrainte résistante valant $\sigma = 1500[MPa]$ et chargé avec $1[kN/m]$, on trouve un volume de câble à l'optimum de $466.87[cm^3]$. En comparaison, si nous nous éloignons de l'optimum et fixons la flèche H à 3 mètres, le rapport $\frac{L}{H}$ vaudrait 10 et le volume de câble atteindrait $828.83[cm^3]$. Il y aurait donc un gaspillage de 77.5% de matière qui pourrait être évité à l'optimum. Le même exercice peut être fait avec un rapport $\frac{L}{H} = 1.5$. On obtient un volume de $558.82[cm^3]$ et donc un gaspillage de 19.7%. Ces pourcentages de gaspillage peuvent être directement déduits de la figure 4.2 qui permet une bonne représentation graphique de l'effet des variations de $\frac{L}{H}$.

4.3 Pourquoi les appliquer aux structures agrivoltaïques ?

Les structures agrivoltaïques sont sujettes à énormément de variables, co-dépendantes pour la plupart, et leur conception repose sur un compromis optimal, ou pour le moins semi-optimal, entre toutes ces variables. L'objectif premier est qu'une centrale photovoltaïque soit rentable financièrement ; il faut donc concilier production énergétique et agricole, amortissement des installations, frais d'entretien, etc. L'optimisation de ces différentes contraintes doit en outre se faire en corrélation avec la nécessité de répondre à la demande énergétique tout en tenant compte du cours du marché tant des matériaux que de l'énergie. Il faut donc développer un modèle d'optimisation pour de telles centrales, afin qu'elles consomment le moins de matériau possible tout en offrant une couverture solaire acceptable.

Un bon moyen de se rendre compte de la complexité du problème est de représenter ces structures hautes. La figure 4.3 montre plusieurs solutions de centrales pour un même terrain, encadré en

rouge. Laquelle choisir et pourquoi ? Laquelle permet de réduire à la fois la quantité de câbles utilisés, la quantité de poutres portant les panneaux photovoltaïques, les diamètres des poteaux de bois, etc ? Le développement d'un modèle mathématique mettant en relation ces quantités afin de les optimiser et pointer vers la solution optimale permettrait de servir de guide aux concepteurs.

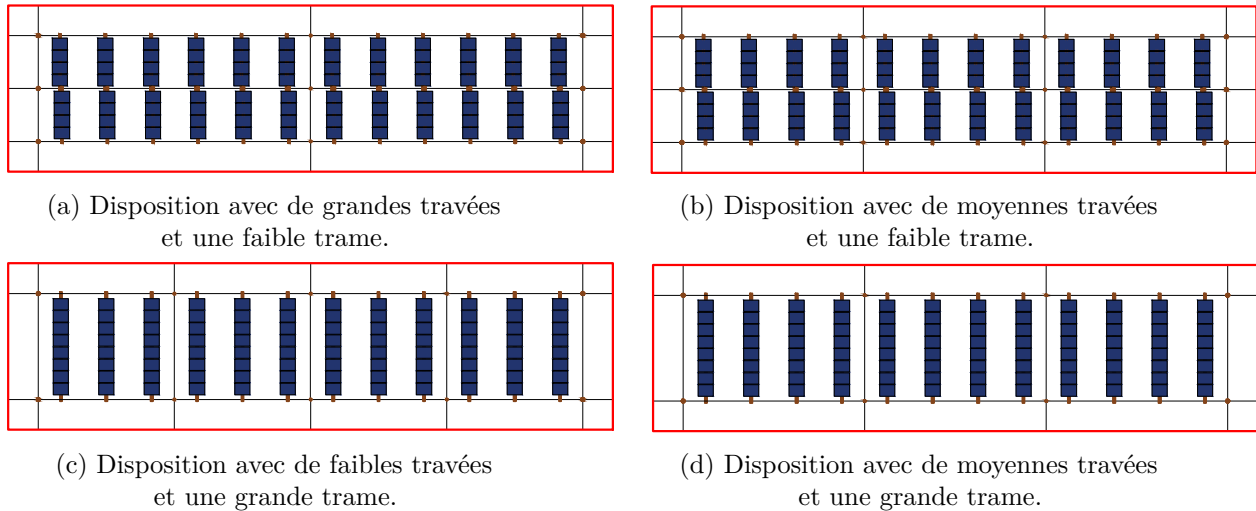


FIGURE 4.3 – Possibles Dimensions de travée et de trame pour un même terrain.

Les structures dites "hautes" sont d'excellentes candidates pour l'application des indicateurs morphologiques de par leur forme générale assez répétitive. Dans l'optique d'optimiser la quantité de matière première mise en oeuvre, l'objectif sera d'obtenir un indicateur de volume commun à certains intervenants sélectionnés pour réaliser cette étude. Dans notre cas, il y a trois intervenants principaux déjà mentionnés supra : les grumes de bois utilisées comme poteaux, les câbles et les poutres sur lesquelles sont posés les panneaux ; ces dernières pouvant être des profilés métalliques ou des grumes de bois. D'autres paramètres pourraient également avoir un impact sur le processus d'optimisation tels que le volume de ballast des fondations ou encore la quantité de micropieux à installer par poteau.

Chapitre 5

Application des indicateurs morphologiques aux structures hautes

5.1 Principe général

Les structures agrivoltaïques sont à haut potentiel d'optimisation et elles sont également propices à l'utilisation des indicateurs morphologiques. L'objectif est de définir un nouvel indicateur de volume soumis aux spécificités des structures hautes, qui aurait un sens physique et serait donc aisément interprétable.

Comme mentionné ci-dessus, l'optimisation réalisée sur les structures présentées est basée sur la quantité de matériaux mis en oeuvre de laquelle découle une optimisation de leur prix, ce qui est au final l'objectif de cette démarche. Minimiser directement le prix global de la structure peut également être réalisé mais l'intérêt de passer par des indicateurs adimensionnels est de généraliser le processus et d'avoir une base commune pour comparer une éventuelle solution à l'optimum.

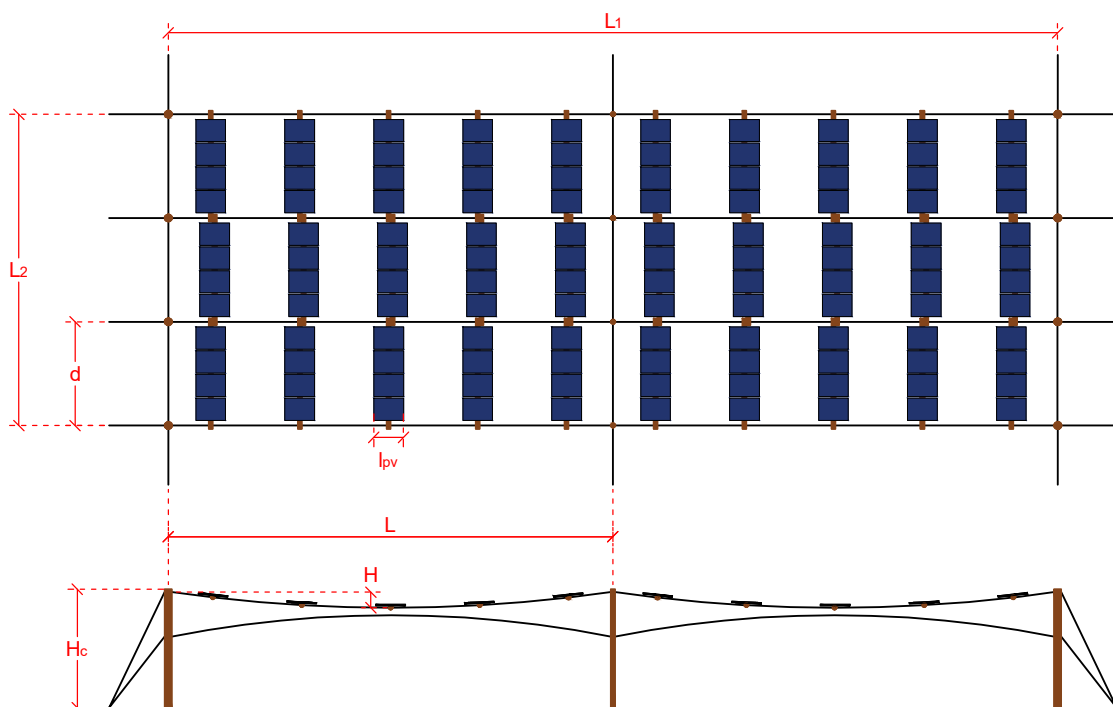


FIGURE 5.1 – Géométrie générale d'une structure haute et ses dimensions.

Dans le contexte des structures agrivoltaïques hautes, on essaye de trouver des dimensions de portée et de trame optimales afin de minimiser la quantité de bois, de câbles et de poutres de support. Pour ce faire, un nouvel indicateur a été défini, propre à l'agencement de ces ouvrages.

Cet indicateur s'appelle Ξ et représente le volume de matière utilisée par volume total d'un module. Un module est défini par la grandeur $Hc \times L \times d$ et est représenté à la figure 5.2. L'intérêt de n'étudier qu'un module est que cela rend l'optimisation de matière indépendante des dimensions du terrain sur lequel la structure sera édifiée. Un autre avantage réside dans le fait de ne pas devoir considérer les "effets de bord", en l'occurrence les points d'ancrage des haubans et des poteaux de bout qui sont assez spécifiques à chaque projet et dépendent fortement de la place disponible et de la qualité du terrain. En somme, cela permet de bénéficier d'un modèle mathématique générique, transposable à nombre de projets.

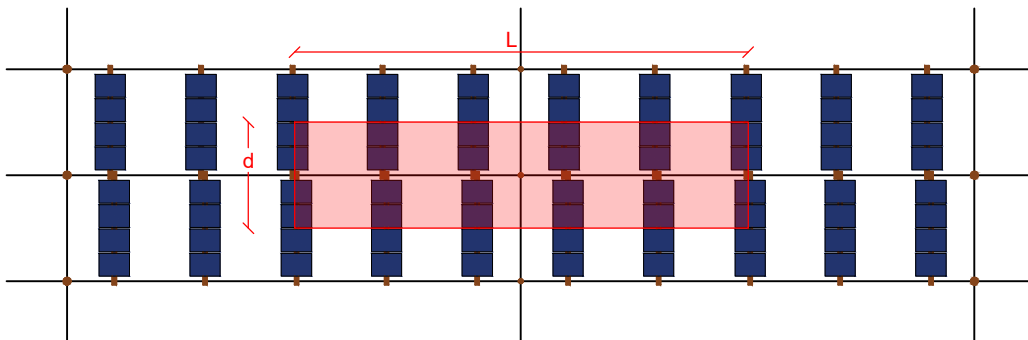


FIGURE 5.2 – Un module d'une structure haute agrivoltaïque.

Le modèle se veut général et linéaire afin de pouvoir analyser plus facilement les optimums. Le processus sera donc très peu discrétisé. Il est entendu par là que la solution de l'optimisation pourrait proposer, par exemple, une largeur d de 3.89 mètres. Imaginons que la largeur standard d'un panneau solaire soit de 1 mètre, on se rend bien compte que placer 3.89 panneaux n'est pas faisable pratiquement et que proposer une largeur d de 4 mètres plutôt que de 3 serait judicieux afin de pouvoir placer un plus grand nombre entier de panneaux. L'optimum obtenu à terme est donc à nuancer de bon sens pratique.

5.2 Classement des paramètres

Lors d'une étude d'optimisation, il est important d'identifier les paramètres impliqués dans les expressions à étudier et de pouvoir raisonnablement les trier afin de les mettre intelligemment en relation et discuter de leur incidence sur le projet.

L'intérêt d'identifier de tels paramètres est de les repérer plus facilement dans une expression plus ou moins compliquée et de potentiellement cibler ceux qui n'ont pas de réelles conséquences sur le comportement de l'optimisation. Autrement dit, cela permet de simplifier les expressions à quelques variables pour n'en tirer que l'essentiel.

Arbitrairement, on peut définir trois catégories de paramètres et variables.

Type I : Un paramètre de type I est une donnée du projet ou encore une caractéristique propre à un matériau. Elle est par définition invariable et intangible tout au long du processus d'optimisation.

Type II : Un paramètre ou variable de type II est une variable au projet par hypothèse tangible et donc sujette à l'optimisation. Elle est représentée en relation avec les autres variables de type II.

Type III : Un paramètre de type III intervient dans les expressions d'optimisation mais est le résultat d'un calcul de dimensionnement. Il est censé être exprimé de manière implicite dans les expressions. Il est influencé par la variation des paramètres de type II mais est intangible.

Il est possible de réaliser un classement des paramètres des structures agrivoltaïques hautes.

- **Type I**

$f_{y,c\grave{a}ble}$: la contrainte élastique résistante des câbles

$f_{y,profil\acute{e}}$: la contrainte élastique résistante des profilés métalliques

$E_{profil\acute{e}}$: le module élastique des profilés

$f_{c,0,k}$: la contrainte résistante à la compression parallèle aux fibres du bois

$f_{m,k}$: la contrainte résistante à la flexion du bois

$E_{0,k}$: le module élastique caractéristique du bois

$E_{0,moyen}$: le module élastique moyen du bois

ζ : le pourcentage de couverture photovoltaïque de la centrale

q_p : le poids surfacique des panneaux solaires

l_{pv} : la hauteur des panneaux photovoltaïques

H : la flèche des câbles

H_c : la hauteur des colonnes

$m_{profil\acute{e}}$: le type de section des poutres de support de trame en profilés métalliques

- **Type II**

d : la distance entre deux trames de colonnes

L : la portée entre deux colonnes

- **Type III**

A_c : la section des colonnes de bois

I_c : l'inertie des colonnes de bois

$A_{c\grave{a}ble}$: la section des câbles de travée

A_{panne} : la section des poutres de support de trame en grumes de bois

I_{panne} : l'inertie des poutres de support de trame en grumes de bois

$A_{profil\acute{e}}$: la section des poutres de support de trame en profilés métalliques

$I_{profil\acute{e}}$: l'inertie des poutres de support de trame en profilés métalliques

Comme on peut le voir, il existe de nombreux paramètres au sein d'un même projet, aussi simple ou complexe qu'il soit. Quatre paramètres méritent particulièrement notre attention. Il s'agit des dimensions géométriques de la centrale, soit L , d , H et H_c .

Les dimensions L et d sont évidemment des paramètres à optimiser. Par exemple, la minimisation du volume des colonnes tend vers de grandes portées et trames tandis que l'optimisation du volume des câbles tend à l'inverse. Quant aux différentes hauteurs H et H_c , le réel intérêt de les optimiser n'apparaît de prime à bord pas limpide. En principe, elles sont sensibles à l'optimisation de par la sensibilité au flambement des colonnes ou encore l'optimum existant du rapport $\frac{L}{H}$ des câbles, démontrés dans l'exemple de la section 4.2. Néanmoins, dans l'application aux structures agrivoltaïques hautes, ces deux paramètres sont fortement bornés. Les dimensions de grumes de bois disponibles sont limitées par la production et à l'éventuelle importation ; ce à quoi se rajoutent les conditions du cahier des charges de projet telle que la hauteur disponible sous les panneaux permettant la circulation de machines. De ce fait, H et H_c sont considérés comme quasi-fixes dans le processus d'optimisation et sont donc placés dans la catégorie des paramètres de type I.

5.3 Les expressions de volume

Pour réaliser l'optimisation du volume des matériaux mis en oeuvre, il faut connaître l'expression de leur volume en fonction des paramètres géométriques des structures hautes visibles à la figure 5.1. Les modules sont étudiés individuellement, comprenant un poteau en bois, une portée de câble et un nombre variable de poutres de support, dépendant directement du pourcentage de couverture photovoltaïque fixé dans les paramètres. Dans les développements ci-après, cette couverture sera représentée par la lettre ζ .

5.3.1 Le volume d'un poteau en grume de bois

Étant donné que l'étude ne se fait que sur un module, seul le volume d'une colonne doit être minimisé. Ce volume s'exprime par l'expression ci-dessous, avec H_c la hauteur de la colonne visible à la figure 5.1 et A_c la section de la colonne de bois.

$$V_c = A_c \times H_c \quad (5.1)$$

Les grumes sont assez sensibles au flambement. On peut s'en convaincre en supposant une grume de 35[cm] de diamètre, section raisonnable pour notre application. Pour un tronc de 8[m] de long, l'élanement s'écrit : $\lambda = \mu H_c \sqrt{\frac{A_c}{I_c}} = 91.43$, avec le coefficient de longueur de flambement $\mu = 1$. Il s'agit ici d'un élanement non-négligeable et donc cet aspect doit être pris en considération lors du dimensionnement.

La seule variable à développer dans l'équation 5.1 est la section de la colonne A_c . Le développement qui suit est tiré du livre "Calculer une structure" [32]. On peut utiliser comme point de départ la formule dite de Rankine, où σ_{crit} est la plus faible contrainte admissible par le matériau avant de flamber :

$$\frac{\sigma_{crit}}{f_{c,0,k}} = \frac{1}{1 + \Lambda^2} \quad (5.2)$$

$$\text{Avec : } \Lambda = \frac{\lambda}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,k}}} \quad \text{l'élanement réduit de la section de bois}$$

$$\lambda = \mu H_c \sqrt{\frac{A_c}{I_c}} \quad \text{l'élanement de la section de bois}$$

Les poteaux étant sensibles au flambement, on peut écrire la force critique pouvant s'appliquer dessus en utilisant l'équation 5.2.

$$F = A_c \times \sigma_{crit} \quad (5.3)$$

$$\iff F = A_c \frac{f_{c,0,k}}{1 + \Lambda^2} \quad (5.4)$$

$$\iff F = A_c \frac{f_{c,0,k}}{1 + \left(\frac{\mu H_c \sqrt{\frac{A_c}{I_c}}}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,k}}} \right)^2} \quad (5.5)$$

En manipulant un peu l'expression 5.5 et en définissant un indicateur primaire de forme $q = \frac{I}{A^2}$, on obtient une expression du second degré en A_c qui a pour solution :

$$A_c = \frac{F}{2f_{c,0,k}} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4(\mu f_{c,0,k} H_c)^2}{\pi^2 q E_{0,k} F}} \right) \quad (5.6)$$

L'indicateur de forme q peut être simplifié dû à l'utilisation de sections circulaires :

$$q = \frac{I}{A^2} = \frac{\pi D_c^4}{64} \frac{16}{\pi^2 D_c^4} = \frac{1}{4\pi} \quad (5.7)$$

À présent, il n'y a plus qu'à développer l'expression de F , à savoir la force qui s'applique sur la colonne, afin d'obtenir une relation de volume ne dépendant que des caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure. Une colonne supporte deux câbles reprenant chacun une certaine surface de panneaux, correspondant à la moitié de la surface d'un module multiplié par la couverture ζ de panneaux, à savoir $2 \times \frac{d \times L \times \zeta}{2}$. Ces dimensions sont identifiables aux figures 5.1 et 5.2. La charge surfacique des panneaux, nommée q_p , comprend le poids propre des panneaux et les charges variables s'y appliquant. F est donc égal à $q_p dL\zeta$.

On obtient une expression finale 5.8 pour le volume d'une colonne en bois, pour laquelle le coefficient de longueur de flambement μ vaut 1. Cette expression est valable pour toutes les colonnes de travée du projet et tient compte de leur sensibilité au flambement.

$$V_c = \frac{q_p \zeta}{2f_{c,0,k}} dLH_c \left[1 + \sqrt{1 + \frac{16 H_c^2}{\pi dL} \frac{f_{c,0,k}^2}{E_{0,k} q_p \zeta}} \right] \quad (5.8)$$

5.3.2 Le volume d'un câble

Seul le volume d'un câble sera exprimé étant donné que l'optimisation n'est réalisée que sur un module. Ce volume s'exprime assez trivialement.

$$V_{câble} = A_{câble} \times L_{câble} \quad (5.9)$$

Il est à nuancer qu'en réalité, le chargement du câble d'un module n'est pas linéaire comme supposé à l'équation 4.3 en page 63. Le câble ne sera donc pas de forme parabolique et ne subira pas les efforts qui y transitent s'il avait eu cette forme. Néanmoins, comme expliqué dans la discussion de la section 3.1.2.2 en page 33, la différence d'effort dans un câble chargé linéairement ou ponctuellement n'est pas majeure et donc, pour l'optimisation de matière, le câble est supposé chargé linéairement afin de simplifier les expressions.

Dans le cas de l'équation 5.9, les deux termes peuvent être développés pour ne faire apparaître que des caractéristiques mécaniques et géométriques de la structure. L'expression de la longueur d'un câble et de son aire ont déjà été présentées à l'équation 4.3 en page 63. La relation 5.9 devient alors :

$$V_{câble} = \frac{\zeta}{f_{y,câble}} \frac{q_p dL^3}{16H} \kappa \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \quad (5.10)$$

$$\text{Avec : } \kappa = \sqrt{1 + \left(\frac{4H}{L} \right)^2}$$

5.3.3 Le volume des grumes de support

Une des deux possibilités pour supporter les panneaux solaires, discutée dans la section "Double solution pour les poutres de support" en page 31, est d'utiliser des grumes de bois supportées par

les câbles de travée. Ces grumes, aussi appelées pannes, travaillent en flexion et sont de section ronde.

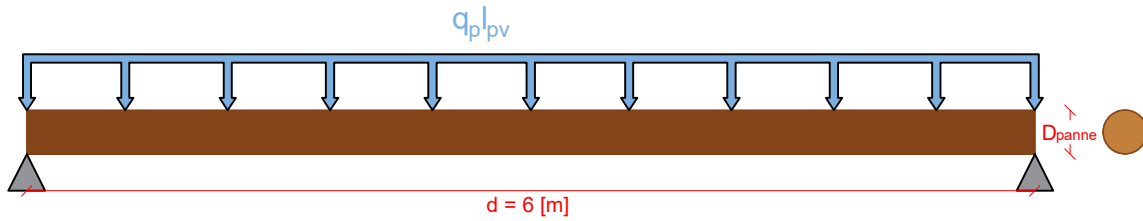


FIGURE 5.3 – Schéma statique d'une panne supportant une trame de panneaux solaires.

De manière assez générique, le volume d'une panne de support est donné par la relation suivante :

$$V_{panne} = A_{panne} \times d \quad (5.11)$$

Le seul terme à développer dans cette expression est l'aire de la panne A_{panne} .

$$A_{panne} = \frac{\pi D_{panne}^2}{4} \quad (5.12)$$

Le terme de diamètre de panne est de type III et ne peut apparaître qu'implicitement dans les expressions de volume afin de réaliser l'optimisation. Un moyen d'exprimer D_{panne} en fonction des caractéristiques mécaniques et géométriques de la structure est de passer par les équations de la *Théorie des Poutres* d'Euler-Bernoulli. Pour une poutre en flexion telle que sur la figure 5.3, le critère de résistance permet d'écrire la relation ci-dessous.

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{él}} = \frac{q_p l_{pv} d^2 D_{panne}}{16 I_{panne}} \leq \frac{f_{m,k} k_{mod}}{\gamma_m} \quad (5.13)$$

$$\text{Avec : } I_{panne} = \frac{\pi D_{panne}^4}{64} \quad (5.14)$$

$$\Rightarrow D_{panne} = \sqrt[3]{\frac{4 q_p l_{pv} d^2 \gamma_m}{\pi f_{m,k} k_{mod}}} \quad (5.15)$$

Il est possible de ré-exprimer l'équation 5.11 en utilisant l'expression 5.15 du diamètre de panne.

$$V_{panne} = \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/3} d^{7/3} \left(\frac{q_p l_{pv} \gamma_m}{f_{m,k} k_{mod}}\right)^{2/3} \quad (5.16)$$

Néanmoins, on peut supposer qu'il y ait plus d'une poutre de support par module. En réalité, il y en a exactement $\frac{L \times \zeta}{l_{pv}}$. Le volume de bois des pannes d'un module s'écrit donc :

$$V_{panne} = \zeta \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/3} L d^{7/3} (l_{pv})^{-1/3} \left(\frac{q_p \gamma_m}{f_{m,k} k_{mod}}\right)^{2/3} \quad (5.17)$$

5.3.4 Le volume des profilés métalliques de support

Les panneaux photovoltaïques peuvent être supportés par des profilés métalliques travaillant en flexion. Ces profilés sont de section carrée creuse avec un rapport épaisseur/dimension transversale $m = \frac{e}{h}$, avec e l'épaisseur de la paroi et h la hauteur du profilé.

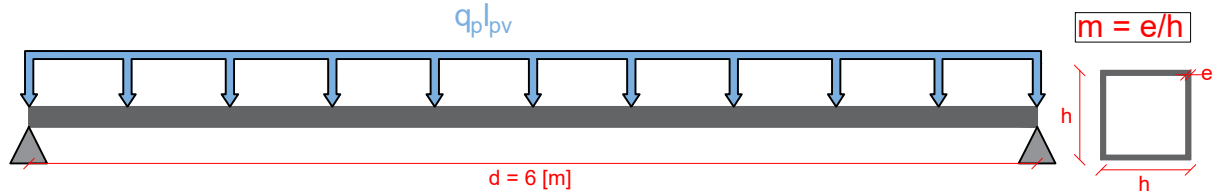


FIGURE 5.4 – Schéma statique d'un profilé supportant une trame de panneaux solaires.

Le volume d'un profilé métallique ainsi que sa section s'écrivent dès lors :

$$\begin{cases} V_{profilé} = A_{profilé} \times d \\ A_{profilé} = h^2 - (h - 2e)^2 = h^2 - (h - 2mh)^2 \end{cases} \quad (5.18)$$

En groupant les équations 5.18, on obtient :

$$V_{profilé} = h^2 - (h - 2mh)^2 \times d \quad (5.19)$$

$$= h^2(1 - (1 - 2m)^2) \times d \quad (5.20)$$

Il est possible également de passer par les équations de la *Théorie des Poutres* d'Euler-Bernoulli afin de faire disparaître le paramètre h qui est de type III. Pour un profilé en flexion tel que sur la figure 5.4, le critère de résistance est donné par la relation suivante.

$$\sigma_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{W_{él}} = \frac{q_p l_{pv} d^2 h}{16 I_{profilé}} \leq f_{y,profilé} \quad (5.21)$$

L'inertie d'une section carrée creuse est fonction de sa hauteur et de l'épaisseur de ses parois.

$$I_{profilé} = \frac{h^4}{12} - \frac{(h - 2e)^4}{12} \quad (5.22)$$

$$= \frac{1}{12}(1 - (1 - 2m)^4)h^4 \quad (5.23)$$

Finalement, en combinant les équations 5.21 et 5.23, on peut écrire la relation suivante :

$$h = \sqrt[3]{\frac{3q_p l_{pv} d^2}{4f_{y,profilé}(1 - (1 - 2m)^4)}} \quad (5.24)$$

Grâce aux équations 5.20 et 5.24, on obtient une expression de volume d'un profilé métallique, dépendant uniquement de caractéristiques mécaniques et géométriques de la structure.

$$V_{profilé} = d^{7/3} \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} \left(\frac{q_p l_{pv}}{f_{y,profilé}}\right)^{2/3} \frac{(1 - (1 - 2m)^2)}{(1 - (1 - 2m)^4)^{2/3}} \quad (5.25)$$

À l'instar des poutres en grumes de bois, on peut supposer qu'il y ait plus d'un profilé par module. Il y en a exactement $\frac{L \times \zeta}{l_{pv}}$, leur volume total s'écrit donc :

$$V_{profilé} = L d^{7/3} \zeta \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} (l_{pv})^{-1/3} \left(\frac{q_p}{f_{y,profilé}}\right)^{2/3} \Gamma \quad (5.26)$$

$$\text{Avec : } \Gamma = \frac{(1 - (1 - 2m)^2)}{(1 - (1 - 2m)^4)^{2/3}}$$

5.4 Définition de l'indicateur $\Xi \sim \Xi$

Les expressions des volumes des matériaux d'un module sont présentées aux équations 5.8, 5.10, 5.17 et 5.26. Il est intéressant de les exprimer en fonction d'un même nombre adimensionnel afin de pouvoir optimiser la quantité de matériau d'un volume en général. Il faut également que ce volume soit adimensionnalisé et de forme commune aux trois éléments à optimiser.

L'expression suivante permet de mettre en relation le volume d'un matériau et la forme du module.

$$\frac{V_{\text{matériau}}}{dLH_c} \quad (5.27)$$

Il est aussi intéressant d'y ajouter une notion de chargement, c'est à dire du terme q_p qui représente le poids surfacique des panneaux. Elle prend dès lors la forme suivante :

$$\frac{V_{\text{matériau}}}{dLH_c q_p} \quad (5.28)$$

En opérant de la sorte, l'expression n'est plus adimensionnelle. Un moyen de lui rendre sa propriété est de la multiplier par la résistance élastique d'un matériau, choisi arbitrairement comme celle des câbles :

$$\Xi = \frac{V_{\text{matériau}} f_{y,\text{câble}}}{dLH_c q_p} \quad (5.29)$$

Cette expression ainsi obtenue est dénommée " Ξ ". Il s'agit d'un indicateur morphologique adimensionnel permettant d'exprimer le volume d'un matériau d'un module de volume dLH_c et ce pour un certain chargement surfacique q_p . C'est à dire que pour des structures dites "similaires", cette expression sera valable peu importe les paramètres d , L , H_c , q_p et $f_{y,\text{câble}}$.

5.4.1 Expression de l'indicateur de colonne Ξ_c

Le volume des colonnes est exprimé à l'équation 5.8. L'enjeu est de faire apparaître l'indicateur morphologique Ξ_c dans le membre de gauche afin de découvrir son expression analytique dans le membre de droite. Fortuitement, les termes $dLH_c q_p$ sont déjà disponibles dans le membre de droite et l'expression peut se réécrire comme :

$$\frac{V_c}{dLH_c q_p} = \frac{\zeta}{2f_{c,0,k}} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{16 H_c^2}{\pi dL} \frac{f_{c,0,k}^2}{E_{0,k} q_p \zeta}} \right] \quad (5.30)$$

Afin de faire apparaître le terme $f_{y,\text{câble}}$ manquant pour compléter le terme de gauche et révéler Ξ , on définit un rapport de contraintes résistantes α :

$$\alpha = \frac{f_{c,0,k}}{f_{y,\text{câble}}} \quad (5.31)$$

L'expression 5.30 se réécrit alors :

$$\Xi_c = \frac{V_c f_{y,\text{câble}}}{dLH_c q_p} = \frac{\zeta}{2\alpha} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{16 H_c^2}{\pi dL} \alpha^2 \frac{f_{y,\text{câble}}^2}{E_{0,k} q_p \zeta}} \right] \quad (5.32)$$

Le paramètre H , qui est la flèche du câble, est sensiblement plus variable que H_c , la hauteur des colonnes. En effet, cette dernière dépend énormément des bois disponibles et donc, la hauteur

disponible sous structure est majoritairement réglée par la flèche du câble. C'est pourquoi on introduit un rapport de hauteur β qui est plus susceptible d'être constant et est défini comme :

$$\beta = \frac{H}{H_c} \quad (5.33)$$

Une fois l'équation 5.33 introduite dans l'expression 5.32, on obtient l'expression finale de l'indicateur de volume de colonne d'un module. On peut également manipuler un peu l'expression à l'intérieur de la racine carrée en la multipliant par $\frac{L}{L}$ afin de faire apparaître des rapports remarquables comme l'élanement géométrique du câble $\frac{L}{H}$ ou encore $\frac{L}{d}$.

$$\Xi_c = \frac{\zeta}{2\alpha} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{16}{\pi} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \frac{L}{d} \frac{\alpha^2}{\beta^2} \theta} \right] \quad (5.34)$$

$$\text{Avec : } \theta = \frac{f_{y,\text{câble}}^2}{E_{0,k} q_p \zeta}$$

5.4.2 Expression de l'indicateur de câble $\Xi_{\text{câble}}$

Afin de faire apparaître une expression pour $\Xi_{\text{câble}}$, on utilise comme point de départ l'expression du volume d'un câble 5.10. Les termes q_p , d , L et $f_{y,\text{câble}}$ sont déjà disponibles dans le membre de droite pour faire apparaître $\Xi_{\text{câble}}$ à gauche.

$$\frac{V_{\text{câble}} f_{y,\text{câble}}}{dLq_p} = \zeta \frac{L^2}{16H} \kappa \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \quad (5.35)$$

$$\text{Avec : } \kappa = \sqrt{1 + \left(\frac{4H}{L} \right)^2}$$

On peut faire apparaître la hauteur de colonne H_c en divisant chaque côté de l'équation par cette dernière.

$$\Xi_{\text{câble}} = \frac{V_{\text{câble}} f_{y,\text{câble}}}{dLH_c q_p} = \zeta \frac{L^2}{16HH_c} \kappa \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \quad (5.36)$$

Pour simplifier le membre de droite, on utilise la relation de β en équation (5.33) et on fait apparaître l'élanement géométrique du câble $\frac{L}{H}$. On obtient finalement l'expression de l'indicateur morphologique de volume de câble d'un module.

$$\Xi_{\text{câble}} = \zeta \frac{1}{16} \left(\frac{L}{H} \right)^2 \beta \kappa \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \quad (5.37)$$

$$\text{Avec : } \kappa = \sqrt{1 + \left(\frac{4H}{L} \right)^2}$$

5.4.3 Expression de l'indicateur de poutres de support en bois Ξ_{panne}

On peut utiliser l'expression 5.17 en page 72 du volume des pannes de support en grumes pour faire apparaître l'indicateur Ξ_{panne} .

$$V_{panne} = \zeta \left(\frac{\pi}{4} \right)^{1/3} L d^{7/3} (l_{pv})^{-1/3} \left(\frac{q_p \gamma_m}{f_{m,k} k_{mod}} \right)^{2/3} \quad (5.38)$$

En multipliant les deux côtés de l'équation par $\frac{f_{y,c\grave{a}ble}}{d L H_c q_p}$, Ξ_{panne} se révèle dans le membre de droite. On peut également homogénéiser les expressions d'indicateur entre elles en faisant apparaître β et H de l'équation 5.33 afin de faire disparaître H_c .

$$\Xi_{panne} = \zeta \beta \left(\frac{\pi}{4} \right)^{1/3} \frac{d^{4/3}}{H} f_{y,c\grave{a}ble} (q_p l_{pv})^{-1/3} \left(\frac{\gamma_m}{k_{mod} f_{m,k}} \right)^{2/3} \quad (5.39)$$

Cet indicateur est uniquement fonction de paramètre de type I et II et peut donc être représenté, avec bien sûr l'objectif de l'optimiser. Il est appelé indicateur morphologique de volume des pannes de support d'un module.

5.4.4 Expression de l'indicateur de poutres de support en profilé métallique $\Xi_{profil\acute{e}}$

À nouveau, pour mettre en relation l'indicateur de volume de profilé $\Xi_{profil\acute{e}}$ et son expression analytique, on utilise comme point de départ l'expression 5.26 du volume de profilés par module à la page 73.

$$V_{profil\acute{e}} = L d^{7/3} \zeta \left(\frac{3}{4} \right)^{2/3} (l_{pv})^{-1/3} \left(\frac{q_p}{f_{y,profil\acute{e}}} \right)^{2/3} \Gamma \quad (5.40)$$

$$\text{Avec : } \Gamma = \frac{(1 - (1 - 2m)^2)}{(1 - (1 - 2m)^4)^{2/3}}$$

On peut faire apparaître Ξ en multipliant les deux côtés de l'équation par $\frac{f_{y,c\grave{a}ble}}{d L H_c q_p}$.

$$\Xi_{profil\acute{e}} = \frac{V_{profil\acute{e}} f_{y,c\grave{a}ble}}{d L H_c q_p} = \zeta \left(\frac{3}{4} \right)^{2/3} \frac{d^{4/3}}{H_c} f_{y,c\grave{a}ble} (q_p l_{pv})^{-1/3} f_{y,profil\acute{e}}^{-2/3} \Gamma \quad (5.41)$$

En utilisant la relation de β (5.33) en page 75, on peut exprimer $\Xi_{profil\acute{e}}$ en fonction de H , ce qui permet une certaine uniformité entre les expressions de Ξ . On obtient donc l'expression de l'indicateur de volume des profilés métalliques de support d'un module.

$$\Xi_{profil\acute{e}} = \zeta \beta \left(\frac{3}{4} \right)^{2/3} \frac{d^{4/3}}{H} f_{y,c\grave{a}ble} (q_p l_{pv})^{-1/3} f_{y,profil\acute{e}}^{-2/3} \Gamma \quad (5.42)$$

$$\text{Avec : } \Gamma = \frac{(1 - (1 - 2m)^2)}{(1 - (1 - 2m)^4)^{2/3}}$$

Conclusion de chapitre

En guise de conclusion de chapitre, voici une synthèse des indicateurs Ξ qui seront utilisés dans le cadre de l'optimisation du chapitre 6.

- L'indicateur de volume de colonne d'un module.

$$\begin{aligned}\Xi_c &= \frac{\zeta}{2\alpha} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{16}{\pi} \left(\frac{H}{L}\right)^2 \frac{L}{d} \frac{\alpha^2}{\beta^2} \theta} \right] \\ \Rightarrow \Xi_c &= f(H, L, d, \zeta, \alpha, \beta, \theta)\end{aligned}\tag{5.43}$$

- L'indicateur de volume de câble d'un module.

$$\begin{aligned}\Xi_{c\grave{a}ble} &= \zeta \frac{1}{16} \left(\frac{L}{H}\right)^2 \beta \kappa \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right) \\ \Rightarrow \Xi_{c\grave{a}ble} &= f(H, L, \zeta, \beta)\end{aligned}\tag{5.44}$$

- L'indicateur de volume des pannes de support d'un module.

$$\begin{aligned}\Xi_{panne} &= \zeta \beta \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/3} \frac{d^{4/3}}{H} f_{y,c\grave{a}ble} (q_p l_{pv})^{-1/3} \left(\frac{\gamma_m}{k_{mod} f_{m,k}} \right)^{2/3} \\ \Rightarrow \Xi_{panne} &= f(H, d, \zeta, \beta, f_{y,c\grave{a}ble}, f_{m,k}, l_{pv}, q_p)\end{aligned}\tag{5.45}$$

- L'indicateur de volume des profilés métalliques de support d'un module.

$$\begin{aligned}\Xi_{profil\acute{e}} &= \zeta \beta \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} \frac{d^{4/3}}{H} f_{y,c\grave{a}ble} (q_p l_{pv})^{-1/3} f_{y,profil\acute{e}}^{-2/3} \Gamma \\ \Rightarrow \Xi_{profil\acute{e}} &= f(H, d, \zeta, \beta, \Gamma, f_{y,c\grave{a}ble}, f_{y,profil\acute{e}}, l_{pv}, q_p)\end{aligned}\tag{5.46}$$

Chapitre 6

Résultats de l'optimisation par les indicateurs de volume

Une fois les expressions des volumes et des indicateurs Ξ obtenues, il est possible de les représenter afin d'éventuellement identifier des valeurs minimisant le volume total de matériaux utilisés. Tous les graphiques présentés dans les sections ci-dessous ont été produits avec des scripts `Python` dont un exemple se trouve en annexe G.

Représenter chaque indicateur indépendamment dans un premier temps permet d'observer au cas par cas l'ordre de grandeur de ces indicateurs et donc de déduire la proportion de volume de chaque élément dans le volume total d'un module. Au plus la valeur de Ξ d'un élément est élevée, au plus cet élément pèsera dans l'optimisation finale. Les optimisations sont réalisées pour une portée L allant de 5 à 50[m] et une travée d allant de 2 à 10[m]. Ces domaines permettent de couvrir la majeure partie des applications possibles. L'ensemble des valeurs numériques utilisées pour les graphes sont présentées à l'annexe A.

6.1 Optimisation de la géométrie pour les poteaux de bois

Afin de représenter au mieux un éventuel optimum de dimensions qui minimise le volume de bois utilisé pour les colonnes, il faut choisir quels paramètres seront représentés et comment ? Dans l'expression de l'indicateur de volume de colonne (5.34), on peut identifier les deux paramètres de type II d'intérêt : L et d . Il a été choisi de représenter L sur l'axe des abscisses et d comme paramètre car ce dernier est sensiblement plus borné que L . De fait, d est limité par les longueurs disponibles des poutres de support et la capacité d'un engin à circuler dans cette largeur. L'ensemble des autres valeurs présentes sont constantes ou peuvent être considérées comme telles. Il s'agit notamment de la flèche du câble H ainsi que du paramètre β mettant en relation H et H_c . Cette simplification est justifiée dans la section 5.2 "Classement des paramètres" en page 68.

$$\Xi_c = \frac{\zeta}{2\alpha} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{16}{\pi} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \frac{L \alpha^2}{d \beta^2} \theta} \right]$$

$$\text{Avec : } \theta = \frac{f_{y,\text{câble}}^2}{E_{0,k} q_p \zeta}$$

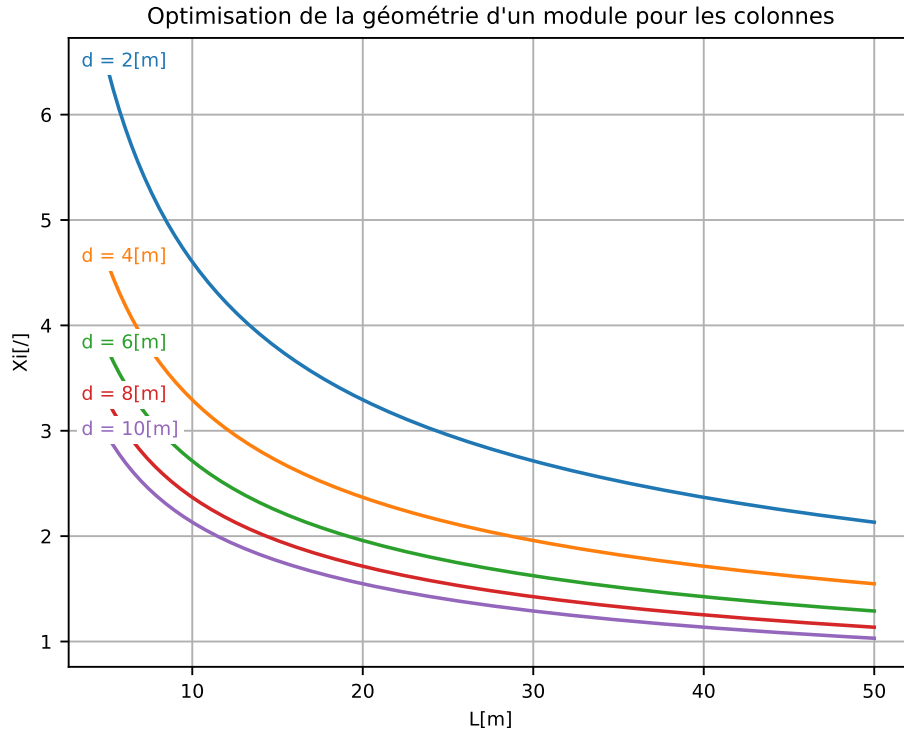


FIGURE 6.1 – Optimisation de la géométrie d'un module pour les colonnes.

Comme on peut voir sur la figure 6.1 que le volume de colonne pour un module est minimisé lorsque la portée L et trame d augmentent. Il faut cependant nuancer que ceci n'est pratiquement pas réalisable et que, pour des valeurs de L assez hautes, augmenter d induit un moins grand gain. On remarquera que l'indicateur Ξ_c est le seul indicateur qui tend à faire augmenter les dimensions L et d . Fortuitement, l'ordre de grandeur de cet indicateur est suffisant que pour peser dans la mise en commun des indicateurs et donc nous permettre de dégager des valeurs d'optimum. Cet aspect sera traité dans la section 6.4 à la page 83.

6.2 Optimisation de la géométrie pour les câbles

Comme on peut le voir dans l'expression ci-dessous, l'indicateur de volume de câble d'un module est fonction uniquement du rapport $\frac{L}{H}$. Comme expliqué dans la section "5.2", Classement des paramètres, le terme H est considéré comme quasi constant et la représentation de l'indicateur ne dépend donc que de L .

$$\Xi_{câble} = \zeta \frac{1}{16} \left(\frac{L}{H} \right)^2 \beta \kappa \left(\kappa + \frac{L}{4H} \ln \left[\frac{4H}{L} + \kappa \right] \right)$$

$$\text{Avec : } \kappa = \sqrt{1 + \left(\frac{4H}{L} \right)^2}$$

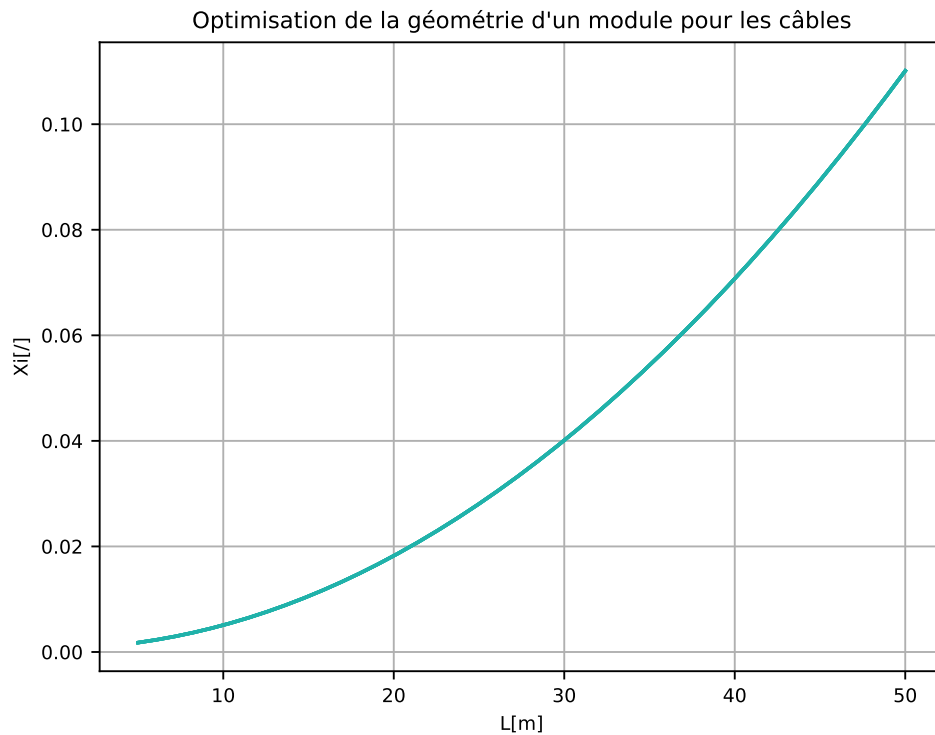


FIGURE 6.2 – Optimisation de la géométrie d'un module pour les câbles.

L'indicateur $\Xi_{c\grave{a}ble}$ montre que le volume de câble par module est optimisé pour la plus faible portée L possible et est indépendant de la largeur d . On constate également que l'ordre de grandeur de l'indicateur de volume de câble est bien inférieur à celui des colonnes et pèsera donc moins dans la mise en commun.

6.3 Optimisation de la géométrie pour les poutres de support

Une double solution pour les poutres de support étant proposée, la représentation des deux indicateurs est présentée ci-dessous. Qui plus est, en comparant l'expression de l'indicateur de panne à celle de l'indicateur de profilé, on observe de grandes similitudes. Cela semble normal étant donné qu'elles proviennent des mêmes équations et ne diffèrent que par leurs termes d'inertie et de résistance. Les deux expressions sont indépendantes de L .

Les deux graphiques obtenus sont donc très similaires également mais l'ordre de grandeur des indicateurs est quant à lui bien différent. En effet, de par la différence de type de section, la quantité de matière par volume est très différente.

L'indicateur de volume de panne par module étant assez élevé, son optimisation pèsera nettement plus lors de la mise en commun que dans la solution où les profilés métalliques serviraient de poutres de support. Cette différence permettra d'identifier différents optima, convenant davantage à l'une ou l'autre solution.

Optimisation pour les pannes en grumes de bois

$$\Xi_{panne} = \zeta\beta \left(\frac{\pi}{4}\right)^{1/3} \frac{d^{4/3}}{H} f_{y,c\grave{a}ble} (q_p l_{pv})^{-1/3} \left(\frac{\gamma_m}{k_{mod} f_{m,k}}\right)^{2/3}$$

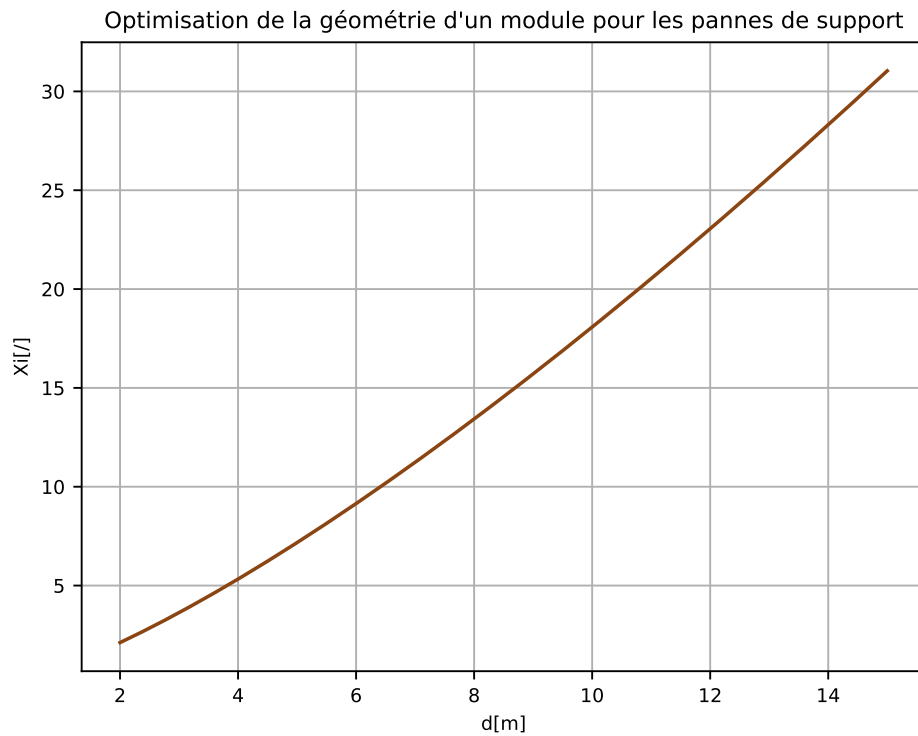


FIGURE 6.3 – Optimisation de la géométrie d'un module pour les pannes de support.

Optimisation pour les profilés métalliques

$$\Xi_{profilé} = \zeta\beta \left(\frac{3}{4}\right)^{2/3} \frac{d^{4/3}}{H} f_{y,c\grave{a}ble} (q_p l_{pv})^{-1/3} f_{y,profilé}^{-2/3} \Gamma$$

$$\text{Avec : } \Gamma = \frac{(1 - (1 - 2m)^2)}{(1 - (1 - 2m)^4)^{2/3}}$$

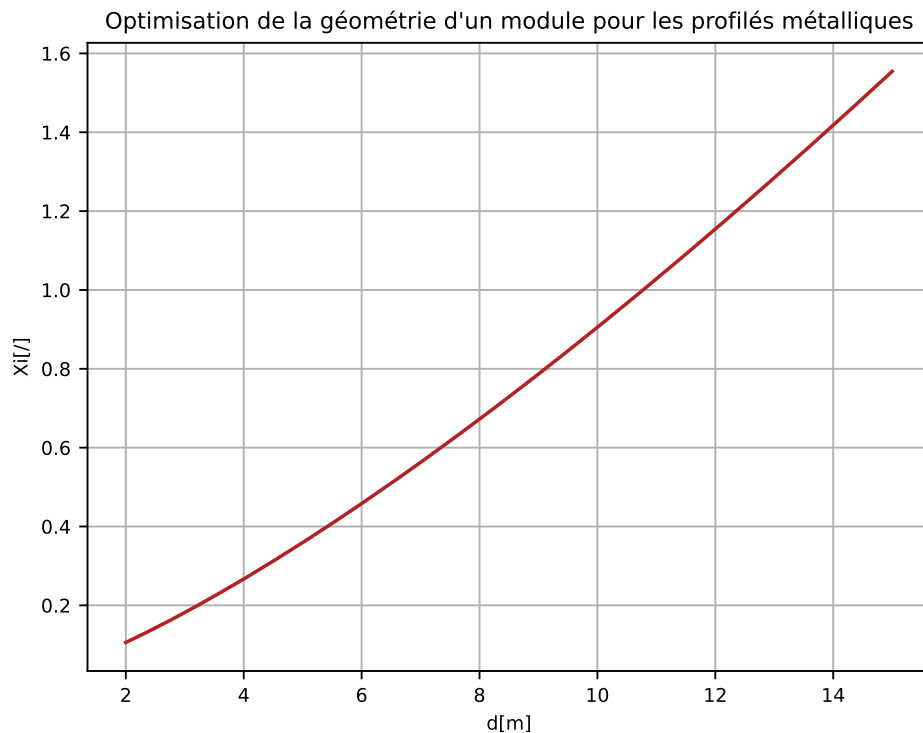


FIGURE 6.4 – Optimisation de la géométrie d'un module pour les profilés métalliques de support.

6.4 Mise en commun des indicateurs et optimum général

L'objectif de l'optimisation est de mettre en relation tous les indicateurs de volume et de pointer d'éventuels optima des dimensions géométriques L et d . La mise en commun consiste simplement à additionner les indicateurs Ξ de chaque intervenant.

Il y a quatre grandes variantes d'optimum à analyser :

- Mise en commun des indicateurs de volume non pondérés
 - En utilisant des pannes de support
 - En utilisant des profilés
- Mise en commun des indicateurs de volume pondérés par un coefficient relatif aux prix de chaque intervenant
 - En utilisant des pannes de support
 - En utilisant des profilés

En effet, comme montré dans les sections précédentes, les ordres de grandeur de chaque indicateur sont relativement variables ce qui a un impact sur l'optimisation : l'optimum général aura tendance à se rapprocher de l'optimum de l'élément qui est le plus volumineux au sein d'un module. Une manière d'équilibrer le processus est de pondérer l'indicateur de chaque élément par un coefficient proportionnel à son prix volumique. Les matériaux en bois sont plus volumineux mais moins chers et les éléments en acier sont plus discrets mais bien plus coûteux. Inclure la dimension du prix permet de se rapprocher de l'objectif à terme de ces centrales, à savoir être rentable.

Mise en commun des indicateurs de volume non pondérés

Dans un premier temps, on peut s'attarder sur l'optimisation sans considérer le poids économique de chaque élément.

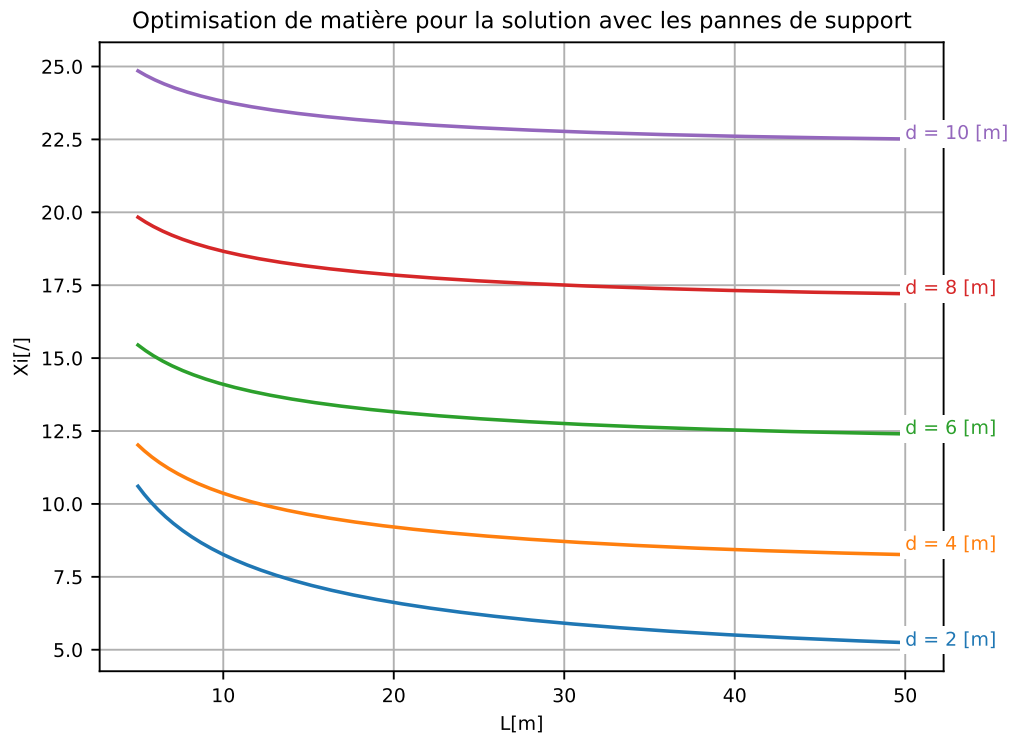


FIGURE 6.5 – Optimisation pour tous les éléments avec des pannes de support, sans considérer le poids économique de chacun.

Comme on peut le voir sur le graphique 6.5, l'optimum tendrait à avoir un d le plus faible possible et un L le plus grand possible. La minimisation de la trame est due à l'utilisation de panne en bois qui, comme on peut le voir sur le graphique 6.3, tend à avoir un d petit afin de minimiser Ξ .

En revanche, l'optimisation selon les colonnes à la figure 6.1 tend à maximiser la valeur de d , mais étant donné que Ξ_c est inférieur à Ξ_{panne} , le Ξ_{panne} est dominant au regard de d . La valeur L est réglée essentiellement pas la contribution des colonnes à l'optimisation étant donné que le poids de $\Xi_{câble}$, comme on peut le voir à la figure 6.2, est bien inférieur à celui de Ξ_c . La différence d'ordre de grandeur entre Ξ_c et $\Xi_{câble}$ provient simplement du fait que les câbles sont bien moins volumineux que les colonnes.

L'optimisation générale avec les profilés métalliques de support, sans considérer de coefficients pondérateurs, fournit les graphes à la figure 6.6.

Représenter Ξ en trois dimensions (3D) permet d'obtenir des valeurs d'optimum précises et parfois une meilleure visualisation générale. Les courbes rouges sur ces vues 3D représentent les minimums d'une variable lorsque l'autre est fixe. Le point de croisement est l'optimum général. La représentation en deux dimensions garde son atout de simplicité de compréhension.

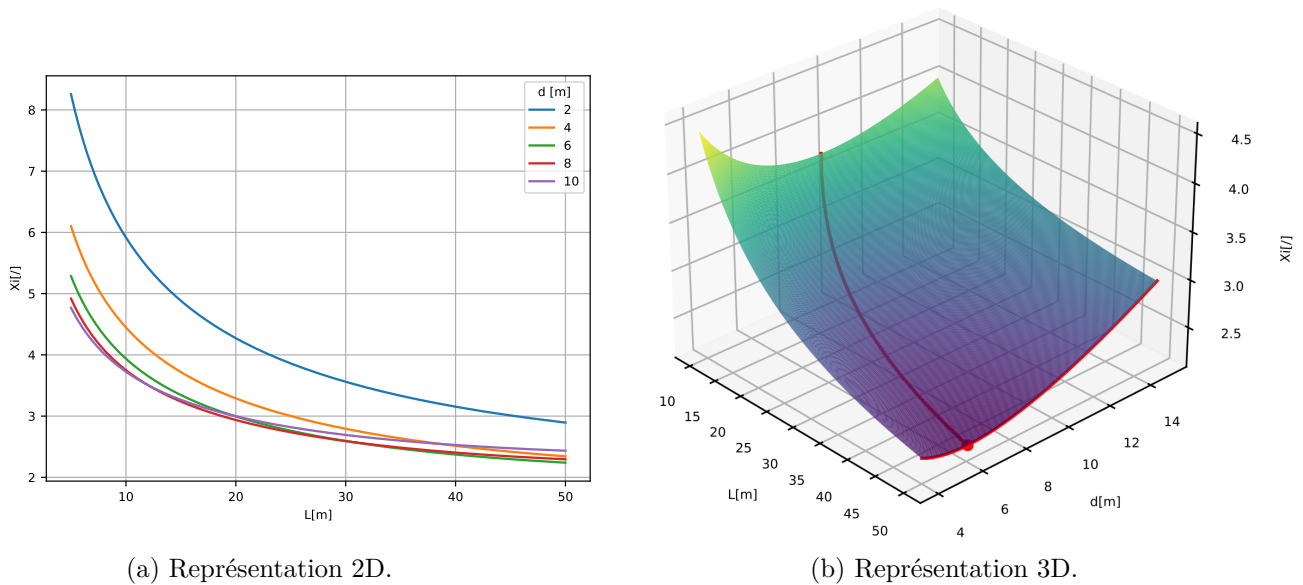


FIGURE 6.6 – Optimisation pour tous les éléments avec des profilés métalliques de support, sans considérer le poids économique de chacun.

En regardant les graphes à la figure 6.6, qui présentent l’optimisation générale lorsque l’on utilise des poutres en profilés métalliques, montrent que la tendance est un peu différente que celle observée avec les poutres de supports en grumes de bois. Le d optimal est environ à $6[m]$ pour un L qui tend à être maximisé. Cet optimum pour L est identique à la solution avec les pannes de support car les poutres n’ont pas d’incidence sur la portée. Néanmoins, étant donné que $\Xi_{profilé}$ pèse moins vis-à-vis de Ξ_c , la contribution des colonnes à l’optimisation de d est significative et change la donne, permettant ainsi de dégager un optimum pour les trames.

Mise en commun des indicateurs de volume pondérés

On se rend compte qu’aucune vraie solution n’est fournie lorsque l’on ne considère que le volume des matériaux. La forte différence de volume d’un élément de module à l’autre ne permet pas de les comparer efficacement dans un même graphe, ou en tout cas, les compare sans réel fond.

Afin de pondérer la contribution de chaque élément à l’optimisation, un coefficient relatif à leur prix volumique respectif peut leur être appliqué. Ramener l’optimisation au prix de chaque élément permet de la nuancer, car par exemple, l’utilisation d’un m^3 d’acier a un tout autre impact sur le projet que l’utilisation d’un m^3 de bois. Ce constat est opportun au vu de la double solution qui est proposée pour les poutres de support : grumes de bois ou profilés en acier. Les coefficients relatifs aux prix appliqués à chacun des Ξ sont présentés et justifiés à l’annexe A.

Si l’on considère la solution avec les pannes de support, l’optimisation nous permet d’obtenir les graphiques de la figure 6.7.

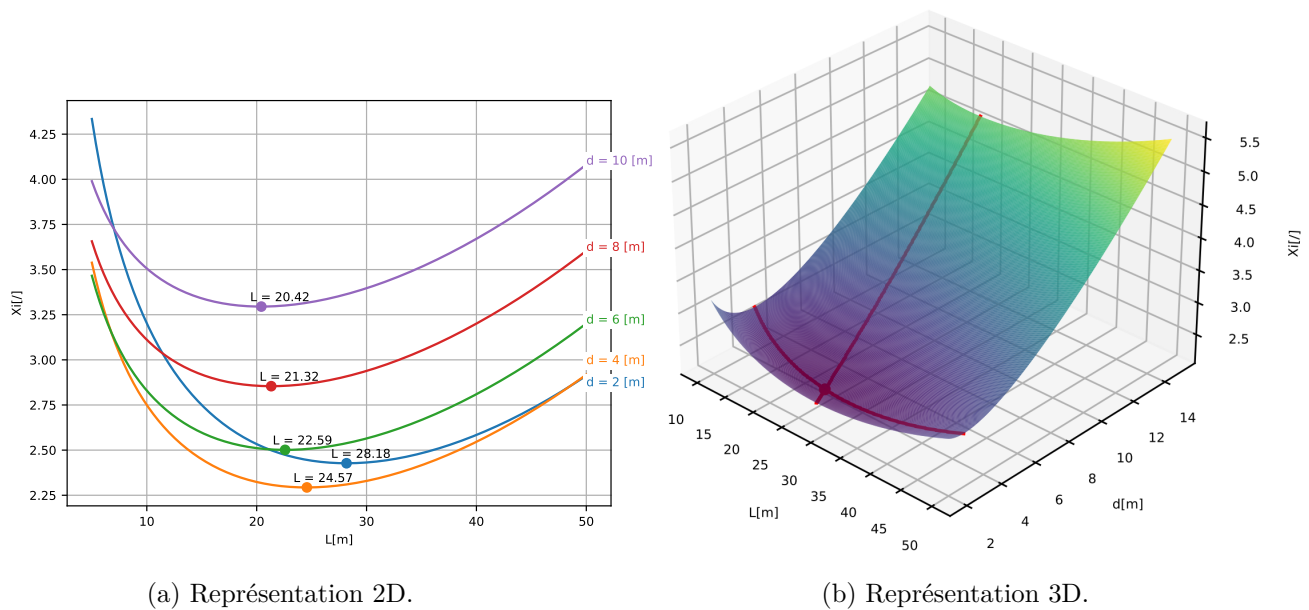


FIGURE 6.7 – Optimisation pour tous les éléments avec des pannes de support en pondérant par un coefficient relatif un prix.

Pondérer avec un coefficient relatif aux prix nous permet de dégager un optimum franc : $d = 3.43[m]$ et $L = 25.24[m]$. De par le prix moindre des pannes de support, leur contribution à l'optimisation perd de l'influence et il est possible de dégager une trame d optimale. Il en est de même pour la contribution des câbles à l'optimisation de la portée L . Ils sont onéreux et donc, malgré leur faible volume, ils pèsent suffisamment dans le processus que pour dégager une portée optimale.

L'optimisation générale avec les profilés métalliques de support fournit le graphe de la figure 6.8.

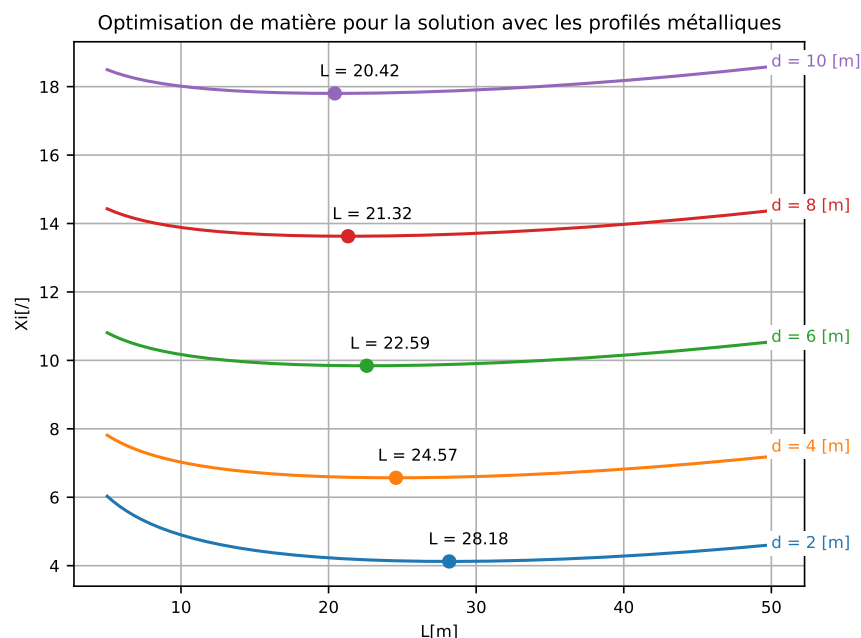


FIGURE 6.8 – Optimisation pour tous les éléments avec des profilés métalliques de support en pondérant par un coefficient relatif un prix.

On observe sur la figure 6.8 qu'il est également possible de dégager un optimum pour la portée L mais pas pour la trame d . En effet, le coefficient relatif au prix des profilés métalliques est trop élevé que pour laisser la contribution des colonnes à l'optimisation de d être significative. Seule la portée possède un réel optimum.

On peut conclure que la solution avec les poutres de support en grumes de bois, aussi appelée pannes, est bonne candidate pour cette optimisation car elle offre un optimum réaliste pour les deux variables. Il faut toutefois nuancer ce constat puisque le volume de matériaux de cette solution est plus conséquent. Il suffit de comparer les valeurs de Ξ_{panne} et $\Xi_{profilé}$ non-pondérées aux figures 6.5 et 6.6. Néanmoins, en regardant les figures 6.7 et 6.8 des Ξ pondérés, on voit que la solution avec des profilés métalliques est plus onéreuse. Cette dernière n'offre un optimum réaliste que pour la portée, mais reste pertinente dans des applications d'agrivoltaïsme.

6.5 Application de l'optimisation pour déterminer le prix surfacique de la structure

Appliquer un coefficient multiplicateur à Ξ n'est pas suffisant lorsque l'on souhaite obtenir le prix effectif de la structure. Dans des projets de cette envergure, le prix des ouvrages sont généralement donné à l'hectare. Il est donc pertinent de pouvoir visualiser le prix surfacique d'une installation et ce, en fonction de sa géométrie propre, à savoir d et L qui sont la trame et la portée d'un module, définis à la section 5.1 en page 67.

L'expression de Ξ fait intervenir le volume du matériau, les dimensions d'un module ainsi que les termes q_p et $f_{y,câble}$. On peut en découler une expression du volume d'un matériau par unité de surface qui peut ensuite elle-même être multipliée par le prix volumique de ce matériau afin d'en déduire le prix surfacique. Il est à noter que le prix ainsi obtenu ne comprend que les matières premières de la structure. Afin d'obtenir un prix plus pertinent, il faudrait néanmoins y ajouter une multitude d'intervenants relativement compliqués à quantifier : la main d'oeuvre, le prix des panneaux solaires, le prix des assemblages, le coût du terrain, etc.

$$\text{Prix surfacique} = \frac{V_{\text{matériau}}}{dL} \times \text{Prix volumique du matériau} \quad (6.1)$$

L'expression du volume d'un matériau provient directement de $\Xi = \frac{V_{\text{matériau}} f_{y,câble}}{dL H_C q_p}$.

L'expression 6.1 nous permet donc de représenter sous forme de graphique l'évolution du prix général d'une centrale en fonction de ses dimension d et L . À nouveau, les deux solutions proposées pour les poutres de support seront couvertes. Les prix des matériaux utilisés sont disponibles à l'annexe A.

Prix surfacique de la structure utilisant des pannes de bois

Il est donc possible d'obtenir un graphique représentant le prix surfacique d'une centrale photovoltaïque à structure haute avec des poutres de support en grumes de bois.

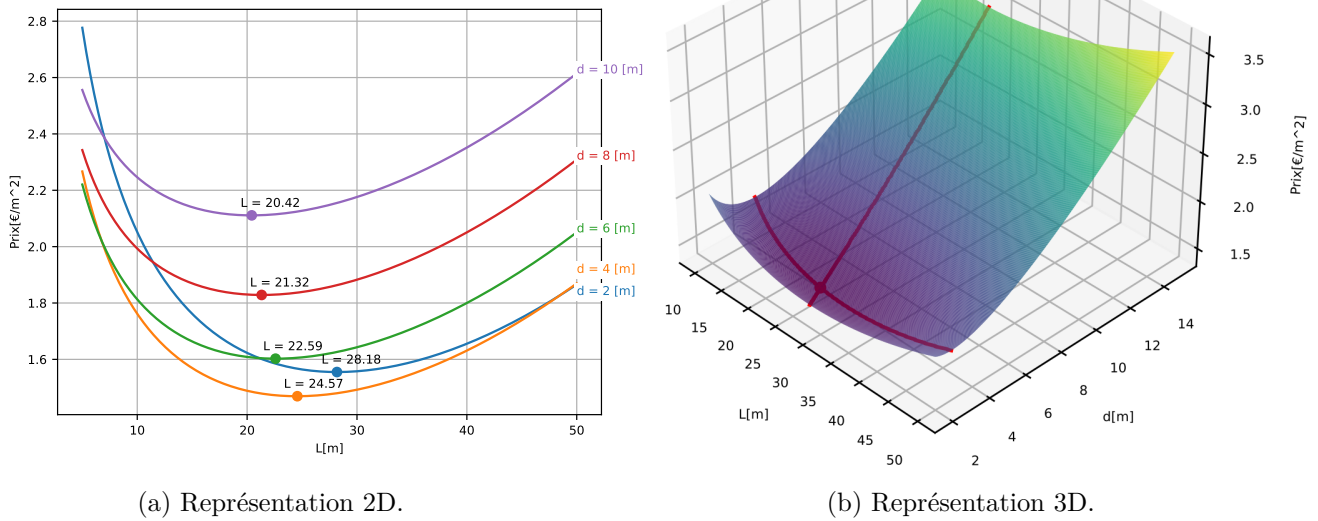


FIGURE 6.9 – Visualisation du prix surfacique des matériaux pour une installation photovoltaïque avec des poutres de supports en grumes, aussi appelées pannes.

La seule différence entre les graphiques à la figure 6.9 et ceux à la figure 6.7 est l'échelle de l'axe des ordonnées. En effet, la même expression analytique y est représentée mais simplement multipliée par des facteurs afin de faire apparaître le prix surfacique. Les optima de d et L sont donc identiques et incombent un prix surfacique pour les matériaux de l'installation de $1.46[\text{€/m}^2]$ pour un d valant $3.43[m]$.

Prix surfacique de la structure utilisant des profilés métalliques

Il est également possible d'obtenir le prix surfacique des matériaux d'une installation avec des poutres de supports en profilés métalliques.

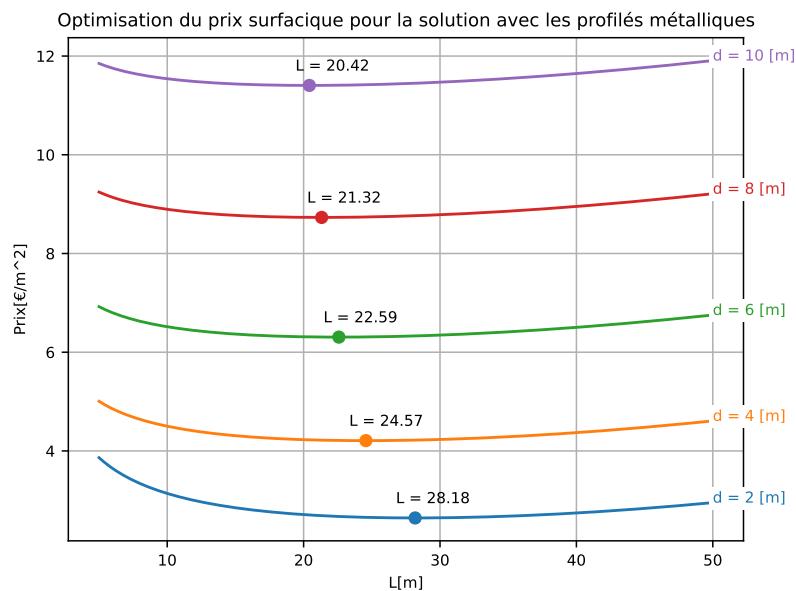


FIGURE 6.10 – Visualisation du prix surfacique des matériaux pour une installation photovoltaïque avec des poutres de supports en profilés métalliques.

Ainsi, le graphique de la figure 6.10 est similaire au graphique de la figure 6.8. Les optima de d et L sont donc identiques et le prix surfacique minimum des matériaux utilisés est $2.64[\text{€/m}^2]$ pour un d valant $2[m]$.

En comparant le prix minimum des deux solutions - à pannes ou à profilés métalliques - on voit que pour un d identique, disons $6[m]$, le prix surfacique pour la solution à pannes est $1.6[\text{€/m}^2]$ tandis que le prix surfacique de la solution à profilés est $6.31[\text{€/m}^2]$. La solution à profilés est dans ce cas-ci 4 fois plus chère que la solution à pannes. Cet écart se creuse au fur et à mesure que la trame d augmente. Il y a donc une augmentation plus marquée du prix des profilés avec leurs portées que celle du prix des pannes. Néanmoins, les profilés sont susceptibles de pouvoir franchir des portées de plus de $6[m]$; ce qui n'est pas garanti pour les pannes, en raison de leur éventuelle indisponibilité.

6.6 Exemple d'influence des coûts supplémentaires

Comme mentionné précédemment, il est compliqué de tarifer nombre d'intervenants sans avoir de données précises quant au projet. Néanmoins, il est intéressant d'essayer de se rapprocher le plus possible du prix effectif de l'installation, et ce, en ajoutant des coûts ponctuels à l'analyse qui a été faite à la section 6.5.

Bien que les sources d'information relatives aux coûts supplémentaires soient rares et peu fiables, il est possible de poser des hypothèse relatives à nos expériences, discussions, et réflexions personnelles. Il faut se rendre compte qu'au vu des fortes imprécisions qui chapeautent ces coûts, les résultats numériques présentés sont approximatifs et à étudier avec un regard critique mais permettent de mieux comprendre les éventuelles évolutions des optima suite à l'ajout de certains coûts.

Sur base de la littérature et de notre expérience, il est possible de fournir une liste de prix approximatif pour certains exemples de coûts supplémentaires. Seul le cas des poutres de support en grumes de bois est considéré.

Assemblage aux pannes de support $80[\text{€/poutre}]$: mais permettent de mieux comprendre les éventuelles évolutions des optima suite à l'ajout de certains coûts. les accastillages et câbles nécessaires

Fondation d'une colonne $350[\text{€/colonne}]$: comprenant l'excavation, le ballast, le micro-pieu et l'assemblage de pied

Assemblage en tête de colonne $160[\text{€/colonne}]$: mais permettent de mieux comprendre les éventuelles évolutions des optima suite à l'ajout de certains coûts. les tiges filetées, les anneaux, les serres câbles,... en somme, tous les accastillages nécessaires

Ajout des frais supplémentaires relatifs aux pannes

Dans un premier temps, nous pouvons ajouter uniquement les frais supplémentaires par poutre de support à la visualisation du prix surfacique et obtenir les graphes à la figure 6.11.

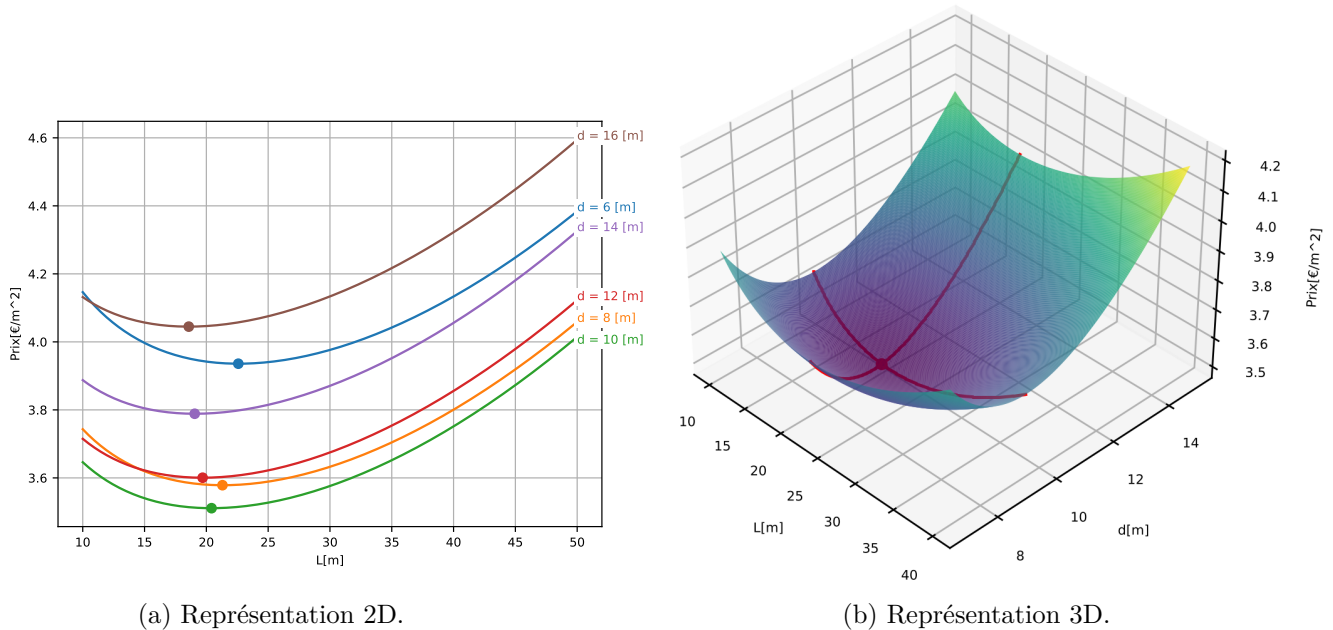


FIGURE 6.11 – Prix surfacique d'une installation en comptant un forfait pour les coûts supplémentaires relatifs aux poutres de support.

Considérer les frais supplémentaires relatifs aux poutres de support change l'optimum : la trame optimale d augmente par rapport à la simple optimisation selon le prix des matériaux et vaut $9.69[m]$ tandis que la portée optimale L reste assez stable et vaut $20.52[m]$. Le tout pour un prix surfacique optimal de $3.51[€/m^2]$. Les frais d'assemblage des pannes ont tendance à faire augmenter la trame d .

Ajout des frais supplémentaires relatifs aux colonnes

Dans un second temps, nous pouvons faire de même que pour les poutres de support en ajoutant à la visualisation du prix surfacique uniquement les frais supplémentaires liés aux colonnes. Les graphes obtenus sont visibles à la figure 6.12.

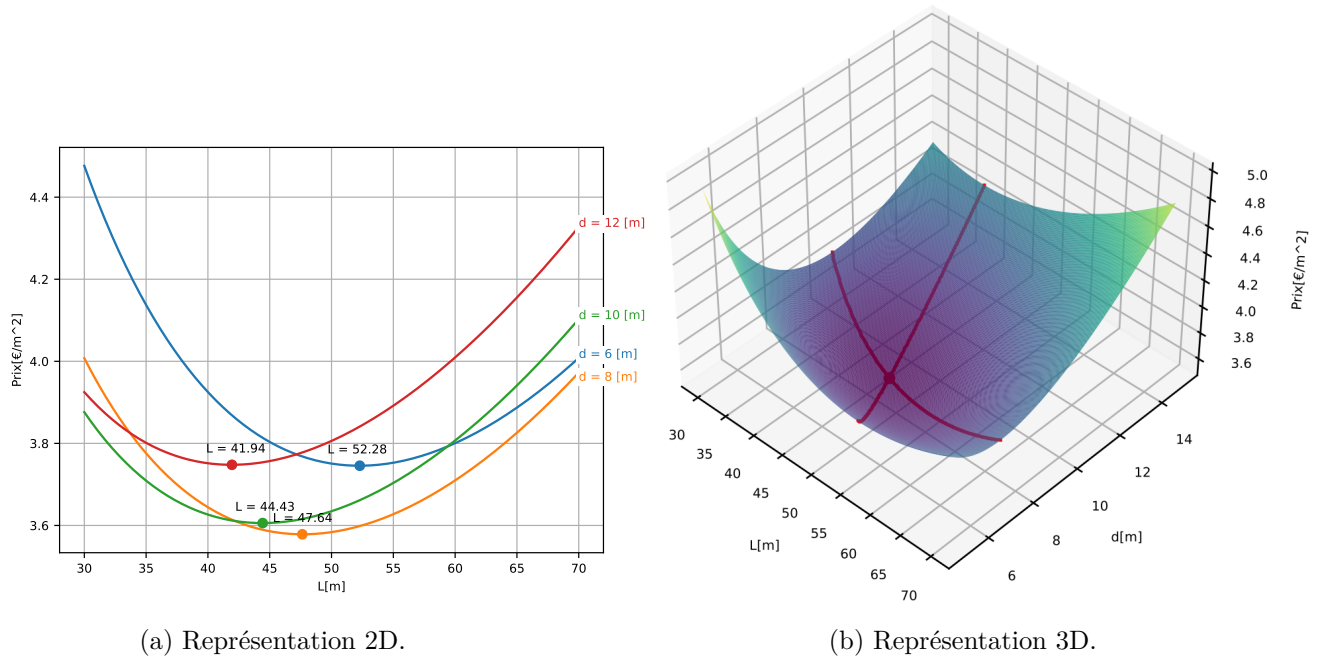


FIGURE 6.12 – Prix surfacique d'une installation en comptant un forfait pour les coûts supplémentaires relatifs aux colonnes.

Considérer ces frais supplémentaires relatifs aux colonnes dans l'optimisation générale nous donne un optimum différent, à savoir une trame $d = 8.6[m]$ et une portée $L = 46.6[m]$ pour un prix surfacique de $3.57[€/m^2]$. On voit donc que ces frais ont une forte tendance à agrandir les deux dimensions horizontales d'un module.

Ajout de l'ensemble des frais supplémentaires

Dans un troisième temps, nous pouvons intégrer l'ensemble des coûts supplémentaires à la visualisation du prix surfacique afin d'obtenir la figure 6.13.

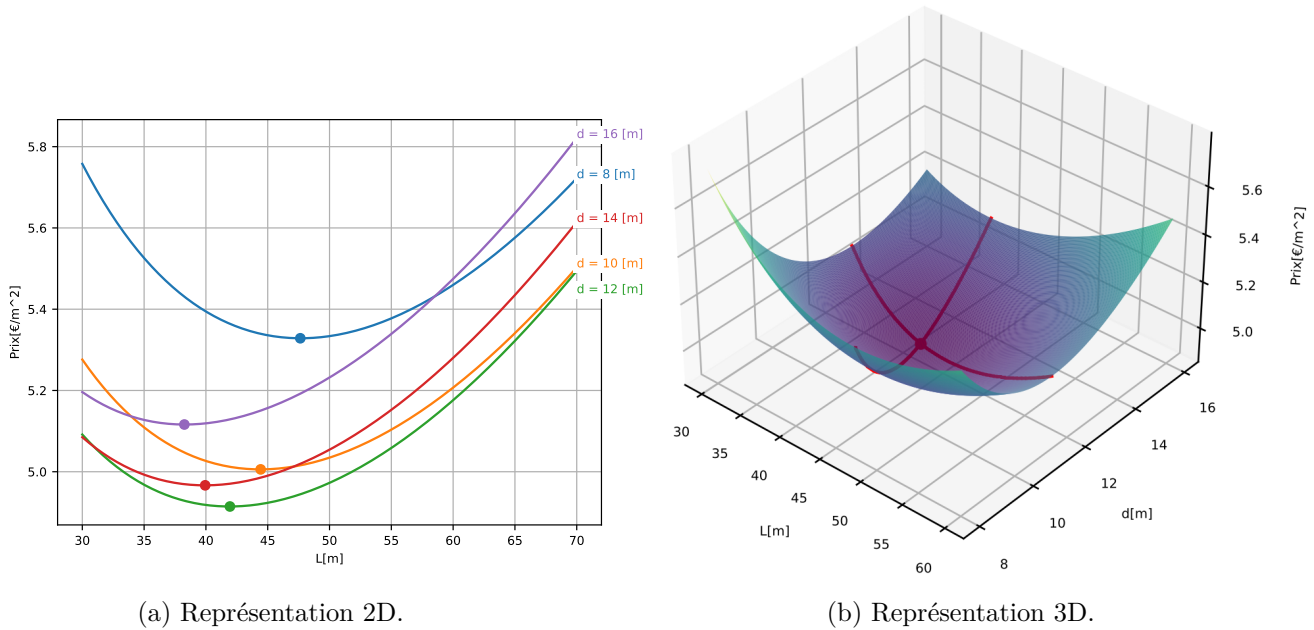


FIGURE 6.13 – Prix surfacique d'une installation en comptant un forfait pour les coûts supplémentaires relatifs aux colonnes et aux poutres.

En ajoutant tous les frais supplémentaires liés aux assemblages des colonnes et des poutres de support, les optimums sont les suivants : la trame optimale vaut $d = 12.13[m]$ et la portée optimale L vaut $41.81[m]$ pour un prix surfacique de $4.91[€/m^2]$. Tant la trame d que la portée L sont sujettes à augmentation par rapport à la "simple" optimisation en ne considérant que le prix des matériaux de la structure. On remarque qu'ajouter des modifications, mineures de prime abord, dans la modélisation du prix de la structure peut avoir un énorme impact sur les optima observés à la figure 6.9, qui ne montre que le prix surfacique des matières premières. Il y a quasiment une augmentation de 250% du prix surfacique alors que tous les intervenants externes n'ont pas du tout été pris en compte.

Il est également à rappeler que l'analyse faite à la section 6.5 ne prend pas en compte les "effets de bord". Cela signifie que les colonnes de bords ainsi que leurs ancrages sont négligés dans le processus d'optimisation et de tarification, or un coût supplémentaire est propre à ces colonnes suite à la nécessité d'haubanage et du besoin de plus grandes fondations. Il pourrait donc être opportun de réaliser une étude d'optimisation de la géométrie en incluant ces effets de bord. Cependant, ces effets sont directement liés aux dimensions du terrain disponible et relèvent par conséquent du cas par cas.

Conclusion de chapitre

L'indicateur morphologique Ξ s'avère être d'une grande aide quant à l'optimisation des variables de design et permet de dégager la meilleure solution, ou en tout cas la plus économique en matériaux. Outre donner un optimum, ces outils mathématiques permettent de quantifier un projet et ce indépendamment du domaine des valeurs étudiées, en l'occurrence les dimensions des structures. Bien qu'ils représentent un réel atout dans l'élaboration de tels ouvrages, il est nécessaire de nuancer les résultats obtenus par l'impact non-négligeable des coûts supplémentaires sur les optima, comme présenté à la fin de ce chapitre 6.

Afin d'illustrer l'utilité de cette méthode, il est opportun de comparer le prix surfacique de la structure haute étudiée dans l'étude de faisabilité du chapitre 3. La trame était de 6[m] et la portée de 30[m]. De ces dimensions découlent un prix de 6.81[€/m²]. L'optimum général trouvé, visible à la figure 6.13b, permet une économie de 28% sur les matériaux et les assemblages.

Troisième partie

Modélisation des structures par une interface Rhino Grasshopper et enjeux du mémoire

Chapitre 7

Modélisation paramétrique

Pouvoir modéliser son design est une réelle plus-value pour un projet. Outre le fait d'être ludique, le modèle constitue un support pour visualiser son concept et éventuellement repérer des incohérences. Il est également intéressant de pouvoir modifier en temps réel ce modèle afin qu'il s'adapte aux derniers ajustements. Fâcheusement, la création d'un tel prototype numérique est souvent fastidieuse et compliquée. C'est pourquoi la modélisation paramétrique est un réel atout lorsqu'il s'agit de visualiser des projets qui évoluent continuellement. Le logiciel *Rhino* permet la création de géométries en trois dimensions sur base d'un programme visuel interactif. À ce logiciel peut se greffer un "plugin"¹, appelé *Grasshopper*, qui permet de lier la géométrie visualisable dans *Rhino* à un code paramétrique, modifiable instantanément. Cet outil donne une autre dimension aux projets et permet au concepteur de disposer d'une grande flexibilité et de pouvoir faire preuve de créativité.

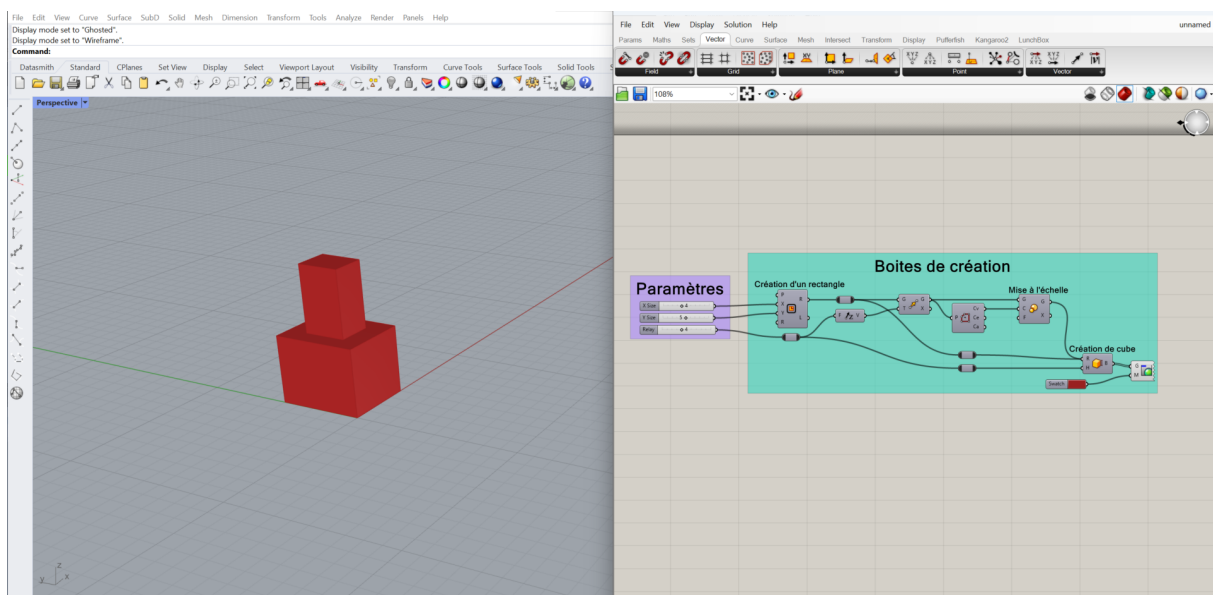


FIGURE 7.1 – Interfaces du logiciel *Rhino* et de son "plugin" *Grasshopper*.

Grasshopper se présente comme une fenêtre informatique complémentaire à l'interface du logiciel *Rhino*. Une visualisation de cette dernière ce trouve à la figure 7.1. Il est possible de définir des objets et relations directement dans GH², qui sont modélisés dans la fenêtre *Rhino*. Ces objets

1. Logiciel secondaire apportant une fonctionnalité supplémentaire au programme principal
2. *Grasshopper*

sont représentés par des boîtes que l'on peut connecter entre elles à l'aide de câbles. Ces câbles véhiculent des informations d'une boîte à l'autre permettant ainsi d'opérer un échange de données et de fonctionner comme un programme informatique qui serait rédigé dans un langage comme Python, C++, etc. Parmi les objets disponibles, il existe notamment des curseurs : paramètres d'entrée modifiables, apportant des changements au modèle en temps réel.

Lors de la création d'une structure agrivoltaïque, la possibilité de modifier facilement son modèle constitue un atout. D'ailleurs, ce genre de constructions se prêtent particulièrement bien à la représentation paramétrique en raison de leur régularité et la facilité de décomposer leur création.

Un fichier *Grasshopper* a été créé pour chaque type de structures, avec ses propres hypothèses et complexités. Celles-ci vont être expliquées dans les parties suivantes. Lors de la réalisation des interfaces GH, un des principaux objectifs a été de rendre le logiciel simple à utiliser et à comprendre, dans l'optique qu'il soit réutilisé à des fins commerciales mais aussi afin que qu'il puisse être modifiable par une tierce personne reprenant ce travail. Le niveau de détails des modélisations se limite à la géométrie générale des ouvrages. Le logiciel *Rhino* ne se prête pas facilement à la représentation des détails, c'est pourquoi les assemblages entre les éléments des structures ne sont pas modélisés. Ne pas représenter les éléments de petites tailles permet en outre d'économiser de la puissance de calcul et donc de rendre le programme plus fluide à l'utilisation.

7.1 Modélisation des structures basses

L'interface de modélisation des structures basses se présente en cinq parties majeures, visibles à la figure 7.2, jouant chacune un rôle à la visualisation du projet. Le fonctionnement détaillé des modules n'est pas expliqué au présent document mais ces derniers se trouvent en annexe D. Ces modules sont les suivants :

- Paramètres d'entrée
- Étude de la topographie
- Création des trames
- Création des poteaux
- Création des panneaux

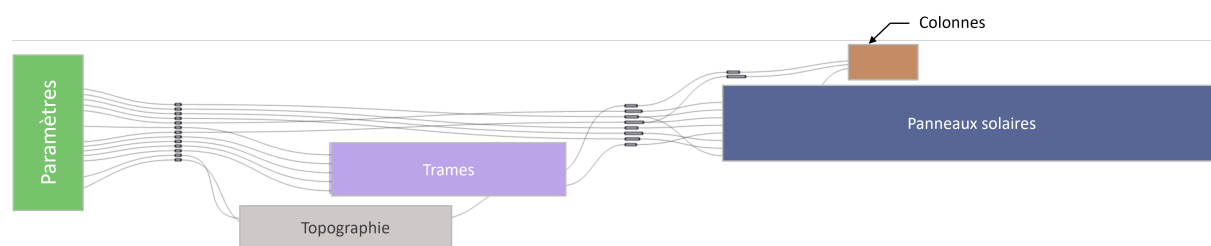


FIGURE 7.2 – Organisation du programme GH pour les structures partitions.

Les paramètres d'entrée sont visibles à la figure 8.6 de l'annexe D. Ces derniers permettent de jouer, d'une part, sur la géométrie générale de la centrale tel que sur le nombre de trame, de portées... et, d'autre part, sur les dimensions des panneaux solaires, celles-ci variant d'un fournisseur à l'autre. Il est également possible de modifier la position de la centrale et son orientation, laissant ainsi le choix d'exposer librement l'installation sur la topographie. Le relief est importé du site internet *CADMapper* [39] sous la forme d'un fichier *Rhino* [.3dm]

L'étude de la topographie permet d'extraire du fichier importé la surface utile à la modélisation de la structure. La reproduction de la topographie dans le modèle sert donc de support de départ aux autres éléments.

La création des trames définit les points d'implantation des colonnes de la structure. Ces points se présentent sous la forme d'un quadrillage qui respecte les espacements donnés dans les paramètres d'entrée. Ils sont projetés sur la surface de topographie.

Les colonnes sont créées sur base d'une longueur définie par notamment la hauteur des panneaux et les gardes nécessaires. Elles prennent comme bases les points définissant les trames et forment donc un quadrillage.

Les panneaux sont créés entre deux colonnes de façon à laisser une garde au sol et latérale. Ces gardes permettent d'éviter tout dommage résultant d'une collision entre les panneaux et les poteaux. Un maximum de panneaux entiers sont placés entre deux colonnes, en respectant les dimensions imposées dans les paramètres d'entrée.

À l'aide de ces modules GH, il est possible de générer une géométrie de centrale agrivoltaïque à structures basses, comme représentée à la figure 7.3.

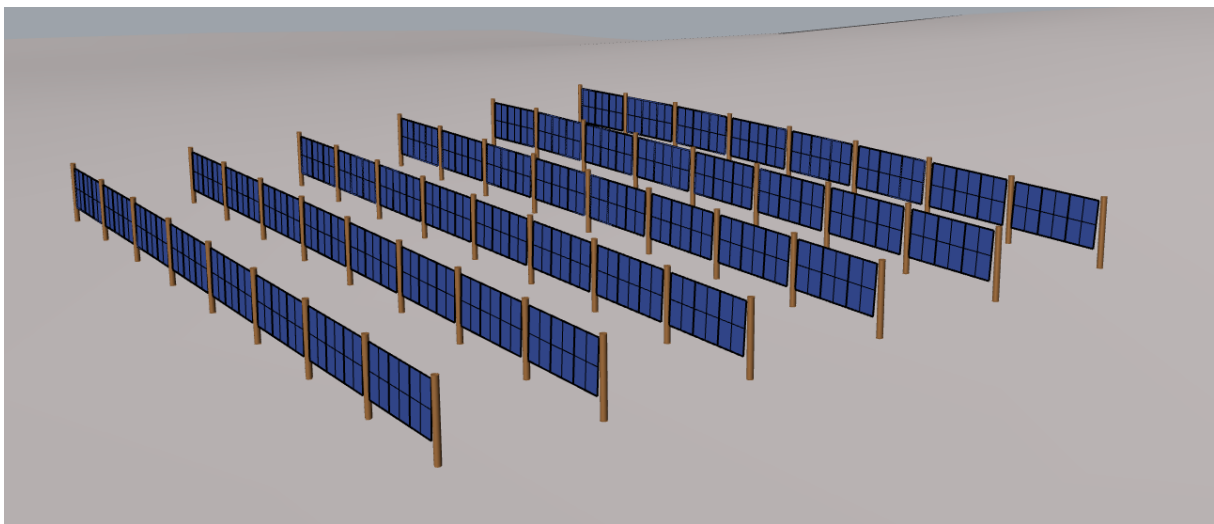


FIGURE 7.3 – Centrale agrivoltaïque à structures basses obtenue par modélisation paramétrique.

7.2 Modélisation des structures hautes

Le principe général est similaire à celui retenu pour les structures basses, avec la nuance qu'il y a plus d'éléments à modéliser et plus de paramètres à prendre en compte. Par exemple, les câbles sont d'une plus grande importance car leur forme détermine la position des panneaux. Ils sont donc modélisés ainsi que les haubans les tendant, afin de visualiser la superficie totale affectée. Les différents modules et leurs liens sont illustrés à la figure 7.4.

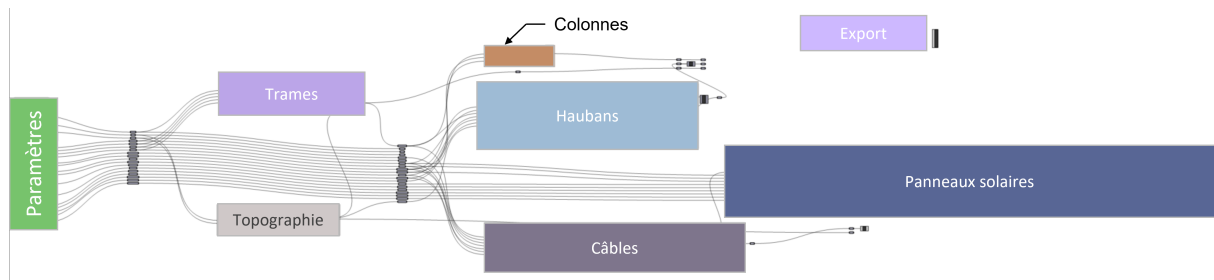


FIGURE 7.4 – Organisation du programme GH pour les structures surplombantes.

Le module consacré aux câbles crée les câbles supérieurs et inférieurs sur les travées et les modélise par une courbe parabolique. Le module de création des haubans les crée rectilignes présentant un angle avec la verticale défini dans les paramètres d'entrée. Un autre nouveau module est celui d'export. Il sert à regrouper les informations du projet afin de les exporter vers un fichier externe pour les modules d'optimisation et de création du métré.

Le module de création des panneaux solaires est différent de celui des structures basses. Il répartit les panneaux sur les travées pour respecter le taux maximal de couverture dicté, et offre l'option de les orienter tangents aux câbles ou avec une orientation arbitraire unique. Le système d'arborescence des données de *Rhino GH* permet une architecture du code qui traite chaque entité de la structure individuellement, laissant une adaptabilité à toute situation. Cela est illustré en figure 7.5, montrant un cas particulier où la pente de la topographie allonge les câbles d'une maille du maillage, laissant place à une rangée de panneaux en plus.

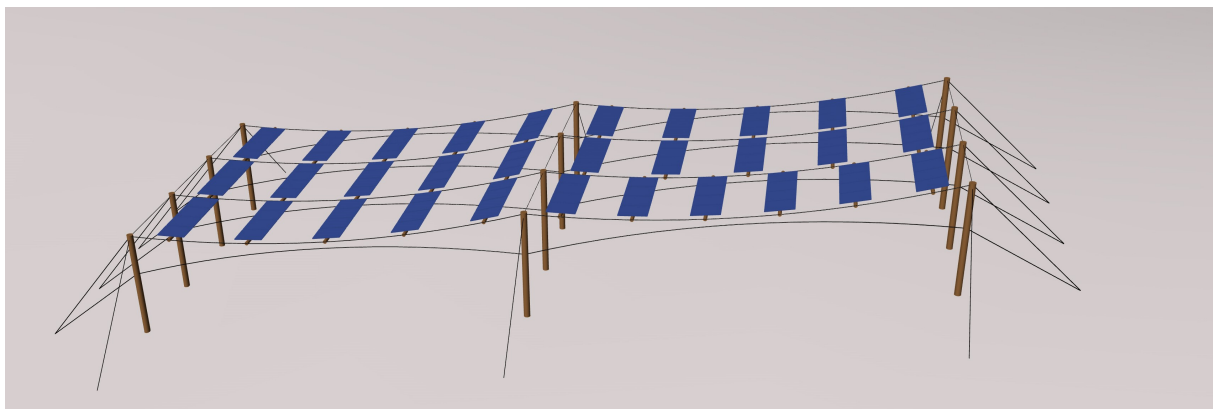


FIGURE 7.5 – Cas particulier des structures surplombantes.

Les paramètres d'entrées sont aussi plus complexes dans ce programme, et bien qu'ils sont repris à l'annexe 8.13, les principaux sont présentés ici :

- L'adresse d'un fichier *Rhino* [.3dm] avec le relief du lieu étudié. Un tel fichier peut être trouvé sur internet comme par exemple sur le site *CAD Mapper* [39]. Seule la surface 3D de la topographie est utilisée pour projeter la centrale dessus. Les bâtiments et autres routes peuvent donc être ignorés. Il est considéré que l'axe x du fichier pointe vers le nord.
- Un point central pour la création de la structure, dont la position est variable directement dans le fichier *Rhino*. Avec ce point, un curseur permet aussi de tourner la topographie autour de son centre afin de modifier indirectement l'orientation des panneaux.
- Une série de paramètres géométriques définissant la structure. Sur base de ceux-ci, le

quadrillage rectangulaire est créé autour du point central dans le bloc nommé "Trames" et permet de produire les colonnes et les câbles principaux.

- Un ratio maximal de couverture ainsi que les dimensions des panneaux, déterminant la quantité d'éléments photovoltaïques implantés sur la structure. Il est considéré que ce ratio sera mis en oeuvre en répartissant les panneaux sur la travée des longs câbles comme sur la figure 7.6.
- Un bouton permettant de choisir la disposition des panneaux afin qu'ils soient tangents aux câbles ou orientés au soleil comme visible à la figure 7.6, ainsi qu'un curseur dictant l'éventuel angle d'inclinaison.

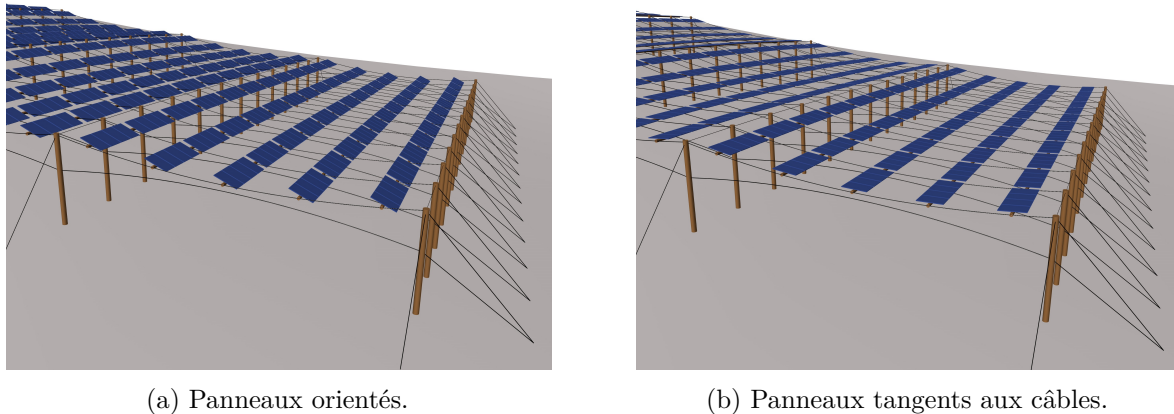


FIGURE 7.6 – Centrales agrivoltaïques à structures hautes obtenues par modélisation paramétrique.

7.3 Éventuels modules annexes

Comme mentionné, une intégration de certaines fonctionnalités est nécessaire afin d'avoir un programme plus complet et polyvalent. Afin d'organiser la séquence d'exécution du programme, une séparation des variables telle que réalisée en section 5.2 nous permet de savoir où intégrer les modules supplémentaires dans le programme. Pour rappel, les variables de type I sont les données fixes du projet et doivent être entrées par l'utilisateur. Les variables de type II sont les dimensions libres et sont susceptible à optimisation. Enfin, les variables dans la classe III résultent de dimensionnements, telles que les aires de section des colonnes, câbles et poutres de support. Trois modules annexes pourraient être greffés à l'interface GH.

- Module d'optimisation des dimensions
- Module de calcul des éléments
- Module de production d'un mètre

Ces modules n'ont pas fait l'objet d'une étude lors de la réalisation de ce travail mais il est intéressant de se questionner quant à leur utilisation et articulation au sein du programme.

À l'initialisation, il faut que l'utilisateur puisse indiquer les variables de type I ainsi que les bornes à donner aux variables de type II. Le module d'optimisation utilise les indicateurs morphologiques, ces dernier ayant été définis et détaillés dans la deuxième partie de ce mémoire et peut déterminer les variables de type II optimales. Il peut aussi produire des graphiques d'optimisation jouant un rôle informatif.

Ensuite, les variables de type III peuvent être calculées par un module de dimensionnement. Une fois ces données introduites, le programme peut générer la structure avec ses dimensions optimales respectant les bornes données par l'utilisateur. Dans l'éventualité où l'utilisateur souhaiterait apporter des modifications à cette version optimisée de la structure, les graphes produits lui permettraient de visualiser les pertes que ces changements engendreraient.

Après la modélisation de la structure, un dernier module pourrait générer une liste reprenant les quantités de matériaux utilisées et éventuellement les coûts qui y sont associés afin de donner une estimation du prix de la matière première.

7.4 Limitations des interfaces

Le programme a été créé afin de visualiser et améliorer les centrales photovoltaïques à concevoir. Il fonctionne mais n'a pas un domaine d'action illimité malgré sa paramétrisation. Par exemple, les périmètres de parcelles sont pour l'instant confinés à une forme rectangulaire. Cela manque de réalisme car les cultures étudiées n'ont pas forcément de frontières régulières. De plus, il y a contradiction avec un des avantages principaux des structures câblées : l'adaptabilité à tout terrain.

Le programme manque également quelque peu de précision en ce qui concerne les détails de modélisation. Les câbles non-structuraux ne sont pas représentés et les assemblages non plus. Bien que cela diminue la complexité du programme et augmente sa fluidité d'utilisation, il n'est donc pas possible, dans l'état de son développement, de voir la structure dans son entièreté avec comme risque non négligeable de passer à côté d'éventuels défauts lors de la modélisation.

De manière plus globale, le programme est encore loin d'être "user-friendly". Il est réalisé sur un logiciel payant et tout son fonctionnement est encore "brut". L'ensemble des composantes articulant le programme sont visibles et accessibles, exposant le logiciel à des modifications indésirables pouvant changer son essence. Une interface guidant l'utilisateur et n'affichant que le nécessaire serait plus appropriée. Néanmoins, l'accessibilité au "code source" du programme permet d'avoir une absolue certitude sur la transparence de son fonctionnement.

Chapitre 8

Continuité et enjeux du mémoire

8.1 Pistes de continuation

Ce mémoire s'inscrit dans un projet plus vaste que l'étude et la modélisation de structures agrivoltaïques. Dans cette perspective, plusieurs pistes d'amélioration et continuation sont à explorer et ce, dans de multiples domaines. Outre les trois parties de ce mémoire concernées par ces pistes de continuation, il est possible d'élargir le spectre de ce travail et d'aborder d'autres questions pertinentes lorsqu'il s'agit de structures agrivoltaïques et plus largement, de centrale PV "Dual-Use". Les domaines sujets à amélioration sont mis en avant ci-dessous. Ces propositions ne se veulent pas exhaustives et ils ne seront pas tous traités.

- Design des structures et dimensionnement
- Optimisation structurale et financière
- Modélisation des structures
- Métré détaillé d'une installation
- Étude de durabilité des grumes et des assemblages bois-métal
- ACV des centrales photovoltaïques

Design des structures et dimensionnement

L'agrivoltaïsme et plus généralement le "Dual-Use" ouvre le champs des possibles pour diversifier les structures porteuses de panneaux PV et les applications qu'on peut en faire. C'est pourquoi l'élaboration d'autres familles de structures serait profitable au secteur, offrant une large gamme de modèles de centrales photovoltaïques pouvant convenir à une grande variété de projets. Une nouvelle famille de structures pourrait être une variante des structures précédemment décrites dans les chapitres 2 "Les structures basses" et 3 "Les structures hautes" ou un design complètement nouveau, proposant d'autres atouts et visant donc d'autres objectifs.

Le sens de passage des engins agricoles dictant l'orientation du quadrillage des colonnes n'est pas nécessairement accordé à la meilleure orientation des panneaux photovoltaïques. Il serait donc opportun de disposer les panneaux indépendamment de l'orientation de la structure et d'avoir une couverture photovoltaïque en biais par rapport aux trames des colonnes.

Il serait également intéressant de développer une procédure de mise en œuvre des structures, adaptée à l'utilisation d'engins agricoles. Par ailleurs, cela vérifierait la pertinence des assemblages proposés, ces derniers se voulant avoir été réfléchis pour faciliter la construction et l'entretien. Cette procédure pourrait mener à la construction d'un prototype qui pourrait être testé sous différents cas de charges. Le comportement de ce prototype permettrait d'évaluer les avantages

et inconvénients du design et de l'ajuster en conséquence.

Une étude dynamique de la structure mériterait également d'être examinée en raison de la longueur importante des câbles utilisés. Les ouvrages risquent d'entrer en résonance avec les fortes sollicitations au vent des panneaux solaires, exposant les structures à de grands efforts et des déformations excessives pouvant entraîner la rupture.

Enfin, comme mentionné dans le chapitre introductif de ce travail, l'utilisation de diffuseurs lumineux permettrait une meilleure gestion de l'ensoleillement des cultures. Une étude approfondie des répercussions de leur utilisation serait à entreprendre, tant au niveau des structures porteuses qu'au niveau de la croissance des plantes, toutes deux impactées par ces dispositifs.



FIGURE 8.1 – Application des diffuseurs à une structure agrivoltaïque, "The Even-lighting Agrivoltaic System", China (Wen Liu)

Optimisation structurale et financière

Les structures basses n'ont pas fait l'objet d'une optimisation dans ce mémoire mais y sont néanmoins sensibles. Par exemple, l'écart entre deux poteaux verticaux pourrait être optimisé afin de limiter les volumes de bois et de câbles utilisés.

L'optimisation des structures hautes dont les résultats ont été présentés dans le chapitre 6 "Résultats de l'optimisation par les indicateurs de volume" pourrait inclure d'autres éléments significatifs. En effet, comme démontré dans la section 6.6 "Exemple d'influence des coûts supplémentaires", des éléments qui de prime abord semblent anodins peuvent modifier complètement les optima observés. Il serait donc intéressant d'ajouter d'autres facteurs économiques à la recherche des optimums, d'aspect moins volumineux mais pas forcément sans importance.

Une installation agrivoltaïque touche à une multitude de facteurs et critères permettant de la définir tels que les matériaux qu'elle emploie, son impact environnemental ou économique, ses performances structurales, etc. Cela mène à une optimisation complexe. Il est effectivement possible d'optimiser des structures agrivoltaïques pour un autre facteur que simplement le volume de matériau mis en œuvre. Par exemple, le choix d'essences de bois pourrait être mis en compétition avec l'amortissement financier de la centrale ou les sections et dimensions de cette dernière pourraient être optimisées afin d'obtenir un ouvrage extrêmement rigide, peu sensible aux sollicitations du vent ou sismiques. À nouveau, le choix du critère d'optimisation est ouvert

à une multitude de possibilités.

Modélisation des structures

Comme mentionné à maintes reprises, il est impératif de proposer une interface de modélisation "user-friendly"¹ afin que l'utilisateur puisse aisément prendre en main le logiciel et introduire des modifications à son design. Malheureusement, l'interface de *Grasshopper* n'est pas évidente à utiliser pour le non-initié alors que concevoir une fenêtre indépendante à *Grasshopper* reprenant l'ensemble des paramètres clés du projet serait une réelle plus-value.

Outre l'amélioration esthétique du programme, il serait aussi nécessaire d'améliorer ses capacités. Une première étape serait d'intégrer à l'interface *Grasshopper* les modules annexes d'optimisation et de dimensionnement, discutés précédemment dans chapitre 7. De plus l'analyse de l'ensoleillement de la couverture PV² et un modèle de croissance des cultures sont des ajouts permettant de proposer un software plus complet.

Métré détaillé d'une installation

L'étude du prix de revient d'une installation photovoltaïque n'a été que brièvement abordée dans ce travail. Il faudrait produire un métré détaillé des installations photovoltaïques proposées, comprenant une série d'éléments induisant des coûts directs et indirects au prix total de l'ouvrage. Le coût de la main d'œuvre et les frais d'importation des matériaux en sont des exemples. Bien entendu, il est possible de greffer ce calcul de coût détaillé à l'interface de modélisation paramétrique.

Étude de durabilité des grumes et des assemblages bois-métal

La solution proposée comprend des structures porteuses en bois. Or il s'agit d'un matériau capricieux dont le comportement et les performances sont sujets à son environnement. Ce matériau est également putrescible lorsqu'il est exposé à l'humidité et à la chaleur. En somme, l'utilisation du bois dans de telles installations nécessite une attention particulière et requiert de soigner les détails de conception. Les assemblages proposés aspirent à être durables et une étude spécifique permettrait d'ajuster leur conception afin de les rendre plus robustes aux intempéries que connaissent nos contrées belges.

8.2 Enjeux éthiques de l'agrivoltaïsme

Les défis sociétaux actuels nous obligent à repenser le monde et à revoir nos comportements dans une mouvance plus respectueuse de l'environnement et de l'Homme. Il est indéniable que le secteur de la construction contribue très largement au dérèglement climatique et que son évolution vers un équivalent plus écologique et humain reste lente car chronophage. Bien que le photovoltaïque s'inscrive dans cette transition, il n'échappe pas à la règle et sa mise en œuvre est de manière perpétuelle sujette à amélioration. La branche agrivoltaïque de ce secteur, prônant une production écologique et intelligente, fait souvent appel à des matériaux polluants et onéreux tels que le métal. En ce sens, l'agrivoltaïsme ne coche pas toutes les cases des valeurs sociétales actuelles.

1. Aisé d'utilisation
2. PhotoVoltaïque

Impact sur le secteur agricole

L'agrivoltaïsme profite d'abord aux agriculteurs ouverts à l'installation de centrale PV sur leurs terres. Ces installations présentent l'avantage de fournir un revenu complémentaire aux agriculteurs outre la possibilité pour eux de générer leur propre électricité, source d'indépendance des exploitants à l'égard des distributeurs d'énergie. Les incertitudes sur la disponibilité de l'électricité levée, il est possible de cultiver plus sereinement.

L'agrivoltaïsme représente également pour les agriculteurs un premier pas vers le monde de demain dans lequel l'énergie fossile ne sera plus accessible et dont l'électricité sera potentiellement la principale remplaçante. Une agriculture plus verte est donc possible, par le biais de machines agricoles alimentées par les panneaux qui les surplombent.

À l'instar de l'impact paysager de l'éolien, il est probable que les installations photovoltaïques de grandes tailles ne reçoivent elles non plus l'accueil favorable des riverains et des autorités locales. On pourrait se demander si le quotidien d'un utilisateur de telle centrale ne serait pas semé d'embûches, réprimandé par l'impact paysager de son champs.

La production des panneaux photovoltaïques

L'éthique concernant la production des panneaux photovoltaïques ouvre un débat sur les conditions de production de ces derniers et la pollution qu'elle engendre. Actuellement, les panneaux sont principalement fabriqués en Asie et plus particulièrement en Chine où le travail forcé et la violation des droits fondamentaux sont pointés du doigt[40]. Comme le suggère *GreenPeace*, la chute du prix des panneaux abordée dans l'introduction de ce travail est donc à examiner avec précaution[41]. De plus, les panneaux sont principalement constitués de silicium cristallin. Bien qu'il s'agisse d'un matériau disponible en abondance et entièrement recyclable, son raffinage est polluant et le rejet dans l'atmosphère de poudre de silicium a des effets néfastes sur les environs des sites de production.



FIGURE 8.2 – Traitement du silicium à Leshan, Chine (Jordan Pouille)

Aussi vertueux que l'agrivoltaïsme se voudra, l'importation de biens, entachés par l'exploitation humaine et la pollution, associera toujours le photovoltaïque à de multiples questions éthiques. Dans ce contexte, il serait préférable que le marché européen œuvre à favoriser une production locale plus contrôlée en termes de qualité environnementale et de conditions de travail.

Impact social et démographique

L'agrivoltaïsme belge n'est encore que peu développé mais est prometteur au regard de la forte densité de population de notre pays et du manque d'espace croissant. Sa double utilisation d'un même espace permet en effet de ne pas empiéter sur les surfaces destinées à accueillir du résidentiel en vue de répondre à cette recrudescence démographique.

Une des grandes questions d'actualité est : dans quel état notre monde sera laissé aux générations futures ? La plupart des politiques mondiales s'efforcent de mettre en place des législations afin d'endiguer le dérèglement climatique. Il est manifeste que la promotion du secteur photovoltaïque et de l'agriculture raisonnée³ entrent dans cette nouvelle dynamique. L'agri-PV pourrait être un levier déterminant dans le désamorçage du dérèglement climatique notamment en passant par l'utilisation des SER⁴, par l'optimisation des espaces au sol ou encore par la protection que ces structures offrent aux cultures sous-jacentes.

Matériaux utilisés

L'exploitation intelligente des matières premières constitue un challenge, ces dernières étant tarissables et donc susceptibles de venir à manquer. À l'instar des SER, il est intéressant de se tourner vers des matériaux recyclables ou naturellement abondamment disponibles dans la nature afin de préserver au maximum les réserves de la Terre. Il est en réalité question de minimiser l'impact des activités humaines sur l'état de notre planète notamment en construisant intelligemment. Dans le cas de l'agrivoltaïsme, l'utilisation de bois et de câbles permet de se ranger à cette idée.

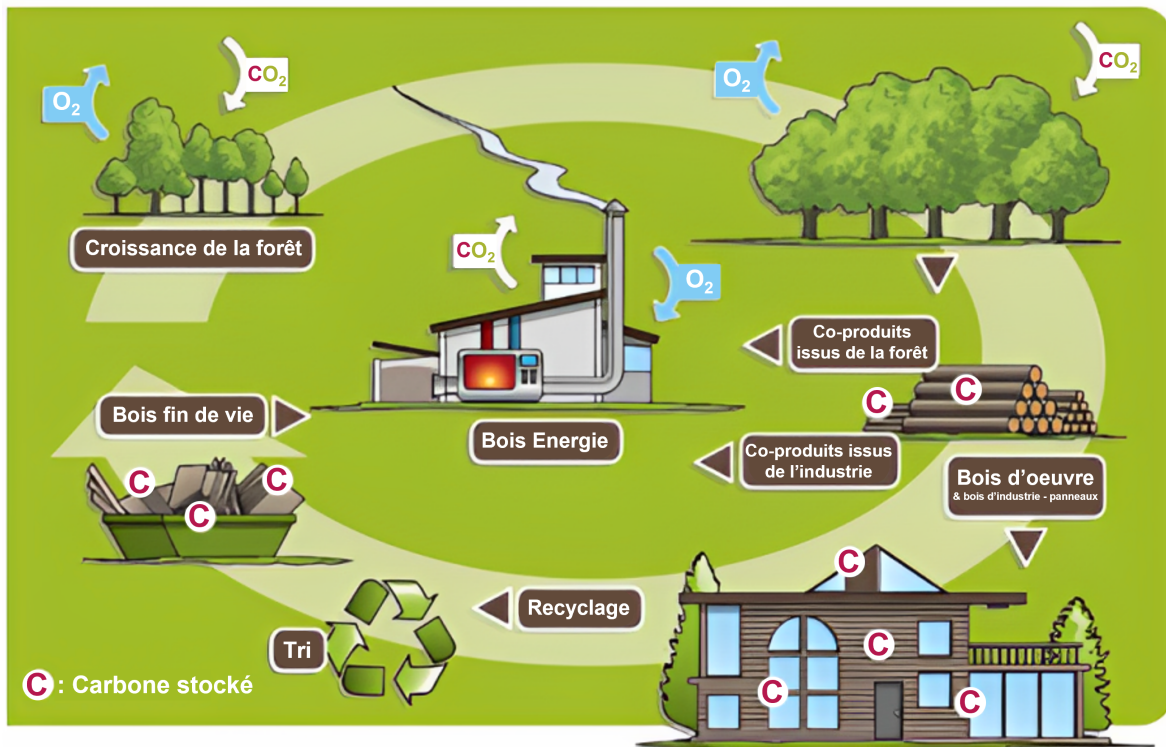
Le bois est un matériau naturel, puits de carbone et disponible pratiquement infiniment à condition que l'approvisionnement soit géré de manière responsable. Ce matériau libère de l'oxygène et récolte du carbone par le biais de la photosynthèse lors de sa croissance. Une fois arrivé à maturité, ce processus ralentit et l'abattage s'impose pour laisser place à de plus jeunes spécimens. Cette rotation permet une gestion optimale des forêts pour une séquestration maximale du CO_2 ⁵. Si le bois récolté est utilisé pour une application durable, l'effet est décuplé de par l'augmentation du volume de bois global. L'exploitation forestière responsable a donc un bilan carbone négatif très attractif. Néanmoins, une fois transformé, le prix de ce matériau peut flamber et le rend moins compétitif. Il est donc intéressant de le maintenir à sa forme utilisable la moins altérée, à savoir la grume de bois.

Le câble est une déclinaison de l'acier mais possède de toutes autres caractéristiques que l'acier de charpente. En effet, de par ses hautes performances mécaniques, il est possible de ne mettre en œuvre qu'une faible quantité de câbles afin de traverser de longues portées et reprendre de grandes charges. L'utilisation de la matière première se voit donc réduite. Il faut cependant nuancer l'attractivité de ce matériau, abondamment transformé, en raison de ses coûts financiers et environnementaux de production. Néanmoins, une fois produit, ce matériau peut être entièrement recyclé et par là même, avoir une incidence sur la pérennité des ouvrages dans le temps.

3. Agriculture raisonnée : système de production agricole maîtrisant les quantités d'intrants, tels que les substances chimiques utilisées (pesticides, engrais) dans le but de limiter leur impact sur l'environnement

4. Source d'Énergie Renouvelable

5. Dioxyde de carbone

FIGURE 8.3 – Principe du stockage de carbone dans le bois⁶.

Un ouvrage laisse en effet souvent un impact en fin de vie sur le terrain qui l'a accueilli de part la présence de fondations. Compliquées à enlever, elles sont souvent abandonnées et enterrées sur place, marquant ainsi définitivement le sous-sol. Particulièrement de mise dans le secteur agricole, la santé des terres et leur capacité à revenir vers un état vierge est primordial. Nulle structure n'est immortelle et il est de notre devoir de penser au recyclage de nos ouvrages notamment par la mise en place de fondations dites légères et faciles à extraire lors de la démolition de l'installation. Ainsi, l'emploi de pieux métalliques à visser propose des fondations à faible empreinte et recyclables. L'utilisation du béton doit être écartée dès que possible en raison de sa peine à être extrait en fin de projet et de sa difficulté à être revalorisé sous d'autres formes.

6. Source : <https://collectivitesforestieres-nouvelleaquitaine.fr/bois-energie/>

Conclusion

L'agrivoltaïsme nous a démontré sa pertinence sur la scène mondiale et sa croissance exponentielle sur les deux dernières décennies en est la preuve. Ce mémoire essaye d'apporter sa pierre à l'édifice en donnant une nouvelle dimension à ce secteur et en proposant des solutions alliant la simplicité des grumes de bois et les performances mécaniques des câbles. Cette association a permis de replacer les structures porteuses photovoltaïques sur un terrain plus économique et plus respectueux de l'environnement.

Il est évidemment regrettable que la grume de bois ne soit encore que trop peu utilisée dans le monde de la construction. Sa mise en œuvre et la démonstration de sa pertinence dans ce travail aspire à rétablir sa crédibilité comme matériau de premier ordre. Le développement de l'utilisation de grumes dans la construction pourrait en effet ouvrir le marché à une gamme de dimensions et d'essence de bois plus large, permettant une liberté de design plus importante et une facilité d'approvisionnement accrue. Ce mémoire se veut mettre en avant la combinaison harmonieuse entre le bois d'une part - et plus précisément les nombreuses qualités des grumes utilisées dans des secteurs de niche - et les câbles d'autre part ; l'ensemble permettant de créer une symbiose dans les ouvrages.

Les structures porteuses photovoltaïques câblées en bois sont versatiles, conséquence des nombreux aspects remarquables qu'elles offrent, à savoir, des grandes portées, la simplicité de leur design d'assemblages et de fondations. Armées de ces atouts, elles satisfont aux exigences de nombreuses autres applications "Dual-Use", telles que la couverture de friches industrielles, des préaux fluviaux ou de parkings, etc.

Par ailleurs, la capacité de modéliser un design est une nécessité dans le monde professionnel actuel et la rendre accessible par une interface aisée d'utilisation est presque devenu une obligation. Le programme *Rhino Grasshopper* permet de satisfaire à ces exigences en proposant une paramétrisation complète et intuitive et en restant avant tout compétitif de par l'inclusion de notion d'optimisation. C'est cette même optimisation qui a été le fil conducteur de cette étude, jouant un rôle majeur dans l'approche économique et éthique des structures et permettant de sublimer les projets en fusionnant de multiples contraintes pour tendre à la structure « idéale ».

Quant aux perspectives futures ?

Au vu de sa croissance, l'agrivoltaïsme promet d'impacter la production électrique mondiale et son importance à venir tend à susciter l'innovation.

Pourquoi d'ailleurs ne pas d'ores et déjà imaginer l'intégration de l'intelligence artificielle dans la gestion de ces structures ? Cela permettrait d'ajuster précisément la production photo-électrique aux besoins des cultures en temps réel, tout en respectant par là-même la faune et la flore et ainsi de préserver notre Terre. L'équipement serait donc à l'écoute des besoins végétaux et humains.

Quatrième partie

Bibliographie et Annexes

Bibliographie

- [1] M. TROMMSDORFF, S. GRUBER, T. KEINATH, M. HOPF, C. HERMANN, F. SCHÖNBERGER, P. HÖGY, S. ZIKELI, A. EHMANN, A. WESELEK, U. BODMER, C. RÖSCH, D. KETZER, N. WEINBERGER, S. SCHINDELE, J. VOLLPRECHT. « Agrivoltaics : Opportunities for Agriculture and the Energy Transition ». In : (2022).
- [2] M. Orsini P. SIMUS. « Bilan énergétique de la Wallonie 2020 ». In : (2020).
- [3] *What's cool in solar TRENDS - SolarPower Europe*. URL : <https://www.solarpowereurope.org/blog/blog> (visité le 19/05/2023).
- [4] *Photovoltaïque.info - L'évolution des coûts du photovoltaïque*. URL : <https://www.photovoltaïque.info/fr/info-ou-intox/le-marche-du-photovoltaïque/levolution-des-couts-du-photovoltaïque/> (visité le 19/05/2023).
- [5] *Combien de panneaux solaires pour une centrale nucléaire ?* URL : <https://www.nouvelrenergie.com/pv/combien-panneaux-solaires-replacer-centrale-nucleaire> (visité le 24/05/2023).
- [6] M DAVID et S LE ROUX. « Analyse de la concurrence entre les parcs photovoltaïques au sol et les autres usages des sols - Focus sur l'agrivoltaïsme ». In : (2020).
- [7] H. M. CHO, L. J. MANCINO et R. E. BLANKENSHIP. « Light saturation curves and quantum yields in reaction centers from photosynthetic bacteria ». In : *Biophysical Journal* 45.2 (1^{er} fév. 1984), p. 455-461. ISSN : 0006-3495. DOI : 10.1016/S0006-3495(84)84168-5. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0006349584841685> (visité le 19/05/2023).
- [8] *Agrivoltaïque*. In : *Wikipédia*. Page Version ID : 204076201. 8 mai 2023. URL : <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Agrivolta%C3%AFque&oldid=204076201> (visité le 19/05/2023).
- [9] Junko MOVELLAN. *Japan Next-Generation Farmers Cultivate Crops and Solar Energy*. Renewable Energy World. 10 oct. 2013. URL : <https://www.renewableenergyworld.com/solar/japan-next-generation-farmers-cultivate-agriculture-and-solar-energy/> (visité le 19/05/2023).
- [10] *L'agrivoltaïque, un concept innovant au service de l'agriculture et de l'environnement*. Leaders. URL : <https://www.leaders.com.tn/article/34033-1-agrivoltaïque-un-concept-innovant-au-service-de-l-agriculture-et-de-l-environnement> (visité le 19/05/2023).
- [11] EDERA.DIGITAL. *REM Tec - La soluzione per il fotovoltaico legata all'agricoltura*. URL : <https://remtec.energy/en/agrovoltaico/installations/29-borgo-virgilio> (visité le 19/05/2023).

- [12] EDERA.DIGITAL. *REM Tec - La soluzione per il fotovoltaico legata all'agricoltura*. URL : <https://remtec.energy/en/agrovoltaico/installations/32-jinzhai> (visité le 19/05/2023).
- [13] Steve HANLEY. *Fraunhofer Experiments In Chile And Vietnam Prove Value Of Agrophotovoltaic Farming*. CleanTechnica. 21 juin 2018. URL : <https://cleantechnica.com/2018/06/21/fraunhofer-experiments-in-chile-and-vietnam-prove-value-of-agrophotovoltaic-farming/> (visité le 19/05/2023).
- [14] The Solar Energy Technologies Office (SETO). « DOE : Market Research Study Agrivoltaics ». In : (2022).
- [15] *Résultats Viticulture*. Sun'Agri. URL : <https://sunagri.fr/resultats-viticulture/> (visité le 19/05/2023).
- [16] Richard H. SMITH. *Novel plant design for agrivoltaics*. pv magazine International. 5 août 2021. URL : <https://www.pv-magazine.com/2021/08/05/novel-plant-design-for-agrivoltaics/> (visité le 19/05/2023).
- [17] Xu-Hui HE, Hao DING, Hai-Quan JING et al. « Mechanical characteristics of a new type of cable-supported photovoltaic module system ». In : *Solar Energy* 226 (15 sept. 2021), p. 408-420. ISSN : 0038-092X. DOI : 10.1016/j.solener.2021.08.065. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X21007283> (visité le 19/05/2023).
- [18] Xu-Hui HE, Hao DING, Hai-Quan JING et al. « Wind-induced vibration and its suppression of photovoltaic modules supported by suspension cables ». In : *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 206 (1^{er} nov. 2020), p. 104275. ISSN : 0167-6105. DOI : 10.1016/j.jweia.2020.104275. URL : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610520301859> (visité le 19/05/2023).
- [19] *Conger Solar Systems – Patented Technology – Conger Solar Systems*. URL : <https://www.conger.solar/technology/> (visité le 19/05/2023).
- [20] John PERLIN. *From space to earth : the story of solar electricity*. Ann Arbor, Mich : Aatec Publications, 1999. 224 p. ISBN : 978-0-937948-14-9 978-0-937948-15-6.
- [21] *Certificat vert*. In : *Wikipédia*. Page Version ID : 197557780. 7 oct. 2022. URL : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Certificat_vert&oldid=197557780 (visité le 22/05/2023).
- [22] *Analyse de cycle de vie : structures en bois, en acier et en béton*. Section : Guides. URL : <https://www.ecohabitation.com/guides/1012/pourquoi-la-structure-bois-lemporte-reellement-face-a-lacier-et-au-beton/> (visité le 22/05/2023).
- [23] Chambre d'agriculture du Centre Val de LOIRE. *Photovoltaïque*. 17 mars 2023. URL : <https://centre-valdeloire.chambres-agriculture.fr/produire-innover/energies/photovoltaique/> (visité le 07/04/2023).
- [24] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 1 : Actions on structures - Part 1-4 : General actions - Wind actions*. Rapp. tech. Avenue Marnix 17, B-1 000 Brussels, 2010.
- [25] URL : <https://eurocodes-tools.com/fr/eurocodes-zoning> (visité le 08/02/2023).
- [26] *Nos câbles*. Câbleries Namuroises. URL : <https://www.cabnam.be/fr/catalogue> (visité le 10/04/2023).
- [27] Braja DAS. *Principle of Foundation Engineering*. 7^e éd. Global Engineering : Christopher M. Shortt, 2007.

- [28] *Tubes carrés & rectangulaires | Aciers Grosjean*. URL : <https://pro.aciersgrosjean.be/public/28> (visité le 11/05/2023).
- [29] FÉDÉRATION NATIONALE DES EXPERTS FORESTIERS A.S.B.L. *Prix moyens des bois sur pieds*. Rapp. tech. Avenue Gouverneur Bovesse, 112/18, 5100 JAMBES, 2023.
- [30] *Quelle transition écologique pour l'acier en France ?* Réseau Action Climat. 2 août 2022. URL : <https://reseauactionclimat.org/quelle-transition-ecologique-%20pour-lacier-en-france/> (visité le 12/05/2023).
- [31] CATHERINE GUY-QUINT. *Luttez contre le réchauffement climatique : Utilisez le bois*. Rapp. tech. 2007.
- [32] Pierre LATTEUR. *Calculer une structure, De la théorie à l'exemple*. 4^e éd. Editions Academia, 2016.
- [33] PIERRE LATTEUR. *ISSD, Interactive Software for Structural Design*. 1999. URL : <https://www.issd.be/index.html>.
- [34] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 5 : Design of timber structures - Part 1-1 : General - Common rules and rules for buildings*. Rapp. tech. Avenue Marnix 17, B-1 000 Brussels, 2008.
- [35] *Techno Pieux | Documents techniques*. <https://www.technopieux.com/fr-BE/>. URL : <https://www.technopieux.com/fr-BE/documents-techniques/> (visité le 25/04/2023).
- [36] NICOLAS. *ÉTUDE DES MICRO PIEUX VISSÉS (DOSSIER) | GenieCVL*. 29 juin 2014. URL : <https://www.geniecvl.com/etude-des-micro-pieux-visses-dossier/> (visité le 12/05/2023).
- [37] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Eurocode 3 : Design of steel structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. Rapp. tech. Avenue Marnix 17, B-1 000 Brussels, 2005.
- [38] Philippe SAMYN. *Étude de la morphologie des structures : à l'aide des indicateurs de volume et de déplacement*. Classe des sciences, Académie royale de Belgique, 2004.
- [39] *Worldwide map files for any design program | CADMAPPER*. URL : <https://cadmapper.com/> (visité le 05/04/2023).
- [40] Ana SWANSON et Chris BUCKLEY. « Chinese Solar Companies Tied to Use of Forced Labor ». In : *The New York Times* (8 jan. 2021). ISSN : 0362-4331. URL : <https://www.nytimes.com/2021/01/08/business/economy/china-solar-companies-forced-labor-xinjiang.html> (visité le 25/05/2023).
- [41] *Quel est l'impact environnemental des panneaux solaires*. Greenpeace France. 7 mars 2023. URL : <https://www.greenpeace.fr/impact-environnemental-solaire/> (visité le 25/05/2023).
- [42] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. *Bois de structure - Classes de résistance*. Rapp. tech. Avenue Marnix 17, B-1 000 Brussels, 2016.
- [43] *Sous les panneaux solaires, l'ombre du travail forcé en Chine*. BFM BUSINESS. URL : https://www.bfmtv.com/economie/entreprises/industries/sous-les-panneaux-solaires-l-ombre-du-travail-force-en-chine_AN-202104300018.html (visité le 25/05/2023).

Annexes

A Données utilisées pour l'optimisation du volume de matériaux

	Paramètre	Valeur	Source
Relatif aux matériaux	Contrainte résistante des câbles	$f_{y,c\grave{a}ble}$	1960[MPa]
	Contrainte résistante des profilés	$f_{y,profil\acute{e}}$	235[MPa]
	Module élastique des profilés	E_y	210[GPa]
	Contrainte résistante en compression des colonnes	$f_{c,0,k}$	27[MPa]
	Module élastique des colonnes	$E_{0,k}$	10900[MPa]
	Contrainte résistance en flexion des pannes	$f_{m,k}$	24[MPa]
Coefficients de sécurité	Coefficient de sécurité sur le matériau bois	γ_m	1.3[/]
	Coéfficient réducteur sur la classe d'exposition du bois	k_{mod}	0.7[/]
Relatif à la géométrie	Couverture photovoltaïque	ζ	0.35[/]
	Masse surfacique des panneaux et charges	ρ	160[kg/m ²]
	Flèche du câble	H	1.25[m]
	Hauteur de colonne	H_c	8[m]
	Largeur des panneaux photovoltaïques	l_{pv}	2[m]
	Rapport épaisseur/dimensions latérales des profilés	m	0.05[/]
Prix des matériaux	Prix au m ³ des colonnes		500[€/m ³]
	Prix au m ³ des câbles		12120[€/m ³]
	Prix au m ³ des pannes		100[€/m ³]
	Prix au m ³ des profilés		15700[€/m ³]
Coefficients relatif aux prix	Coefficient pour les colonnes		0.5[/]
	Coefficient pour les câbles		12.12[/]
	Coefficient pour les pannes		0.1[/]
	Coefficient pour les profilés		15.7[/]

TABLE 8.1 – Données utilisées pour l'optimisation du volume de matériaux.

1. Exemple de pourcentage de couverture communément accepté.
2. Il s'agit de la masse surfacique des panneaux donnée dans le document [23] à laquelle

s'ajoute les charges de vent et de neige.

3. La flèche est définie arbitrairement de manière à laisser une hauteur suffisante sous panneaux pour le passage d'engins agricoles.
4. La hauteur maximale de colonne est définie selon ce qui est disponible sur le marché.
5. La largeur des panneaux solaires est définie selon ce qui est disponible sur le marché.
6. Dimensions générales disponibles chez *Acier Grosjean* [28].
7. Prix fournis par *La Cablerie Namuroise*.

B Production des modules solaires par classe de puissance et secteur en Wallonie

Catégorie	Nombre de sites	Puissance installée [MWc]	Production [GWh]	Part [%]
$\leq 10[kW]$	176896	1035.7	998.8	75.1%
$> 10[kW]$	2179	337.9	330.6	24.9%
Logement	159208	932.2	899.0	67.6%
Tertiaire	19078	293.5	281.0	21.1%
Industrie	689	142.2	144.1	10.8%
Agriculture	100	5.7	5.4	0.4%
Total	179075	1373.6	1329.5	100%

TABLE 8.2 – Production des modules solaires par classe de puissance et secteur en Wallonie (2020)[2]

C Détail de calcul de la capacité portante du sol pour les fondations des structures hautes

Dans l'éventualité où des micropieux ne seraient pas installés, la portance de la structure serait endossée par le sol et il est donc intéressant d'évaluer la taille d'excavation nécessaire.

Pour la calculer, on se sert du *modèle de Rankine*. L'expression 8.1 exprime la capacité portante d'un sol, supposé sécuritairement comme non-cohésif. Lorsque le poteau est sollicité en compression sans la présence de micropieux, il transfère l'effort au ballast au travers d'une bielle de compression. La base de la fondation est carrée de côté B et de profondeur D comme représenté en figure 8.4. Le *modèle de Rankine* nous permet d'écrire la relation 8.2. Pour cette exemple, il est supposé que l'excavation est cubique et que les valeurs B et D sont donc égales. Il est également supposé que le tronc est enfoncé à une profondeur $D/2$ afin de voir apparaître une bielle de compression à 45° , garantissant ainsi son équilibre et une distribution optimale des efforts dans le sol. La figure 8.4 représente la situation pour laquelle il n'y aurait pas de micropieu.

$$q_f = \gamma D \frac{K_p}{K_a} + \frac{1}{2} \gamma B \frac{\sqrt{K_p}}{2} \left(\frac{K_p}{K_a} - 1 \right) \quad (8.1)$$

$$\Leftrightarrow B = \sqrt[3]{\frac{N}{\gamma \frac{K_p}{K_a} + \frac{1}{2} \gamma \frac{\sqrt{K_p}}{2} \left(\frac{K_p}{K_a} - 1 \right)}} \quad (8.2)$$

Avec : $\gamma = 20[kN/m^3]$	le poids volumique du sol
$K_p = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) = 3[/math>$	le coefficient de butée du sol
$K_a = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) = 0.33[/math>$	le coefficient de poussée du sol
$\phi = 30[^\circ]$	le coefficient de frottement interne du sol
$D[m]$	la profondeur du ballast mis en place
$B[m]$	la largeur du ballast mis en place
$N[kN]$	le chargement axial sur le micropieu

La capacité portante du sol s'avère assez faible comparé aux capacités des micropieux. Premièrement, les poteaux de bout nécessitent l'utilisation de micropieux de par les grands efforts qu'ils subissent. Une excavation cubique de $4[m]$ de côté serait indispensable. Deuxièmement, les poteaux de travée n'aurait besoin que d'une fondation de $60[cm]$ mais sont sollicités en traction et doivent donc être équipé de micropieux. Par conséquent la portance du sol sera ignorée et la performance des fondations se limite à celles des pieux.

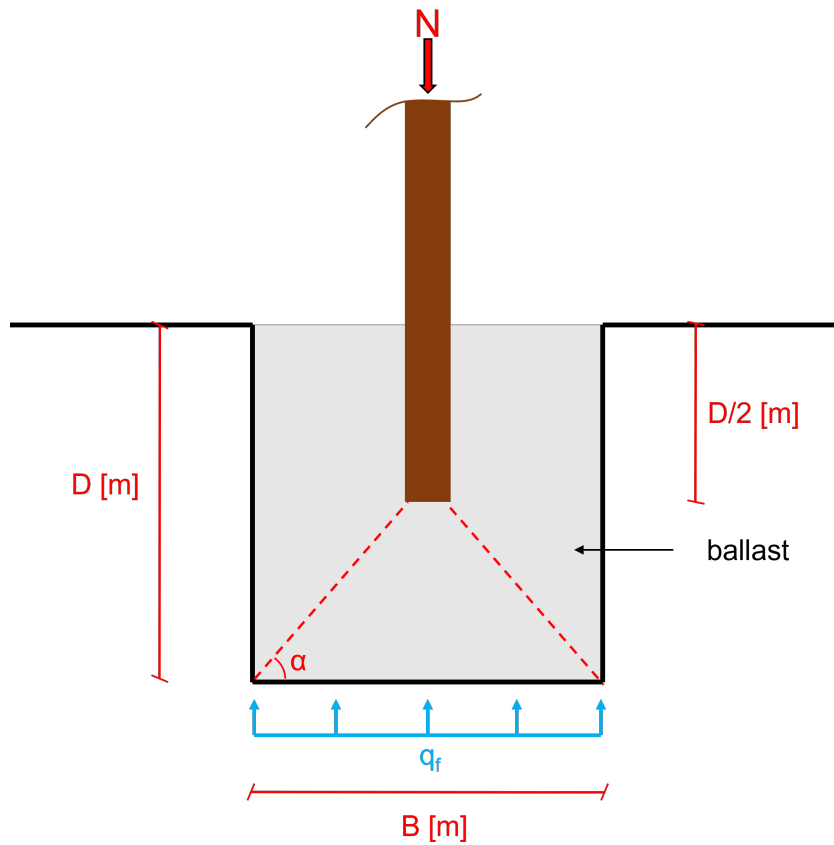


FIGURE 8.4 – Représentation d’une fondation de structure haute sans micropieu.

D Détail du programme GH des structures basses

Voici un lien donnant accès au fichier Grasshopper : https://uclouvain-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/benjamin_dardenne_student_uclouvain_be/EsFqybBizhRKnOTupzCPrX4BtNCZH0ITUyUcIZ1DMG8gA?e=xTXKnG.

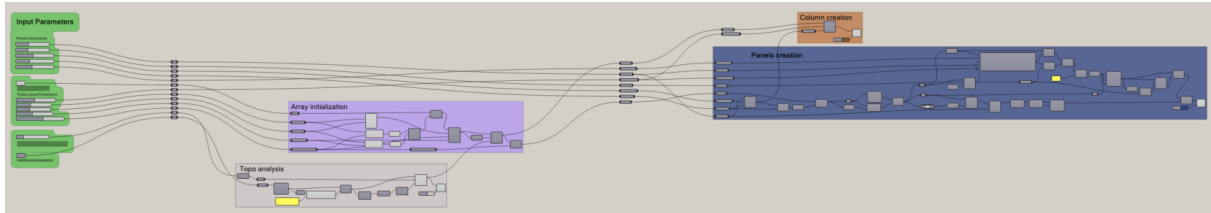


FIGURE 8.5 – Interface GH des structures basses.

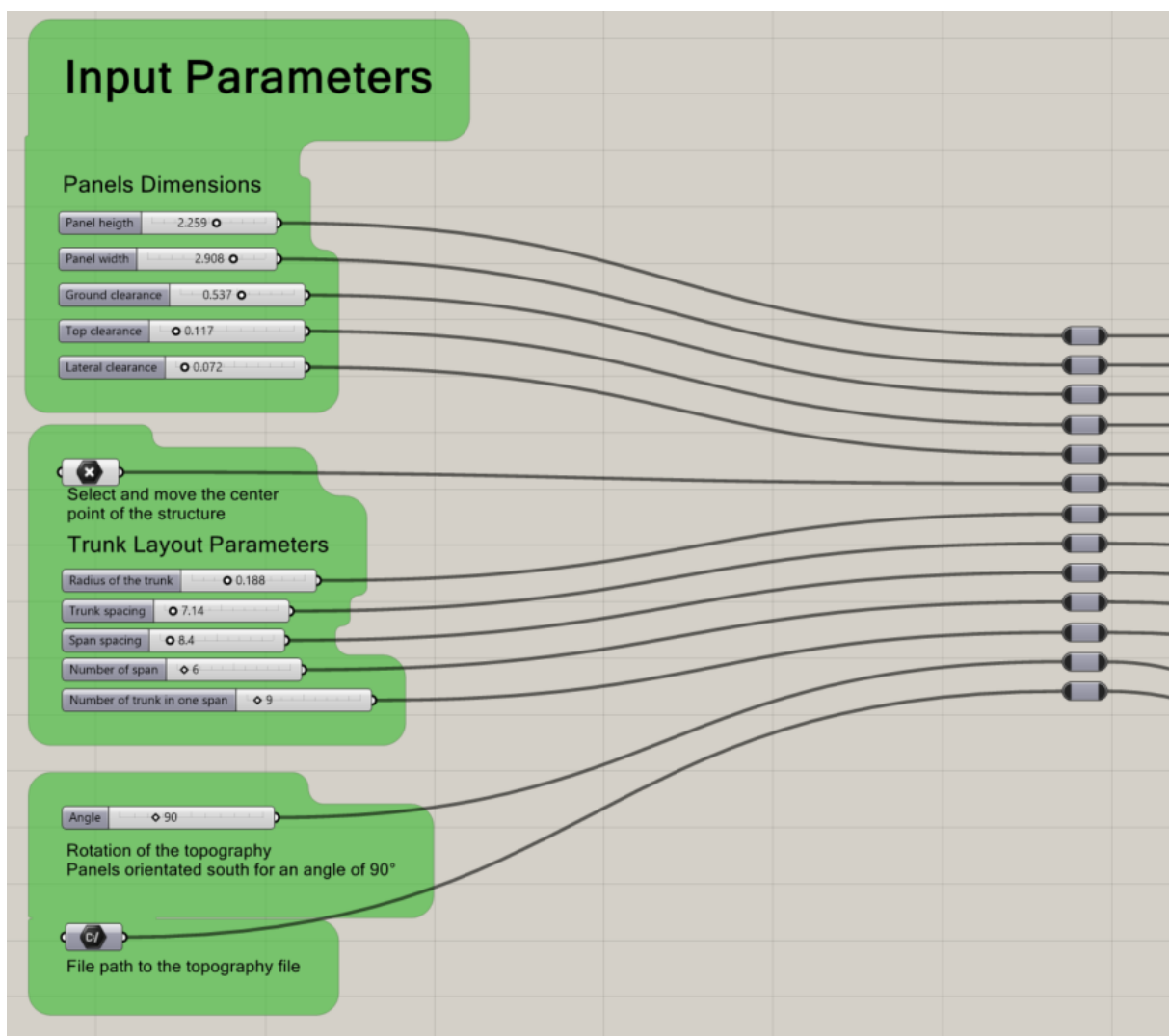


FIGURE 8.6 – Paramètres d'entrée de l'interface GH des structures basses.

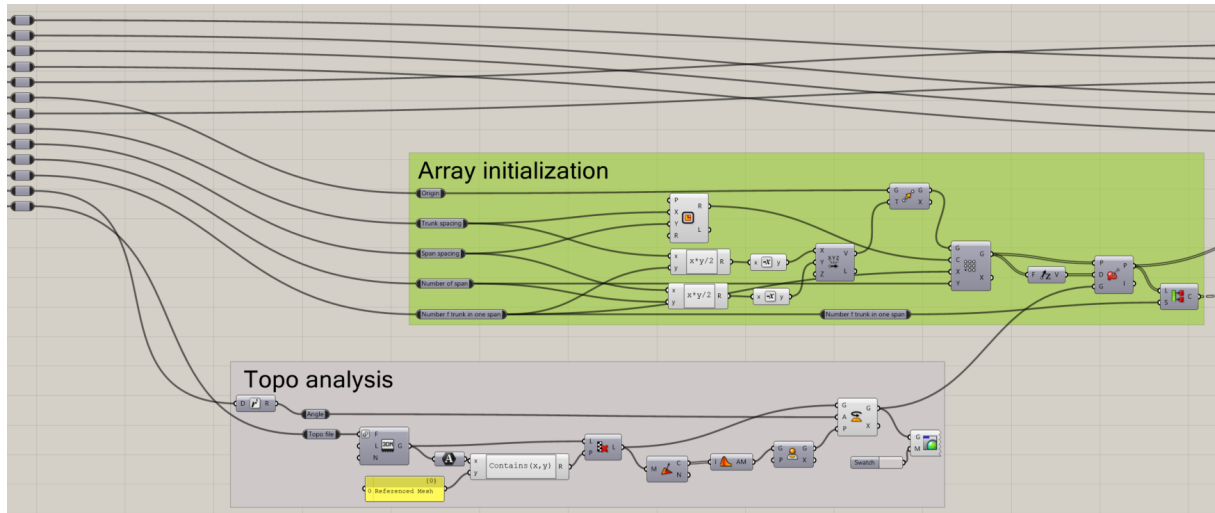


FIGURE 8.7 – Modules d'étude de topographie et d'initialisation des points de bases de l'interface GH des structures basses.

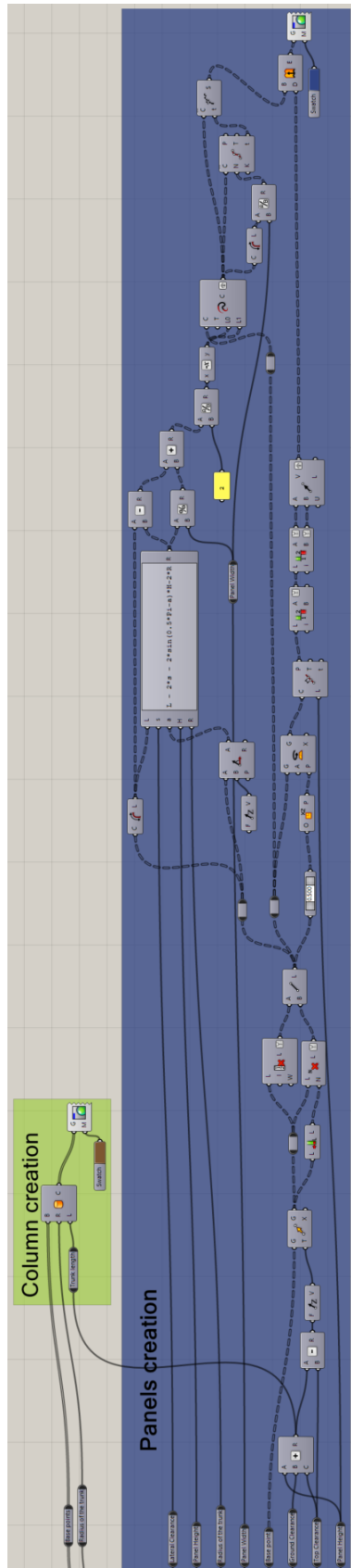


FIGURE 8.8 – Modules de création des panneaux et colonnes de l'interface GH des structures basses.

E Détail du programme GH des structures hautes

Voici un lien donnant accès au fichier Grasshopper : https://uclouvain-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/benjamin_dardenne_student_uclouvain_be/EsFqybBizhRKnOTupzCPrX4BtNCZH0ITUyUcIZ1DMG8gA?e=xTXKnG.

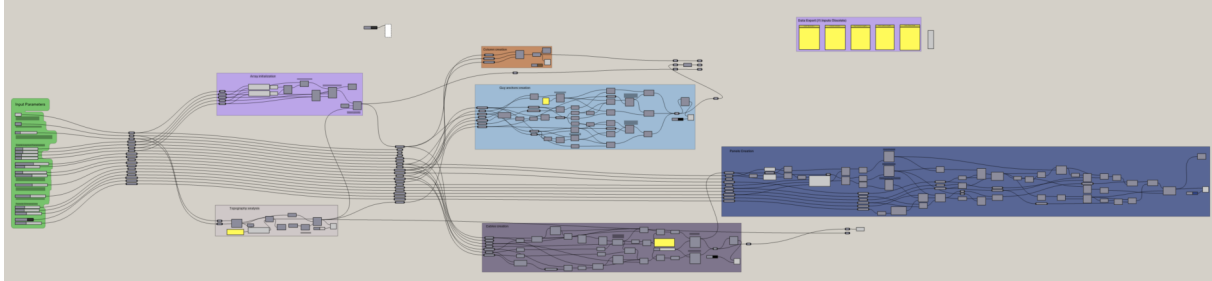


FIGURE 8.9 – Interface GH des structures hautes.

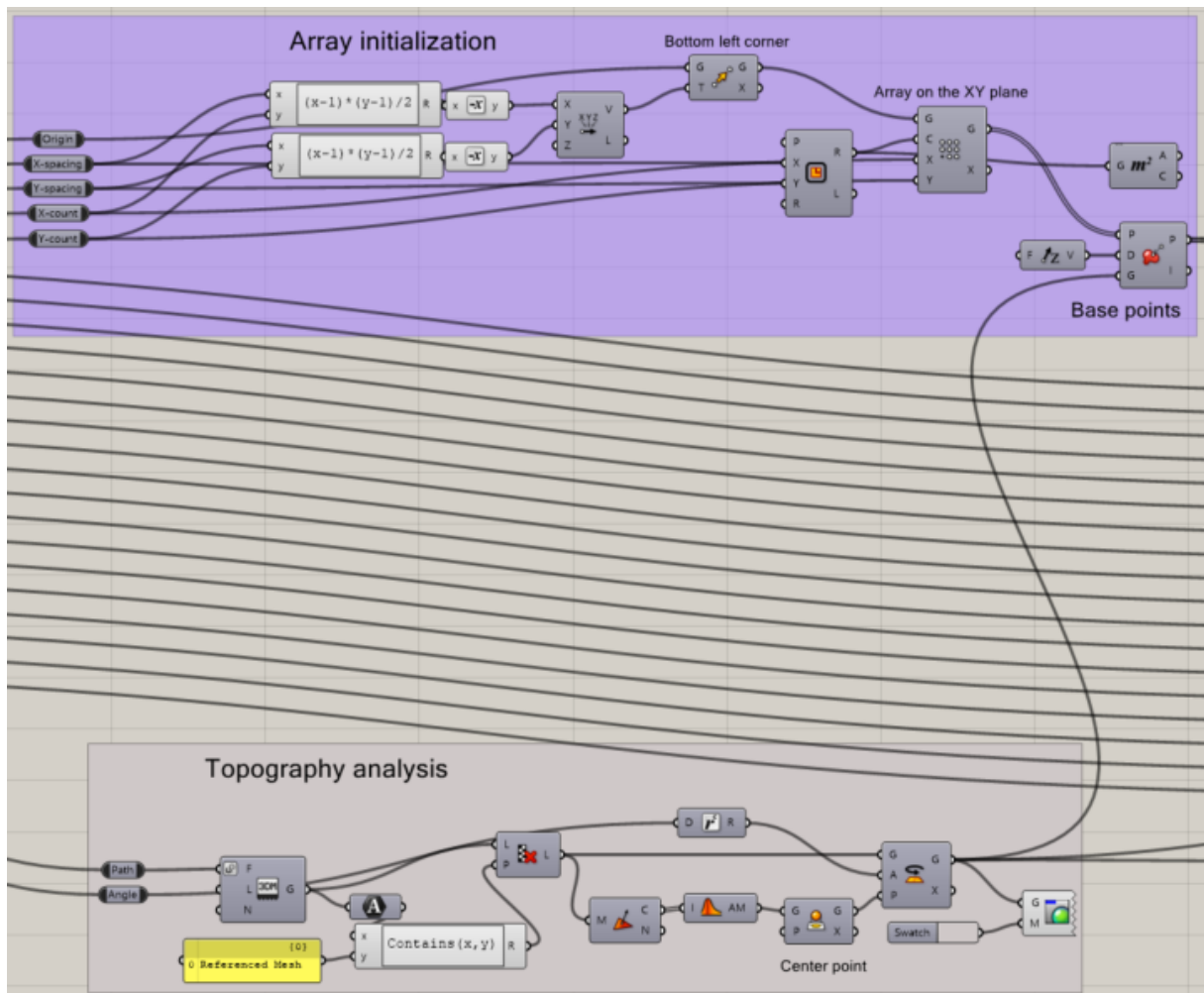


FIGURE 8.10 – Modules d'étude de topographie et d'initialisation des points de bases de l'interface GH des structures hautes.

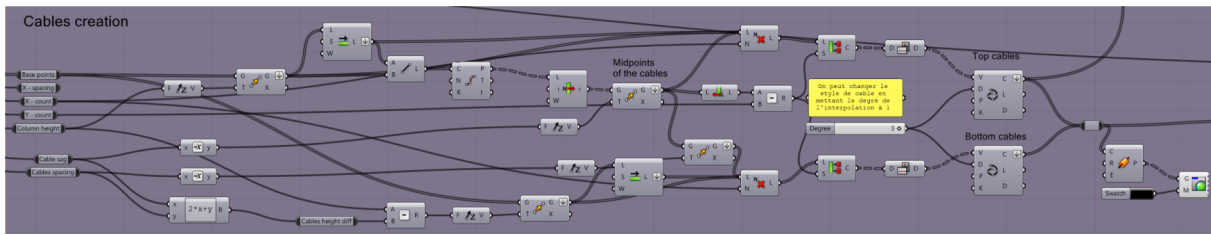


FIGURE 8.11 – Module de création des câbles de l'interface GH des structures hautes.

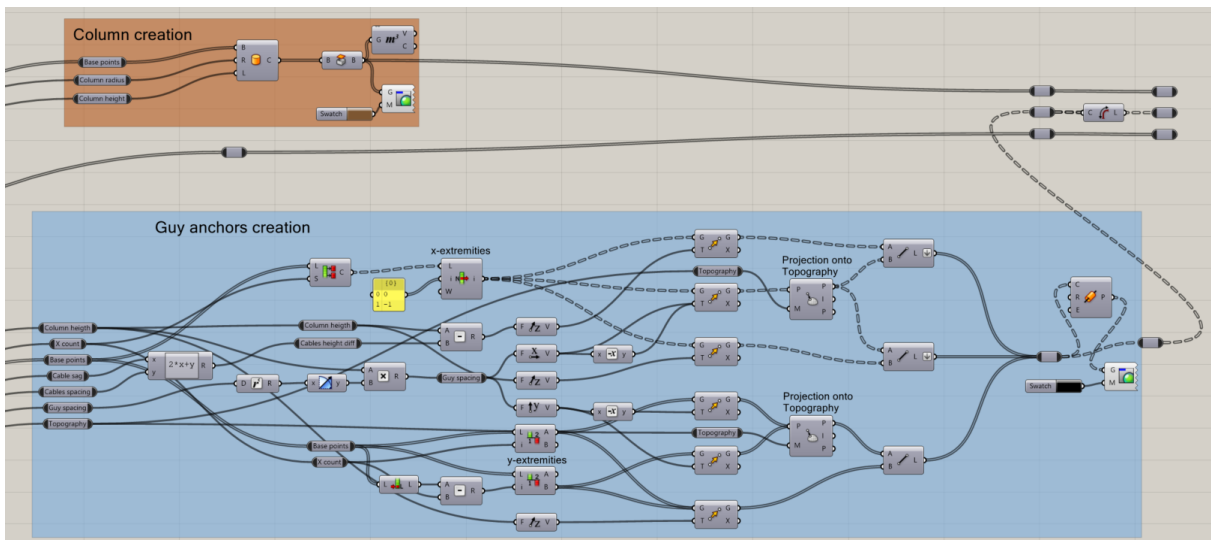


FIGURE 8.12 – Modules de création des haubans et des colonnes de l'interface GH des structures hautes.

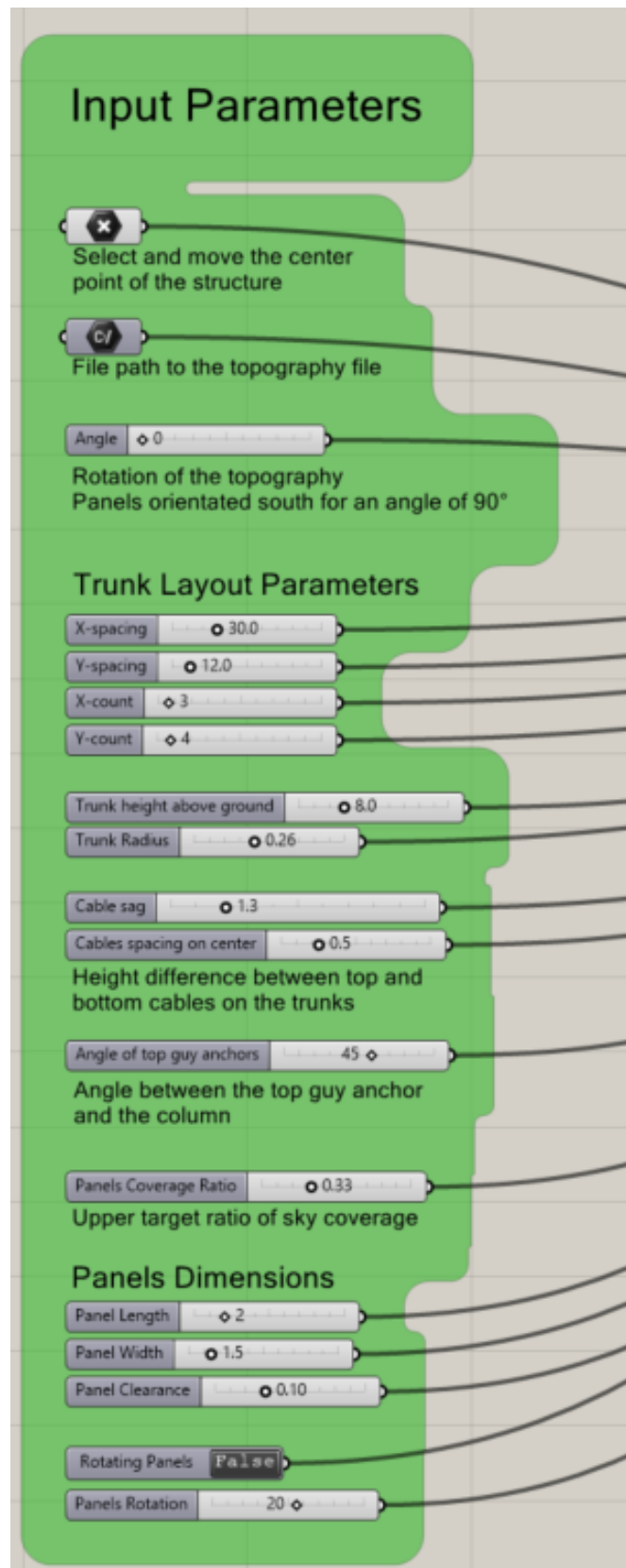
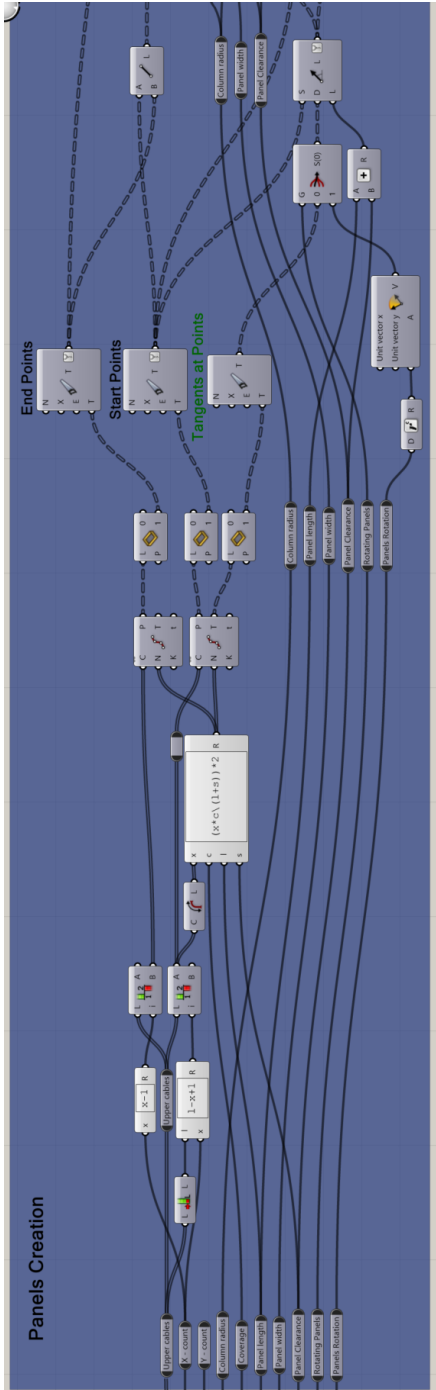
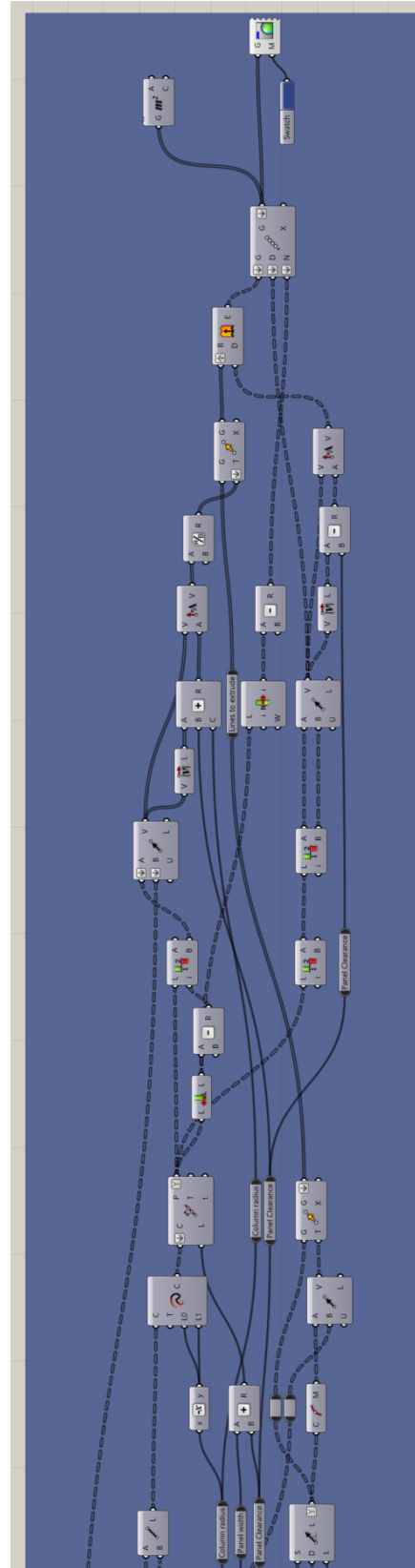


FIGURE 8.13 – Paramètres d'entrée de l'interface GH des structures hautes.



(a) Partie 1.



(b) Partie 2.

FIGURE 8.14 – Module de création des panneaux de l'interface GH des structures hautes.

F Détail de calcul de la pression dynamique de pointe du vent [25]

EUROCODES ZONING

Zones de neige, de vent et de séisme pour un lieu de construction

A - INFORMATIONS GÉNÉRALES

Titre du projet : TFE agrivoltaïsme
Nom du client : UCLouvain
Dernière modification : 2023-02-09 10:45 Version : 01-0719

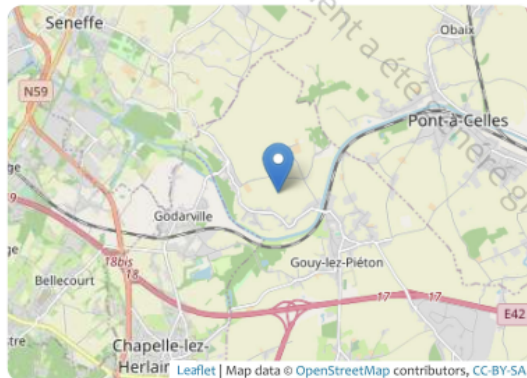
- Eurocodes Zoning est un outil d'aide à la conception. Cette note de calcul ne peut en aucun cas remplacer une étude réalisée par un ingénieur en structure compétent.
- Benjamin DARDENNE de la société UCLouvain s'est engagé à contrôler les données d'entrée et les résultats de cette note de calculs avant toute utilisation.
- En outre, Benjamin DARDENNE et la société UCLouvain déclarent détenir de toutes responsabilités le concepteur du logiciel et ses sociétés en cas d'incident de toute nature que ce soit.

B - DONNÉES

B1 - Localisation



Coordonnées dans le système géodésique mondial 1984 (WGS84) : 50.4995067° , 4.31251987°
Coordonnées dans le système géodésique belge 2008 (Lambert 2008) : 632081 m , 646015 m



Adresse : Rue des Nauwes, 6180 Courcelles, Hainaut



B2 - Altitudes

Au droit de la construction : 141 m

source : European digital elevation model Copernicus 25m



Leaflet | Map data © OpenStreetMap contributors, SRTM | Map style © OpenTopoMap (CC-BY-SA)

B3 - Bâtiment

Type de construction :	hangar agricole ou assimilé
Durée de vie de calcul :	30 ans
Hauteur max :	8.0 m
Orientation depuis le Nord :	0°

B4 - Catégories de terrain



Secteurs	1	2	3	4
Catégories	II	II	II	II

Rayon R du secteur angulaire : 300 m

C - RÉSULTATS

C1 - Neige NBN EN 1991-1-3 ANB (octobre 2007)

Zone : Belgique ($s_{k,0} = 0.5 \text{ kN/m}^2$) Critère pour le zonage : Charleroi, Hainaut (le)/Henegouwen

Charge caractéristique de neige sur le sol à l'emplacement considéré : $s_{k,141 \text{ m}} = 0.548 \text{ kN/m}^2$

Charge de neige sur le sol correspondant à une période de retour de 30 années : $s_{30 \text{ ans}} = 0.492 \text{ kN/m}^2$

C2 - Vent NBN EN 1991-1-4 ANB (décembre 2010)

Zone : 24 m/s Critère pour le zonage : Courcelles, Hainaut (le)/Henegouwen

Zone c_{dir} : Belgique

Secteurs	1	2	3	4
Définition du secteur	de 315° à 45°	de 45° à 135°	de 135° à 225°	de 225° à 315°
Valeur de base de la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$	24 m/s			
Paramètre de forme K	0.2			
Exposant n	0.5			
Probabilité annuelle de dépassement p	0.033			
Coefficient de probabilité c_{prob}	0.97			
Coefficient de direction c_{dir}	1.0	0.925	1.0	1.0
Vitesse de référence du vent v_b	23.3 m/s	21.5 m/s	23.3 m/s	23.3 m/s
Longueur de rugosité de référence $z_{0,II}$	0.05 m			
Longueur de rugosité z_0	0.05 m	0.05 m	0.05 m	0.05 m
Facteur de terrain k_r	0.19	0.19	0.19	0.19
Hauteur au-dessus du sol z	8.0 m			
Hauteur minimale z_{min}	2.0 m	2.0 m	2.0 m	2.0 m
Coefficient de rugosité $c_r(z)$	0.964	0.964	0.964	0.964
Coefficient d'orographie* $c_{or}(z)$	1.0	1.0	1.0	1.0
Vitesse moyenne du vent $v_{m(z)}$	22.5 m/s	20.8 m/s	22.5 m/s	22.5 m/s
Coefficient de turbulence k_t	0.995	0.995	0.995	0.995
Ecart type de la turbulence σ_v	4.404 m/s	4.074 m/s	4.404 m/s	4.404 m/s
Intensité de turbulence $I_v(z)$	0.196	0.196	0.196	0.196
Masse volumique de l'air ρ	1.25 kg/m ³			
Coefficient d'exposition $c_{e(z)}$	2.206	2.206	2.206	2.206
Pression dynamique de pointe $q_{p(z)}$	748.0 N/m ²	640.0 N/m ²	748.0 N/m ²	748.0 N/m ²
Vitesse maximale du vent pour les États Limites de Service $V_{p(z),ELS}$	124.5 km/h	115.2 km/h	124.5 km/h	124.5 km/h
Vitesse maximale du vent pour les États Limites Ultimes $V_{p(z),ELU}$	152.5 km/h	141.1 km/h	152.5 km/h	152.5 km/h

* L'effet de l'orographie n'est pas pris en compte.

C3 - Séisme NBN EN 1998-1 ANB (octobre 2011)

Zone : 4 (0.98 m/s²) Critère pour le zonage : Courcelles, Hainaut (le)/Henegouwen

Une analyse sismique est requise pour ce bâtiment.

G Code Python calculant et représentant l'optimisation du prix surfacique de la structure

```
1 """
2 Created on Wed Apr 19 16:13:41 2023
3
4 @author: Benjamin and Xavier
5 """
6
7 import numpy as np
8 from matplotlib import pyplot as plt
9 from mpl_toolkits.mplot3d import axes3d
10
11 %matplotlib
12
13 #---- Parametres d'entree et de visualisation ----
14 plt.rcParams.update({'font.size': 6})
15 ax = plt.gca()
16
17 fyca = 1960*10**6
18 fy = 235*10**6
19 Eprof = 210*10**9
20 fc0k = 27*10**6
21 Ecol = 10900*10**6
22 fmk = 24*10**6
23 gammaM = 1.3
24 kmod = 0.7
25
26 couv = 0.35
27
28 prixCol = 500 #Prix au m3 d'une colonne de chene
29 prixCable = 12120
30 prixPanne = 100
31 prixProf = 15700
32
33 useTitle = False
34 usePanne = True
35 useLegend = False
36 useMins = True
37
38 rho = 160
39 qp = rho*9.81 #2.51*10**3 #PP panneau + neige + vent pour lpv = 2
40 h = 1.25
41 hc = 8
42 lpv = 2
43
44 alpha = fc0k/fyca
45 beta = h/hc
46 theta = fyca**2/(Ecol*couv*qp)
47
48 m = 0.05
49
50 gamma = (1-(1-2*m)**2)/(1-(1-2*m)**4)**(2/3)
51
52 #---- Parametres a optimiser ----
53 d = np.linspace(2, 15, num=400)
54 L = np.linspace(10, 50, num=400)
55
56
57 #---- Matrices de resultats ----
```

G. CODE PYTHON CALCULANT ET REPRÉSENTANT L'OPTIMISATION DU PRIX SURFACIQUE DE LA STRUCTURE

```
58 Lmat, Dmat = np.meshgrid(L,d)
59 P = np.zeros((len(d), len(L)))
60 xLmin = np.zeros(len(L))
61 zLmin = np.zeros(len(L))
62 yDmin = np.zeros(len(d))
63 zDmin = np.zeros(len(d))
64
65
66 #---- Calcul des resultats ----
67 for i in range(len(d)):
68     for j in range(len(L)):
69         kappa = np.sqrt(1 + (4 * (h / L[j])) ** 2)
70
71         convertir = (hc*qp/fyca) #Ratio convertisseur pour passer de Xi au
           volume de matiere
72
73         vCol = convertir*couv/(2*alpha)*(1+np.sqrt(1+16/np.pi*(h*alpha/(L[j]*
           beta)**2*theta*L[j]/d[i]))
74         vCab = convertir*couv/16*(L[j]/h)**2 *beta*kappa*(kappa+L[j]/(4*h)*np.
           log(4*h/L[j]+kappa))
75         vProf = convertir*couv*beta*(3/4)**(2/3)*d[i]**(4/3)* fyca *fy**(-2/3)*(
           lpv*qp)**(-1/3)*gamma/h
76         vPanne = convertir*couv*beta*(np.pi/4)**(1 / 3)*d[i]**(4/3)*fyca*(gammaM
           /(kmod * fmk)**(2/3)*(lpv * qp)**(-1 / 3)/h
77
78         if usePanne == True:
79             P[i][j] = (vCol*prixCol + vCab*prixCable + vPanne*prixPanne)
80
81         else :
82             P[i][j] = (vCol*prixCol + vCab*prixCable + vProf*prixProf)
83
84 #---- Representation des courbes de minimums ----
85 k = P[i].argmin()
86 xLmin[i] = L[k]
87 zLmin[i] = P[i][k]
88
89 P_t = np.transpose(P)
90 for i in range(len(L)):
91     k = P_t[i].argmin()
92     yDmin[i] = d[k]
93     zDmin[i] = P_t[i][k]
94
95 #---- Calcul des valeurs a l'optimum ----
96 k,p = np.unravel_index(P.argmin(), P.shape)
97 x_min = Lmat[k][p]
98 y_min = Dmat[k][p]
99 z_min = P[k][p]
100
101 print("d optimal = {0}.2f[m] \nL optimal = {1}[m] \nXi l'optimum = {2}[/]".
       format(y_min, x_min, z_min))
102
103 #---- Creation du graphe 3D ----
104 fig = plt.figure()
105 ax = plt.axes(projection='3d')
106 ax.plot_surface(Lmat, Dmat, P,rstride=1, cstride=1,
107               cmap='viridis', edgecolor='none')
108 ax.plot(xLmin, d, zLmin, color='red')
109 ax.plot(L, yDmin, zDmin, color='red')
110 ax.scatter(x_min, y_min, z_min, color='red')
111 ax.set_xlabel("L[m]")
112 ax.locator_params(axis='x', nbins=10)
```

```
113 ax.set_ylabel('d[m]')
114 ax.locator_params(axis='y', nbins=8)
115 ax.set_zlabel("Prix[ /m^2]")
116 ax.locator_params(axis='z', nbins=8)
117 plt.show()
```


UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl