

École polytechnique de Louvain

Conception, optimisation, construction et test d'une barrière agrivoltaïque oscillante avec structure portante en bois brut

Auteur: **Guillaume DONCKERS**

Promoteur: **Pierre LATTEUR**

Lecteurs: **Benjamin DARDENNE, Frédéric LEBEAU, Michel MONHON-VAL**

Année académique 2024–2025

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Abstract

Pour répondre à la demande mondiale en énergie qui n'a de cesse de croître chaque année, les différents acteurs du secteur énergétique cherchent sans cesse de nouveaux moyens de produire de l'énergie. Parmi ceux-ci, ces dernières années ont vu apparaître de plus en plus le photovoltaïque.

Majoritairement utilisé en toiture, les centrales photovoltaïques sont encore assez rares et peinent à se développer. Souvent grandes et réalisées en acier, celles-ci ne convainquent pas toujours l'opinion publique. Du côté des exploitants agricoles, c'est plutôt l'espace qu'occupent ces centrales qui posent un problème, ces dernières empiétant sur les espaces destinés à la culture. Ce conflit d'usage a donné naissance à une toute nouvelle discipline, l'agrivoltaïsme.

Ce sont plus précisément les barrières agrivoltaïques qui nous intéresseront au travers de ce mémoire. Ce système propose de placer les panneaux à la verticale, réduisant ainsi l'empreinte au sol. Cependant, ces structures utilisent généralement de l'acier, un matériau assez polluant. L'idée amenée par ce mémoire et d'étudier la faisabilité d'utiliser du bois brut non traité pour réaliser la structure portante, tout en diminuant les contraintes au moyen d'un système de panneau oscillant dont le fonctionnement se rapproche d'un linge sur une corde. Ce mécanisme a pour but de diminuer les efforts agissant sur la structure.

Ce travail s'appuie tout d'abord sur une étude théorique du cas présenté, accompagnée d'un dimensionnement complet d'un module. Un essai en soufflerie viendra ensuite compléter l'analyse afin de déterminer les modèles théoriques à utiliser pour ces cas. Ces résultats seront ensuite confirmés par un prototype à taille réelle, véritable laboratoire en extérieur qui permettra de découvrir les avantages et inconvénients de ce type de structure tout en analysant celle-ci au travers de différents capteurs.

L'objectif est donc de prouver si oui ou non ce genre de structure peut être la source d'énergie de demain au travers de différentes étapes. En bref, ce mémoire a pour but de concevoir, optimiser, construire et tester une barrière agrivoltaïque oscillante en bois brut.

Remerciements

Ce mémoire n'aurait jamais pu aboutir à ce qu'il est sans l'aide précieuse de nombreuses personnes qui m'ont aidé et entouré.

Je remercie tout d'abord mon promoteur, le Professeur Pierre Latteur. Son regard expert et ses connaissances aussi bien théoriques que pratiques ont été une aide précieuse, tout comme ses nombreux conseils.

Benjamin Dardenne m'a également apporté une aide précieuse sans laquelle le projet n'aurait pas pu aboutir aussi loin. Je le remercie pour son aide lors de l'installation du prototype ainsi que pour les réponses à mes nombreuses questions. Je tiens également à remercier Basile Payen, Martin Petitjean et Justin Grosses pour leur aide lors de la mise en place du prototype.

Je tiens à remercier les membres de l'iMMC qui m'ont aidé à travers ce mémoire. Pierre Mertens de Wilmars et Justin Toussaint du LEMSC, pour leur précieuse aide lors de l'élaboration pratique du prototype ainsi qu'Antoine Bietlot et Alex Bertholet pour leur aide dans le cadre de l'instrumentation de ce dernier. Je remercie tout particulièrement Julien Dandoy pour sa rapidité et son aide précieuse lors de la réalisation de l'essai en soufflerie.

Je remercie également Hugues Falys du Centre Alphonse de Marbaix (Ferme de Corroy) pour sa mise à disposition de la prairie sur laquelle est placé le prototype ainsi que pour le matériel fourni pour l'installation de ce dernier.

Merci également au Professeur Frédérique Lebeau pour avoir fourni les quatre panneaux photovoltaïques installés sur le prototype.

Je remercie mon jury pour leur intérêt envers ce mémoire et le temps consacré à la lecture de celui-ci.

Je tiens à remercier également ma maman pour son aide indispensable dans la relecture et la correction de ce mémoire. Et mon grand-père, Claude, pour m'avoir fourni le bois nécessaire à la réalisation du prototype.

Je tiens également à adresser un grand merci à tous ceux que j'ai pu croiser durant ces cinq années d'études à l'EPL et qui ont rendu cette expérience inoubliable et riche en apprentissage.

Enfin, un merci tout particulier à Clarisa, qui m'a accompagnée tout au long de ce mémoire et de ces dernières années d'études, pour son soutien infaillible qui m'a permis d'arriver jusqu'ici.

Table des matières

I	Introduction	1
1	Introduction	1
2	L'agrivoltaïque, une discipline en plein essor	3
3	Barrières à panneaux oscillants	6
4	Vitesses de vents et efforts générés	8
4.1	Étude des vitesses de vent	8
4.2	Calcul d'un panneau fixe	11
5	Objectifs du mémoire	14
II	État de l'art	16
6	État de l'art	16
III	Étude structurale : Efforts de vent et modélisation	22
7	Schémas et équilibre des efforts sur un module de barrière à panneaux oscillants . .	22
7.1	Hypothèses	22
7.2	Schéma statique et efforts transmis	22
7.3	Critères de dimensionnement des éléments bois	24
8	Calcul des efforts de vent	25
9	Modélisation du centre de pression	27
9.1	Modèle de Holmes	28
9.2	Modèle de Richards	29
9.3	Choix du modèle	30
10	Calcul du coefficient C_N	31
10.1	Modélisation selon l'Eurocode	31
10.2	Modèles analytiques	34
10.3	Modèles empiriques	38
11	Comparaison des différents modèles	41
11.1	Relation angle-vitesse	41
11.2	Efforts adimensionnels	43
12	Étude en soufflerie	45

12.1	Installation et protocole expérimentale	46
12.2	Résultats des essais	49
12.3	Comparaison avec les modèles existants.	50
13	Efforts de vents sur la structure	50
13.1	Quel impact sur le dimensionnement	52
IV	Étude du prototype	54
14	Dimensionnement d'un module de deux panneaux	54
14.1	Dimensions des éléments	54
14.2	Fiche minimale de la structure	58
14.3	Plan de la structure	59
15	Conception du prototype	59
15.1	Assemblages bois-bois	59
15.2	Assemblages panneaux-portique	61
15.3	Traitement spécifique du bois	65
15.4	Instrumentation du prototype	66
16	Installation du prototype	67
16.1	Localisation	67
16.2	Matériaux utilisés	68
16.3	Première version du prototype	68
16.4	Seconde version du prototype	71
17	Analyse des prototypes	72
17.1	Analyse des mesures	72
17.2	Interprétation des résultats et comparaison avec les modèles théoriques . .	78
17.3	Analyse structurale	81
V	Discussion	84
VI	Conclusion	88
	Bibliographie	92
A	Types de structures agrivoltaïques	94
B	Plan d'assemblage	95
C	Étude de rentabilité du système	98
1	Étude de rentabilité	98
1.1	Production électrique	98
1.2	Rentabilité	99

D Étude dynamique du système	101
E Notice sur l'utilisation de l'intelligence artificielle	103

Chapitre I

Introduction

1 Introduction

Depuis aussi longtemps que l'on sait la mesurer, la consommation mondiale en énergie primaire (énergie à la source avant transformation) n'a cessé de croître, à l'exception des périodes de crises économiques ou géopolitiques majeures. Depuis le début des années 1980, cette hausse s'est maintenue à environ 1.8% par an, ce qui montre bien l'augmentation constante des besoins énergétiques de l'humanité.

Cette évolution de l'utilisation énergétique de l'humanité montrée à la figure I.1 permet également de se rendre compte de la part importante que prennent les énergies fossiles dans notre quotidien. C'est en effet plus de 80% de la consommation énergétique qui prend sa source dans le fossile. (30% de pétrole, 27% de charbon et 24% de gaz naturel) ([Service des données et études statistiques \(SDES\), 2024](#))

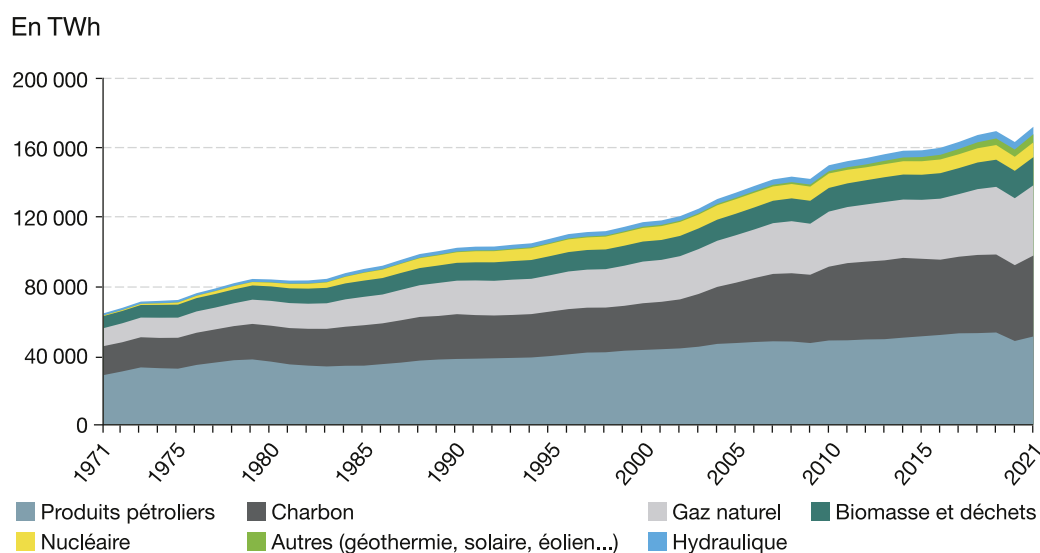


FIGURE I.1 – Évolution de la consommation d'énergie mondiale par type d'énergie. ©SDES

Bien que la part du pétrole dans le bouquet énergétique ait diminuée au cours des 40 dernières années, le gaz et le charbon ont quant à eux connu une progression.

Les autres sources d'énergie sont principalement représentée par la biomasse et les déchets (10%), et le nucléaire (5%). Le reste du mix énergétique est assez marginal avec seulement 5.2% d'énergie renouvelable parmi lesquels on compte l'hydraulique (2.5%), l'éolien, le solaire, la géothermie, etc.

On peut cependant se demander si ces chiffres s'appliquent également à la Belgique. La figure I.2 représente le mix énergétique belge qui est plus "vert" que le mix mondial sans pour autant que les énergies renouvelables en soient la source principale. Il est également bon de noter que ce graphique ne prend en compte que la consommation pour la production électrique et non pas l'énergie primaire (on exclut donc les carburants, le chauffage,...).

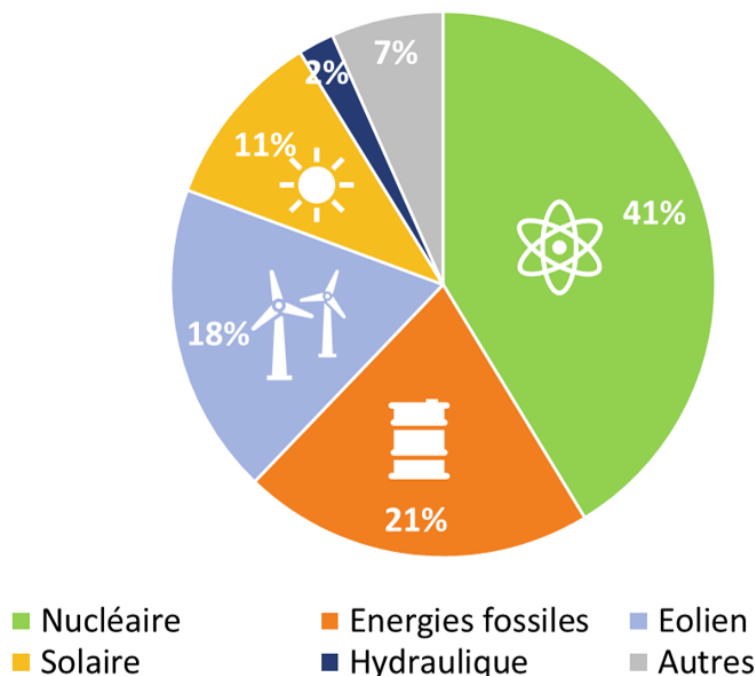
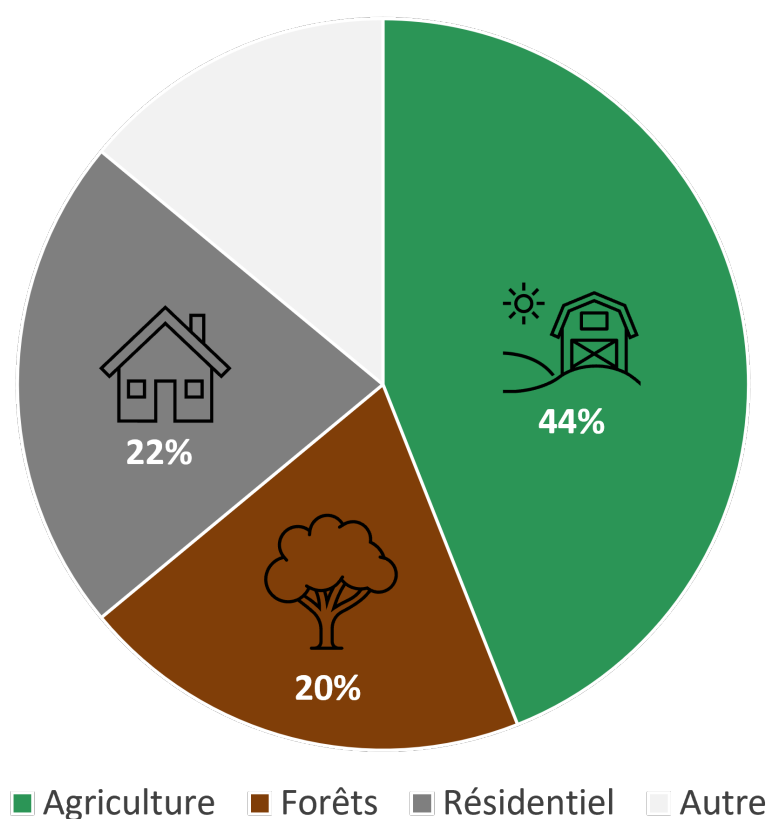


FIGURE I.2 – Principales sources de production électrique en Belgique.¹

Bien que les énergies renouvelables soient plus présentes que dans le mix mondial, elles ne représentent que 38% de la production électrique belge. Parmi celles-ci, le photovoltaïque est responsable de 11% de la production dont une grande partie des installations est résidentielle, en toiture.

La faible utilisation des énergies renouvelables, plus particulièrement du photovoltaïque, est due à plusieurs facteurs. Parmi ceux qui freinent une utilisation plus vaste de ce moyen de production, on compte notamment le fait que cette énergie est intermittente et dépendante de l'ensoleillement, ou encore que le stockage du surplus est compliqué et assez cher.

Enfin, un frein important à l'utilisation du photovoltaïque est la place nécessaire pour installer les panneaux photovoltaïques. En effet, il faudrait environ $32.4[km^2]$ pour produire annuellement l'électricité équivalente à la production d'un réacteur nucléaire. Ceci reviendrait à couvrir intégralement la ville de Bruxelles de panneaux photovoltaïques.

FIGURE I.3 – Occupation du sol en Belgique.²

Afin de trouver une solution à ce problème de place, on peut s'intéresser à l'occupation du territoire en Belgique. La figure I.3 montre assez clairement que la majorité du territoire belge est représenté par l'agriculture. Ceci est assez intéressant, car les terres agricoles sont généralement assez vaste, elles permettraient donc l'installation d'infrastructures photovoltaïques. Ce type d'installation fait partie intégrante d'une discipline que l'on appelle l'agrivoltaïque.

2 L'agrivoltaïque, une discipline en plein essor

L'agrivoltaïque est une discipline qui allie la production agricole et la production photovoltaïque. L'idée est assez récente et est née vers 1981 par A. Goetzberger et A. Zastrow dans leur ouvrage « On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation ». ([Goetzberger and Zastrow, 1982](#)) L'idée principale est de pouvoir exploiter les vastes terres agricoles afin d'y placer de grandes installations photovoltaïques sans pour autant empêcher l'exploitation des terres. Ces structures peuvent même s'avérer complémentaires aux exploitations agricoles, permettant, par exemple, de créer de l'ombre pour des plantations ou du bétail.

Ces structures sont encore assez peu répandues dans le monde bien qu'un certain type se développe de plus en plus, il s'agit des structures basses à panneaux inclinés. Ce sont les structures types que l'on retrouve dans la plupart des fermes solaires comme la centrale photovoltaïque de Moha, visible à la figure A.1 :



FIGURE I.4 – Centrale photovoltaïque de Moha, Belgique. ©RTBF

Ce genre de centrales sont assez intéressante pour leurs capacités de production électrique, mais elles ne sont en revanche pas idéales pour l'exploitation agricole. En effet, les structure portante à panneaux inclinés tels que présentés sur la figure I.5, ne permettent que la culture de l'herbe ou l'élevage de bétail.



FIGURE I.5 – Utilisation des espaces agricoles pour l'élevage. ©Harry Koerber

Afin de permettre une vraie exploitation agricole, d'autres types de structures existent. Parmi ces dernières, on retrouve deux types principaux.

Les structures basses (figure I.6a), parmi lesquelles on retrouve notamment les structures à panneaux inclinés, mais aussi les barrières ou haies photovoltaïques. Ces types de structures sont dotées de panneaux bifaciaux placés à la verticale permettant notamment de diminuer l'empreinte au sol,

allouant donc un maximum d'espace à l'activité agricole. Ce genre de structure verticale permet de réaliser presque tous les types de cultures et d'élevage.

Les structures hautes (figure I.6b), existent sous plusieurs formes, toutes plus ou moins similaires dans leur fonctionnement. Elles sont composées de poteaux entre lesquels sont suspendus des panneaux PV, fixés sur des poutres, des câbles ou encore des grumes.



(a) Structure basse. ©Next2Sun



(b) Structure haute. ©Alliance BFC

FIGURE I.6 – Types de structures agrivoltaïques.

Les structures présentées sur la figure I.6 montrent assez bien la possibilité de croiser l'activité de production agricole avec celle de production électrique. Les structures hautes sont particulièrement efficaces pour maximiser la production agricole en limitant leur empreinte au sol à seulement quelques poteaux. Ce type de structure en canopée se développe de plus en plus et a également fait l'objet par le passé d'un mémoire complet réalisé par Benjamin Dardenne et Xavier de Liedekerke de Pailhe ([de Liedekerke de Pailhe and Dardenne, 2023](#)). Les structures basses verticales, de type barrière, sont quant à elles plus demandeuses en place. Leur installation nécessite environ 10% de la zone agricole, laissant donc la majorité de l'espace libre pour l'exploitation agricole.

La première pensée qui peut venir lorsque l'on voit des barrières photovoltaïques est de se demander s'il est bien rentable de placer les panneaux à la verticale plutôt que de les incliner comme on le voit traditionnellement. Cette position verticale amène en réalité un avantage non négligeable parmi tant d'autres.

Le fait que les panneaux placés à la verticale et soient bifaciaux leur permet de produire de l'électricité indépendamment du fait que le soleil soit en face ou derrière ce dernier. Le fait qu'ils soient bifaciaux permet de placer les panneaux sur un axe nord-sud, exposant ainsi les faces respectivement à l'est et à l'ouest. Cette exposition permet aux panneaux d'être exposés, et donc de produire, dès le lever du soleil et jusqu'à son coucher, périodes où les panneaux placés de manière traditionnelle produisent le moins, alors que ce sont les périodes durant lesquelles la demande d'électricité est la plus élevée.

Cependant, l'avantage que présentent les panneaux à être placés à la verticale peut aussi s'avérer être un défaut lorsque le vent se lève. Les panneaux placés de cette manière vont agir comme une grande voile, le vent va appliquer une pression sur ceux-ci créant des efforts pouvant être importants. Pour palier à ce problème, les structures sont généralement renforcées et relativement massives, mais cette solution n'est pas forcément la plus économique ni écologique. D'autres solutions ont donc été explorées dans le but de réduire les efforts et donc la quantité de matériaux à utiliser. Parmi celles-ci, on retrouve notamment l'idée de barrières à panneaux oscillants.

3 Barrières à panneaux oscillants

Afin de limiter les efforts agissant sur la structure, une des solutions est de laisser les panneaux osciller librement au gré du vent. Ainsi les panneaux vont naturellement se placer dans une position d'équilibre tout en laissant le vent s'écouler sous ces derniers. La figure IV.4 illustre assez bien ce système, on peut voir les panneaux d'une structure osciller librement face au vent.

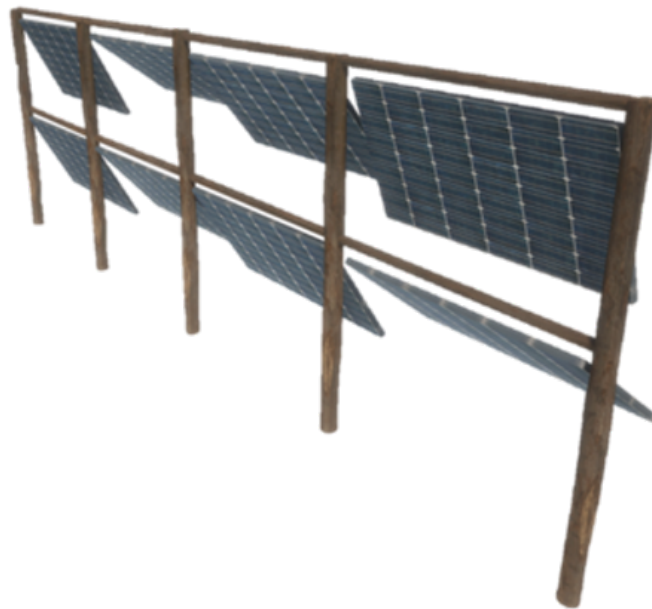


FIGURE I.7 – Exemple de structure libre. ©B. Dardenne

Cette idée est assez novatrice et est assez peu développée. On ne compte que quelques ouvrages sur le sujet et la société VeCon semble être la seule entreprise à produire cette solution. Encore à l'état de prototype, la société a notamment installé un projet pilote en Italie, visible sur la figure II.5 :



FIGURE I.8 – Projet pilote de VeCon en Italie. ©VeCon

Cependant, les structures présentes actuellement sur le marché ne sont pas vraiment écologiques. Elles sont toutes conçues en aciers, sont souvent assez lourdes visuellement et nécessitent des machines lourdes pour être installées. Il y a donc matière à réfléchir à une amélioration. Et c'est là tout

l'objectif du mémoire. Comment concevoir des barrières agrivoltaïques à panneaux oscillants ayant une empreinte écologique la plus faible possible, mais aussi qui soit facile à installer, idéalement par maximum deux personnes. L'idée est d'imaginer un système simple et efficace pouvant être par exemple installé par un exploitant agricole accompagné d'une autre personne.

Une question vient donc se poser, quel matériau utiliser ? De nos jours, la plupart des structures sont réalisées en acier, un matériau efficace, connu, simple à travailler et dont on connaît la durabilité dans le temps. Au travers des différents exemples commerciaux (voir figure I.9) qui seront détaillés plus tard, nous retrouvons quasiment intégralement des structures réalisées à base d'acier. Cependant, dans le contexte actuel, l'acier ne semble pas être la solution la plus idéale. En effet, la production d'une tonne d'acier recyclé (le moins polluant) produit entre 0.62 et 0.85 tonne de CO_2 (UCLouvain, 2024) et requiert 1 444.44 kWh d'énergie primaire pour être fabriqué. (Basirat and Nicholas, 2022) À titre de comparaison, cette consommation d'énergie ainsi que ces émissions de CO_2 équivalent à environ 3 000 km en voiture thermique.



FIGURE I.9 – Structure fixe en acier. ©Next2Sun

On peut dès lors se demander si l'utilisation d'autres matériaux ne serait pas plus pertinente et c'est là qu'entre en jeu le bois. Un matériau naturel, qui capte jusqu'à 1.5 tonne de CO_2 et produit jusqu'à 1.1 tonne d'oxygène par tonne de bois. Qui plus est, le bois est un matériau qui ne nécessite que peu d'énergie pour être exploité. Habituellement, dans le secteur de la construction, on retrouve le bois sous une forme retravaillée, cependant le bois sous cette forme représente un coût énergétique assez important (transport, sciage, séchage, etc.). L'utilisation du bois de manière moins énergivore peut se faire au travers de l'utilisation de troncs d'arbres bruts non retravaillés, aussi appelé grumes. L'utilisation des grumes est aujourd'hui la manière la plus écologique d'utiliser du bois, les seules émissions liées à son utilisation sont l'abattage, le transport et la mise en place de ce dernier. Qui plus est, le fait de ne pas travailler le bois permet moins de perte de matière tout en réduisant l'usage de produits chimiques. L'utilisation de grumes possède également un avantage non négligeable par rapport au bois scié, à savoir la conservation des qualités mécaniques, car il n'y a pas d'affaiblissement lié au débitage du bois. Le bois brut présente aussi un avantage économique non négligeable vis-à-vis du bois scié, car la tonne de bois brut coûte entre 100 et 120€ contre 250 à 400€ pour le bois scié et ce prix pourrait continuer d'augmenter au cours des années. (Latteur, 2024)

Afin de réduire l'empreinte écologique des structures, le bois qui sera considéré au cours de ce travail est un bois classique et trouvable facilement en Belgique, à savoir du résineux de type D30. Le choix de ce type de bois pour le dimensionnement s'inscrit dans la logique d'utilisation de bois local. On peut imaginer qu'un exploitant agricole puisse, par exemple, utiliser du bois déjà présent sur son

exploitation. Par rapport à l'acier, le bois coutera moins cher, émettra moins de CO₂ et pourra être local. Cependant, le bois offre une résistance moindre par rapport à l'acier qui pour sa part peut subir des contraintes de plusieurs centaines de Mégapascals, là où le D30 se limitera à une résistance en compression de 30[MPa]. Le bois est également, à l'inverse de l'acier, anisotrope, ce qui signifie que ses propriétés varient en fonction de la direction dans laquelle sont exercées les contraintes. C'est donc un matériau avec beaucoup d'avantages, mais qui nécessite un soin et une attention toute particulière, notamment au niveau de la transmission des efforts ou encore au niveau des assemblages.

Au vu du constat dressé au cours de cette introduction, nous pouvons en dégager une question qui est la suivante : Comment concevoir, optimiser, construire et tester une barrière agrivoltaïque oscillante en bois brut ?

4 Vitesses de vents et efforts générés

Bien que les efforts générés par le vent fassent l'objet d'une analyse et d'un protocole complet donné par l'Eurocode, nous pouvons nous demander à quels efforts la structure sera réellement soumise. Pour ce faire, une étude sur le vent et son comportement sera réalisée dans un premier temps. Celle-ci permettra d'analyser les vitesses de vent, l'orientation, la saisonnalité ou encore les périodes de retour du vent. Permettant ainsi de saisir l'impact du vent et de déterminer si l'utilisation de panneaux oscillants a ou non un intérêt. Notamment en analysant les efforts agissants sur la structure lorsque le vent agit sur des panneaux fixes.

4.1 Étude des vitesses de vent

Avant d'analyser en détail les statistiques de vents en Belgique, parcourons ensemble un bref historique des événements météorologiques les plus importants liés aux vents depuis les années 1900. Les analyses et données météorologiques sont fournies par l'IRM ([Institut Royal Météorologique de Belgique, 2025](#)), l'institut de référence en Belgique. Parmi les valeurs records, on compte en 2006 une moyenne annuelle à 3.9 m/s soit 14.04 km/h alors que l'année 2024 a connu le record de la moyenne annuelle la plus basse jamais enregistrée avec 2.7 m/s soit 9.72 km/h. La vitesse de vent la plus élevée jamais observée dans le pays est de 168 km/h, mais une telle vitesse de vent n'a été mesurée qu'une fois depuis 1901. L'IRM fournit également, via sa plateforme "OpenData", des données de mesures effectuées au cours des 30 dernières années sur différentes stations réparties un peu partout dans le pays.

En analysant ces données, la vitesse de vent la plus fréquente mesurée au cours des 20 dernières années tourne aux alentours de 8.09 km/h, comme le montre la figure I.10 :

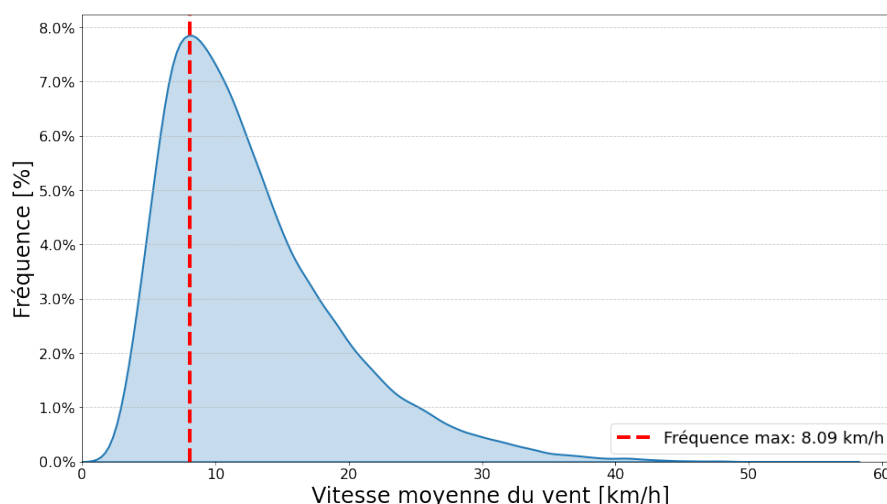


FIGURE I.10 – Fréquence des vitesses de vent en Belgique.

Cependant, cette donnée ne représente pas vraiment les efforts maximums auxquels pourrait être exposée une structure soumise au vent. La base de données fournie par l'IRM indique également les vitesses des rafales mesurées au cours de la même période. Une valeur beaucoup plus intéressante, car elle représente mieux les efforts maximums que pourrait subir la structure de manière quotidienne. À long terme, ce sont possiblement ces derniers qui causeront la ruine de la structure par fatigue. En réalisant la même analyse que précédemment, la vitesse moyenne des rafales au cours des 20 dernières années est de 29.16 km/h (voir figure I.11).

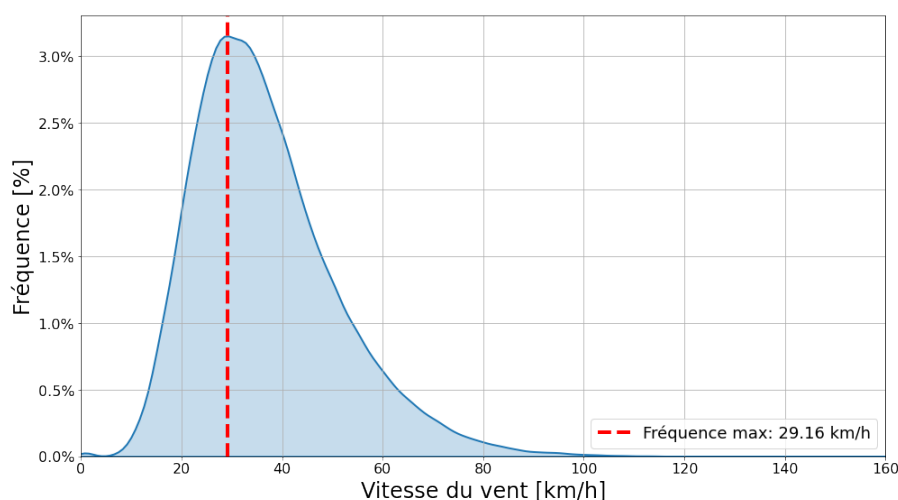


FIGURE I.11 – Fréquence des rafales en Belgique.

Un autre paramètre qui entre en compte dans l'étude du comportement de la structure est l'évolution et la saisonnalité du vent. L'étude de ces paramètres pourrait notamment permettre de prévoir si les différents changements climatiques ayant eu lieu au cours des dernières décennies apportent ou non une évolution dans les efforts. Ces valeurs peuvent se trouver sur le graphique fourni par l'IRM et visible à la figure I.12³.

3. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/normales-climatiques-a-ucclle/vitesse-du-vent>

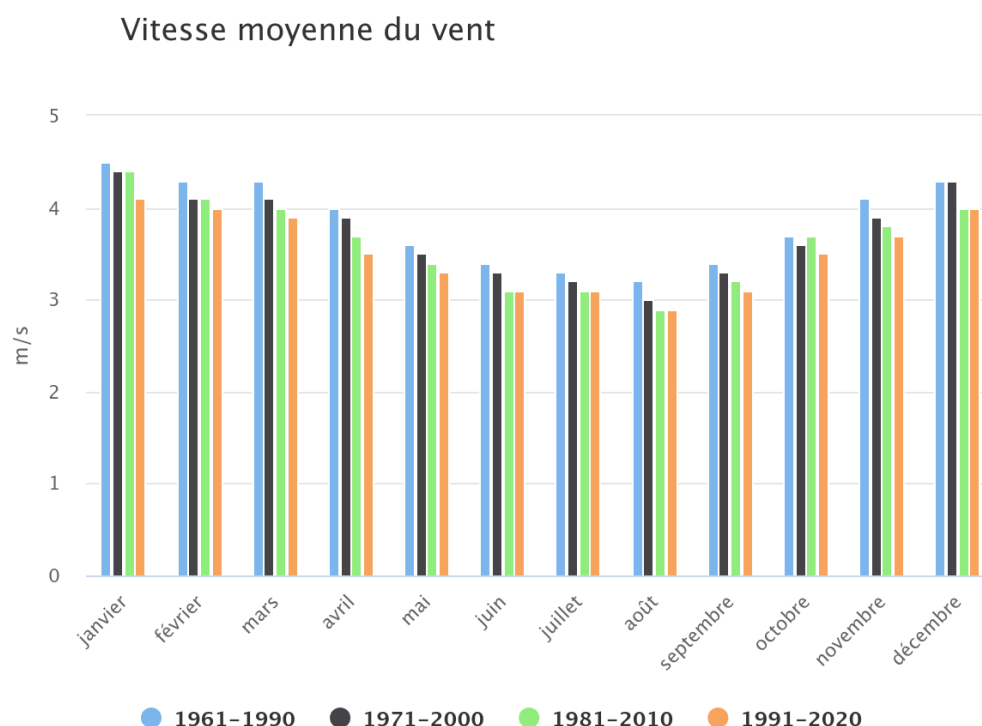


FIGURE I.12 – Vitesse moyenne de vent par mois au cours des 65 dernières années. ©IRM

Bien que la vitesse du vent varie selon les mois et les saisons, cette variation est assez faible. Le vent soufflera plus fort durant l'hiver et sera de manière générale plus calme en été avec une différence de moins de 1 [m/s] en moyenne. Cette variation est trop faible pour justifier l'utilité d'une prise en compte des saisons au cours de l'analyse. Nous pouvons donc considérer que, de manière générale, le vent exercera des efforts sur la structure de manière constante, peu importe la période de l'année. Notons également qu'en Belgique, le vent vient principalement du sud-ouest.

Enfin, pour compléter cette analyse, les périodes de retour peuvent être intéressantes à observer. Plusieurs périodes seront observées, à savoir : 6 mois, 1 an, 2 ans, 5 ans, 10 ans et 20 ans.

Période de retour (années)	Vitesse de rafale (km/h)
0.5	85.57
1	105.25
2	113.57
5	121.49
10	129.23
20	157.62

TABLE I.1 – Vitesses de rafales estimées pour différentes périodes de retour.

On remarque que pour une période de retour de 5 ou 10 ans, les vitesses obtenues sont assez similaires. Au vu du type de structure et du matériau utilisé pour sa réalisation, à savoir le bois, une durée de vie de 20 ans paraît assez pertinente. La structure doit donc être capable de pouvoir résister aux efforts liés à des vitesses proches de 160 km/h. À titre de comparaison, l'annexe belge de l'Eurocode 1-1-4 (NBN, 2005) considère qu'un vent de base de 26 [m/s] doit être pris en compte, ce qui correspond à 93.6 [km/h]. Cependant, cette différence entre la norme et les valeurs de période de retour est justifiée par la présence de multiples coefficients de sécurité utilisés dans l'Eurocode.

Finalement, au vu des vitesses assez conséquentes que pourrait subir la structure au cours des années, un système de panneau oscillant peut s'avérer être pertinent s'il est vérifié que ce système réduit bel et bien les efforts de vents pour des vitesses importantes par rapport à des panneaux rigides. Afin de pouvoir donner une base de comparaison pour la suite du travail, la sous-section 4.2 permet le dimensionnement d'une structure à panneau fixe.

4.2 Calcul d'un panneau fixe

4.2.1 Hypothèses

Au cours de ce dimensionnement, nous devons prendre en compte le système de fixation du panneau. De manière générale, sur les modèles déjà présents sur le marché, le panneau photovoltaïque est fixé aux poutres se situant au-dessus et en dessous de ce dernier. Les efforts seront alors répartis au travers des trois poutres de la structure qui transmettront ensuite les efforts aux colonnes.

À titre d'exemple, la figure I.13 montre un module de barrière agrivoltaïque à panneaux fixes placés horizontalement. C'est ce type de module qui sera utilisé pour les dimensionnements futurs.

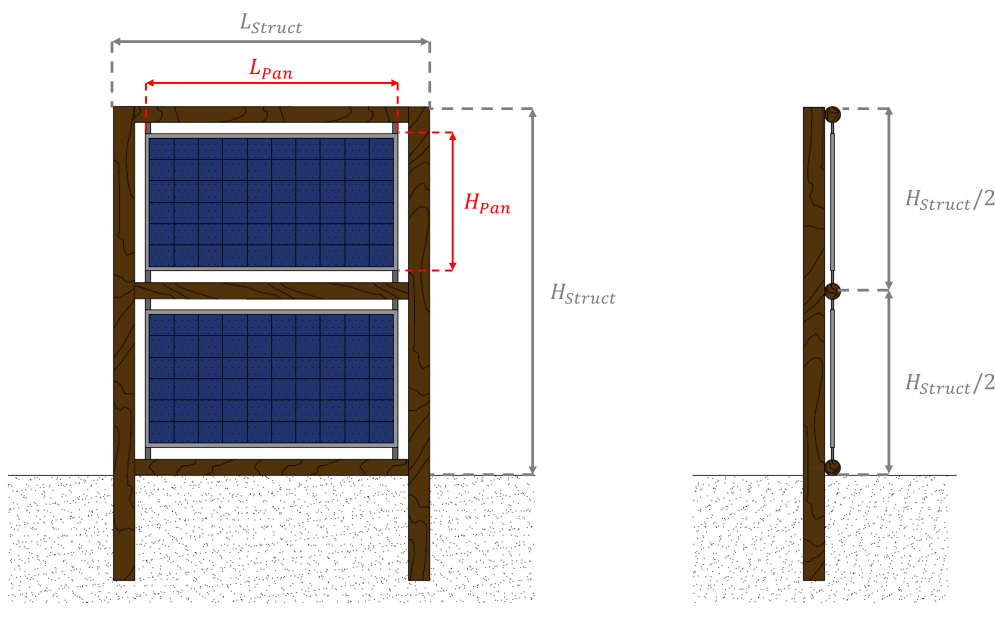


FIGURE I.13 – Représentation d'un module de deux panneaux fixes.

Pour effectuer ce dimensionnement, nous utiliserons les hypothèses suivantes :

- Dimensionnement selon les normes fixées par les Eurocodes
- Les efforts de vents sont déterminés par l'Eurocode-1-1-4 (NBN, 2005)
- Le centre de pression et de gravité se trouve au milieu du panneau
- La constante de gravité : $g = 9.81[m/s^2]$
- Bois : D30, de masse volumique $\rho = 750[kg/m^3]$
- La largeur du panneau est définie comme étant L_{Pan} , la hauteur H_{Pan}
- Structure extérieure, dimensionnement selon les normes de l'EC pour la classe 3

En plus des efforts liés au vent, le poids des panneaux et de la structure seront également pris en compte dans le dimensionnement. Nous utiliserons également les coefficients de sécurité d'usage

dans l'Eurocode.

Dans un premier temps, il convient de définir quels seront les efforts qui transiteront au travers de la structure. L'ensemble de ces efforts se retrouvent sur le schéma de représentation des efforts présent sur la figure I.14. Notons également que les efforts horizontaux appliqués sur les panneaux seront transmis directement aux poutres qui transmettent à leur tour les efforts aux colonnes.

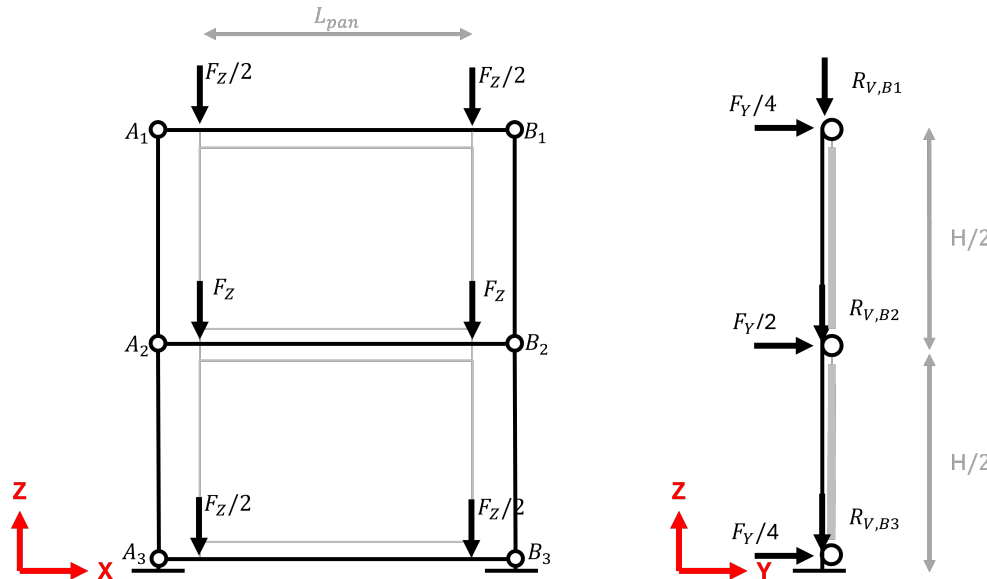


FIGURE I.14 – Représentation de la structure et des charges appliquées.

Maintenant que les charges et leur transmission sont modélisées, nous pouvons les définir. Pour ce faire, commençons par définir les efforts principaux qui agiront sur la structure, à savoir les efforts de vent. Ici, seuls les efforts agissant sur les panneaux seront pris en compte. Les efforts créés par l'effet du vent sur la structure seront quant à eux détaillés au cours de la section 13.

4.2.2 Définition des efforts de vent selon l'Eurocode

Afin de définir les efforts de vents sous forme d'une force, l'Eurocode fournit la formule suivante :

$$F_w = C_s C_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (I.1)$$

Où les paramètres sont :

- $C_s C_d$: Le coefficient structural
- C_f : Le coefficient de force
- $q_p(z_e)$: La pression dynamique de pointe pour une structure de hauteur z_e
- A_{ref} : L'aire de référence, ici la surface du panneau

Coefficient structural

Pour une structure fixe de ce type, le coefficient structural est fixé à $C_s C_d = 1$. Cette valeur est déterminée à l'aide de la liste proposée par l'Eurocode.

Coefficient de force

Le modèle proposé par l'Eurocode se rapprochant le plus du cas étudié ici est celui du panneau de signalisation isolé. Pour ce cas, le coefficient est donné comme étant $C_f = 1.8$.

Pression dynamique de pointe

Ce paramètre est défini par la formule suivante :

$$q_p(z_e) = (1 + 7I_v(z_e)) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2 \quad (\text{I.2})$$

Dans cette équation, nous avons $I_v(z_e) = \frac{k_t}{c_0(z_e) \cdot \ln(\frac{z}{z_0})} = \frac{1}{\ln(\frac{H}{0.05})}$. Ce coefficient correspond à l'intensité de la turbulence du vent. La vitesse moyenne du vent, quant à elle, varie également selon la hauteur. Elle est définie par $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b$ dans laquelle v_b est la vitesse de base définie précédemment, c_r est le coefficient de rugosité du terrain et c_o est le coefficient d'orographie qui est égal à 1.

Le coefficient de rugosité est défini par la formule suivante :

$$c_r = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \text{ avec } k_r = 0.19 \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07} \quad (\text{I.3})$$

Avec z , la hauteur de la structure telle que $z = H_{Struct}$.

Aire de référence

L'aire de référence pour une telle structure est donnée par l'aire du panneau. Nous avons donc $A_{ref} = H_{Pan} \cdot L_{Pan}$.

L'ensemble de ces paramètres permet de définir les efforts de vents. Pour le cas du module que nous utilisons comme référence à travers ce mémoire, nous avons une hauteur $H = 3.5[m]$ avec des panneaux de dimensions $H_{Pan} = 1.3[m]$ et $L_{Pan} = 2.4[m]$. Ces paramètres permettent d'obtenir la résultante de pression sur un panneau qui est définie par équation I.4 :

$$F_{w,Pan} = 1 \cdot 1.8 \cdot 728.89 \cdot 1.3 \cdot 2.4 = 4093.45[N] = 4.093[kN] \quad (\text{I.4})$$

4.2.3 Dimensionnement de la structure

Nous pouvons maintenant définir les efforts F_Y et F_Z :

- $F_Y = F_{w,Pan} = 4.093[kN]$
- $F_Z = P_{Pan} = m_{Pan} \cdot g = 37.8 \cdot 9.81 = 0.371 [kN]$

Puisque nous suivons une approche Eurocode, un coefficient de 1.35 est appliqué aux charges permanentes (le poids des panneaux et de la structure) et un coefficient de 1.5 appliqué aux charges variables, dans notre cas celles dues aux vents.

La flèche de chaque élément est limitée à $L/300$ afin de limiter au maximum les déformations. Ceci a pour but de créer une structure qui paraît visuellement solide et stable, et également permettre de limiter l'usure du matériel. L'ensemble des calculs a été réalisé à l'aide d'une feuille de calcul Excel.

Les efforts maximums subis par le portique ainsi que les dimensions minimums des éléments de ce dernier (les colonnes ainsi que la poutre du milieu qui reprend le plus d'efforts) sont visibles sur le tableau I.2

Élément	Effort max.	Diamètre min.	Aire	Masse
Poutre milieu	$N = 0 \text{ [kN]}$	14 [cm]	153.86 [cm ²]	34.62 [kg]
	$V = 3.04 \text{ [kN]}$			
	$M = 0.92 \text{ [kNm]}$			
Poteau	$N = 2.58 \text{ [kN]}$	29 [cm]	660.19 [cm ²]	173.30 [kg]
	$V = 4.61 \text{ [kN]}$			
	$M = 10.74 \text{ [kNm]}$			

TABLE I.2 – Dimensionnement des éléments pour des panneaux fixes.

Bien que les poutres ne semblent pas surdimensionnées, les poteaux en revanche paraissent beaucoup trop large proportionnellement à l'ensemble de la structure. En effet, le but premier est de concevoir des structures légères, facile à installer et dont le coût de fabrication est le plus réduit possible. Or, au vu de la section minimale des poteaux, l'utilisation de matière ainsi que le poids de ce poteau ne correspondent pas aux objectifs de ce travail.

Qui plus est, un autre objectif de ce type de structure est qu'il soit facile à installer par deux personnes, ce n'est à priori pas le cas étant donné le poids conséquent du poteau. L'ensemble de la structure portante, sous cette forme, pèsera 450.46 [kg] !

Nous pouvons donc conclure assez facilement qu'il y a ici une marge d'amélioration non négligeable. La première étape est de déterminer la source des efforts principaux. Premièrement, nous avons le poids des panneaux, difficile à modifier étant donné que les panneaux font partie intégrante du système. La deuxième et plus importante source d'efforts provient du vent. En effet, au vu des dimensions du panneau, ce sont les efforts de vent qui dimensionnent véritablement la structure. Afin de les limiter, nous pouvons imaginer que laisser les panneaux osciller au vent pourrait être une bonne solution. Comme expliqué plus tôt, l'idée est de laisser le panneau osciller librement afin que ce dernier tende naturellement vers une position d'équilibre, diminuant ainsi les contraintes générées.

Cependant, au vu du coût et de la complexité supplémentaire que peut engendrer un tel système, une étude s'avère plus que nécessaire.

5 Objectifs du mémoire

Les objectifs de ce mémoire ont pour but de résoudre les différentes problématiques soulevées au cours de l'introduction. L'idée est de fournir une étude complète du système de panneaux oscillants, allant de la modélisation théorique jusqu'à l'analyse d'essais expérimentaux ou encore la construction d'un prototype.

Le mémoire se résume par plusieurs objectifs clés :

- Confirmer si l'utilisation de panneaux oscillants apporte réellement un avantage par rapport à des panneaux fixes.
- Rassembler et développer les modèles théoriques présents dans la littérature
- Déterminer théoriquement les efforts agissant sur ce type de structures
- Comparer les différents modèles théoriques
- Déterminer l'importance de la prise en compte du vent sur la structure

- Étude en soufflerie d'un prototype à échelle réduite
- Conception des assemblages d'une barrière agrivoltaïque oscillante en bois brut
- Concevoir et dimensionner une structure capable d'être mise en place par deux personnes
- Analyse et comparaison des données expérimentales avec la théorie
- Étudier la rentabilité financière du projet

Chapitre II

État de l'art

6 État de l'art

L'agrivoltaïsme est apparu pour la première fois en 1982 dans la revue "International Journal of Solar Energy".(Goetzberger and Zastrow, 1982) À l'époque, on ne parle pas encore vraiment d'agrivoltaïsme ni de structures, mais on présente plutôt un concept, une nouvelle manière d'imaginer l'exploitation des terres pour les centrales solaires qui étaient à l'époque plutôt réservées aux zones arides et/ou non cultivables. L'article aborde ce concept par la possibilité qu'offrent ces systèmes à produire de l'ombre pour les cultures. En effet, orienté plein sud, les panneaux permettent de protéger complètement du soleil lorsqu'il rayonne le plus fort tout en permettant une production d'énergie maximale. L'espacement des panneaux a évidemment un impact sur l'ensoleillement des plantations, sujet discuté par plusieurs articles et qui ne fera pas l'objet de ce mémoire.

C'est en 2004 que la première structure est imaginée par un ingénieur Japonnais du nom d'Akira Nagashima (Nagashima, 2005) mais il faudra attendre 2011 pour retrouver la première utilisation du mot agrivoltisme au travers d'un article portant sur une installation expérimentale mise en place à Montpellier visible sur la figure II.1. (Dupraz et al., 2011)



FIGURE II.1 – Installation expérimentale de Montpellier. ©Dupraz

L'article "Agrivoltaic Systems Design and Assessment : A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)" (Toledo and Scognamiglio, 2021) fournit un survol assez complet de l'ensemble de l'historique des systèmes agrivoltaïques, en présentant notamment les différents types de structures existantes. Cette illustration est disponible en annexe A.

Comme détaillé plus tôt, on retrouve plusieurs types de structures agrivoltaïques mais la majeure partie d'entre elles se trouvent être des structures basses inclinées, comme visible à la figure II.2. La raison principale ayant poussé le développement de ces structures en dehors du cadre de l'agrivoltaïsme est la capacité de ces dernières à produire une quantité importante d'électricité. La plupart de ces structures sont métalliques, orientées vers le sud et les panneaux ont une inclinaison idéale. Ainsi, la production d'électricité, et donc la rentabilité, est maximale. De telles structures ne permettent pas de cultiver la terre, mais permettent par contre l'élevage de bétail en utilisant les terres pour le pâturage ou les prairies. Les structures servent alors de refuges ombragés pour les animaux.



FIGURE II.2 – Exemple de structures agrivoltaïques basse à panneaux inclinés. ©Harry Koerber

Si ces structures sont assez bien développées et documentées, ce n'est pas le cas de toutes les structures. Les structures à panneaux verticaux dont partie de ces structures assez peu étudiée. Plusieurs raisons expliquent cela. Elles sont plus rebutantes par le simple fait que les panneaux soient placés verticalement, ce qui paraît contre-productif par rapport aux autres structures. Les premiers articles portant sur les barrières verticales datent seulement de 2021, notamment au travers de l'article "Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems" où le sujet est abordé en détail. (Campana et al., 2021) Les auteurs discutent ce système, plus particulièrement en analysant l'impact de l'ensoleillement et des ombres sur les cultures.

C'est durant cette même année que la société "Next2Sun"¹ a commercialisé ses premiers modèles de barrières photovoltaïques. Destinées aux particuliers, agriculteurs ou encore aux autorités et administration, la société propose un ensemble de modèles de barrière fixes métalliques. C'est une des rares sociétés commercialisant ce genre de structures verticales. En 4 ans, la société a déjà installé pas moins de 10 km de barrière à travers six pays.

1. <https://next2sun.com/>



FIGURE II.3 – Exemple de barrières installées. ©Next2Sun

Une solution low-cost a été proposée en 2023 par l'article "The potential for fencing to be used as low-cost solar photovoltaic racking " ([Masna et al., 2023](#)) qui propose de fixer des panneaux PV directement sur des clôtures existantes en utilisant un système assez rudimentaire de serre-câble.



FIGURE II.4 – Installation low-cost sur barrière existante. ©S. Masna et al.

Cette proposition est intéressante, car elle permet d'envisager une manière peu onéreuse de générer de l'électricité, mais elle n'est pas idéale. Les clôtures sur lesquelles sont installés les panneaux pourraient certes permettre de soutenir le poids des panneaux, mais une fois soumis au vent, les fixations ne sont plus assez solides comme le montre l'article. Un doute peut aussi être émis quant à la solidité du treillis utilisé une fois soumis aux efforts.

Au cours des dernières années, les barrières oscillantes ont fait l'objet de plus en plus d'ouvrages, notamment portant sur des structures portantes en bois. En 2023, des chercheurs canadiens ont réalisé un article portant sur un système "open-source". ([Vandewetering et al., 2023](#)) On y retrouve une structure assez simple dans sa conception et dont la réalisation est assez détaillée. Cependant, l'étude

ne prend pas en compte le transfert d'effort horizontaux entre les panneaux et la structure, ce qui laisse de sérieux doutes quant à sa validité.

Un second article, rédigé plus tard par les mêmes auteurs, se concentre cette fois plutôt sur le système dynamique en lui-même plutôt que sur la structure. (Hayibo and Pearce, 2023) L'article aborde plus précisément le côté énergétique de ce système en proposant une analyse énergétique détaillée. On y retrouve également une modélisation d'un coefficient de frottement expérimental réalisé en soufflerie.

Des entreprises telles que "VeCon" proposent des modèles oscillants, bien qu'aucune barrière n'a vraiment été vendue. Ces structures restent pour l'instant à l'état de concept, le seul modèle installé est un projet pilote installé en Italie par l'entreprise et visible sur la figure II.5.



FIGURE II.5 – Projet pilote de VeCon en Italie. ©VeCon

Enfin, en 2024, Benjamin Dardenne doctorant à l'UCLouvain et auteur du mémoire mentionné dans l'introduction, a réalisé un article portant sur l'analyse et l'optimisation structurale d'une barrière agrivoltaïque oscillante. (Dardenne and Latteur, 2024) Bien que cet article s'applique à toutes les structures, il vise plus précisément les structures en bois brut (figure II.6).



FIGURE II.6 – Prototype réalisé à l'UCLouvain en mai 2024. ©B. Dardenne

Afin d'analyser les structures, il est important de savoir déterminer les efforts de vents qui agissent sur celle-ci. Pour cela, les Eurocodes fournissent une excellente base de calcul. Il s'agit d'une série de documents normatifs portant sur l'ensemble des différents aspects du dimensionnement d'une construction. Dans le cadre de ce mémoire, c'est particulièrement l'Eurocode 1, portant sur les actions s'appliquant sur la structure, qui sera utilisé. Ce dernier fournit plusieurs modèles qui dépendent de l'environnement de la structure, mais aussi de sa configuration et de ses caractéristiques. (NBN, 2005) Cependant, l'Eurocode ayant un but normatif, il propose des modélisations très générales et ne propose donc pas de solutions adéquates pour des structures expérimentales telles que les structures agrivoltaïques oscillantes. Il y a donc un intérêt non négligeable dans l'utilisation et le développement d'autres modèles pour déterminer les efforts de vents.

En complément de l'Eurocode 1, l'excellent cours portant sur les efforts de vents donné par Michel Monhonval dans le cadre du cours LGCIV2012 donné à l'EPL permet de compléter et de mieux comprendre ce dernier. (Monhonval, 2024)

Au vu du système et de son comportement, les ouvrages portant sur l'aérodynamique paraissent plus pertinent. En effet, le comportement du panneau oscillant peut être assimilé à celui d'un profil d'aile ou d'une plaque plane soumise à différents angles et vitesses de vents. L'ouvrage "Fundamentals of Aerodynamics" par John D. Anderson est une véritable référence pour toutes les bases de calculs et de comportements aérodynamiques. (Anderson, 2016)

Afin de compléter ce document, l'article "Investigations of plate-type windborne debris—Part II : Computed trajectories" (Holmes et al., 2006) propose d'autres modèles de modélisation. Cet article détaille notamment l'évolution du centre de pression en fonction de l'angle d'attaque du panneau, mais présente également un modèle d'évolution des coefficients de frottement et de portance. L'évolution du centre de pression en fonction de l'angle et de la vitesse du vent peut également être définie

par un second modèle proposé par l'article "Numerical calculation of the three-dimensional motion of wind-borne debris". ([Richards et al., 2008](#))

Deux autres articles, écrits et coécrits par Tianshu Liu, relatent de différents modèles. Le premier article, "Evolutionary understanding of airfoil lift" relate de plusieurs modèles permettant de déterminer les efforts parmi lesquels on retrouve les modèles de Newton, Rayleigh,... ([Liu, 2021](#)) Au travers de cet article, nous trouvons également des études expérimentales portant sur des profils NACA ainsi que des essais CFD. Le second article, "Explicit Role of Viscosity in Generating Lift" est quant à lui plutôt analytique, offrant une formulation plus mathématique du comportement des plaques et explique de manière détaillée la source des efforts permettant à la plaque de se soulever. ([Liu et al., 2017](#)) L'article présente également des modèles CFD ainsi que des modèles expérimentaux comparés au travers de plusieurs graphiques.

Chapitre III

Étude structurale : Efforts de vent et modélisation

7 Schémas et équilibre des efforts sur un module de barrière à panneaux oscillants

7.1 Hypothèses

Contrairement au dimensionnement du panneau fixe effectué plus tôt, nous devons désormais prendre en compte le fait que le panneau est fixé à la structure en son sommet car le panneau est suspendu par le haut. Ceci aura pour effet de modifier la répartition des efforts au sein de la structure ainsi que le comportement de cette dernière.

Afin de pouvoir comparer les résultats théoriques avec ceux du prototype présenté plus tard, nous analyserons un module composé de deux panneaux disposés de manière verticale. À titre d'exemple, pour des panneaux PV de $2.4[m] \times 1.3[m]$, la structure fera environ $3.50[m]$ de haut pour $3.00[m]$ de large.

Pour effectuer ce dimensionnement, nous utiliserons les hypothèses suivantes :

- Dimensionnement selon les normes fixées par les Eurocode
- La constante de gravité : $g = 9.81[m/s^2]$
- Bois : D30, de masse volumique $\rho = 750[kg/m^3]$
- La largeur du panneau est définie comme étant L_{Pan}
- Structure extérieure, dimensionnement selon les normes de l'EC pour la classe 3

7.2 Schéma statique et efforts transmis

Les panneaux étant fixés à la structure en leur sommet, nous allons ici considérer un système de fixation rotulé tel que décrit en sous-sous-section 15.2.2. Les fixations sont placées de part et d'autre du panneau, justifiant ainsi l'écart entre les forces.

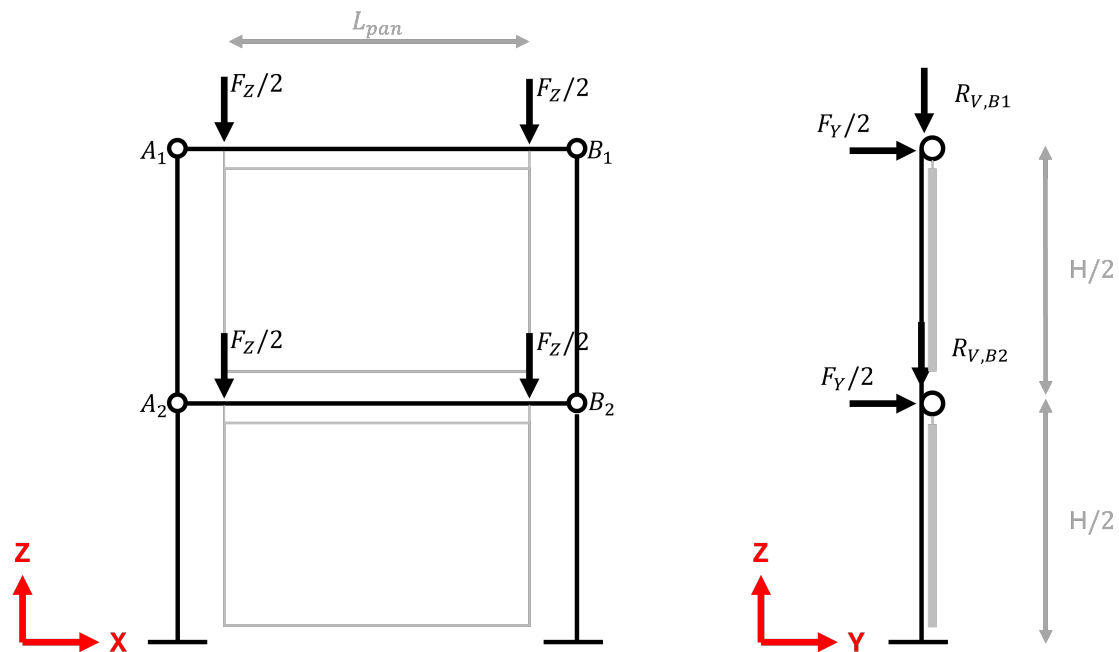


FIGURE III.1 – Schéma statique d'une structure unitaire.

Les forces $R_{V,A}$ illustrées dans la figure III.1 montrent que ce ne sont pas les efforts de vents, mais bien la réaction d'appui de la poutre qui agira verticalement sur la colonne. Ceci permet de prendre en compte non seulement les efforts, mais également le poids propre de la poutre.

Nous pouvons maintenant décomposer les efforts selon chaque élément de la structure, à savoir les poutres qui subissent toutes les deux mêmes efforts ainsi que les colonnes.

Efforts au sein des poutres :

En décomposant les efforts internes selon les sollicitations, nous obtenons :

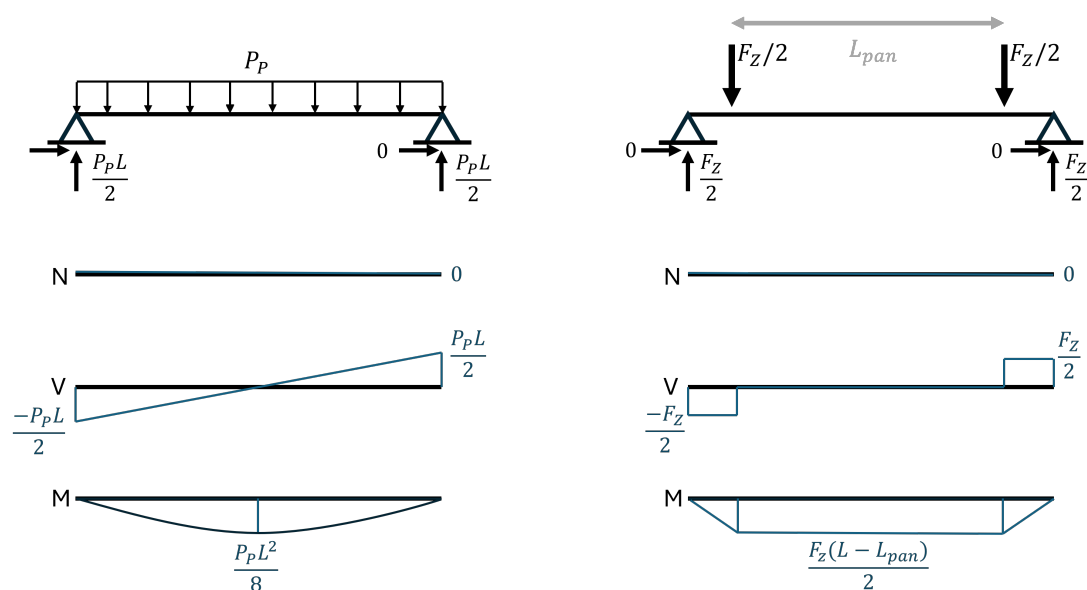


FIGURE III.2 – Efforts internes au sein des poutres.

Nous pouvons donc conclure que les efforts maximum qui s'exercent dans la poutre sont :

- Réaction d'appui vertical : $R_V = \frac{P_P L}{2} + \frac{F_Z}{2}$
- Réaction d'appui horizontal : $R_H = 0$
- Effort normal : $N = 0$
- Effort tranchant : $V = \frac{P_P L}{2} + \frac{F_Z}{2}$
- Moment de flexion : $M = \frac{P_P L^2}{8} + \frac{F_Z (L_{Pan})}{2}$

Efforts au sein des colonnes :

En décomposant les efforts internes selon les sollicitations, nous obtenons :

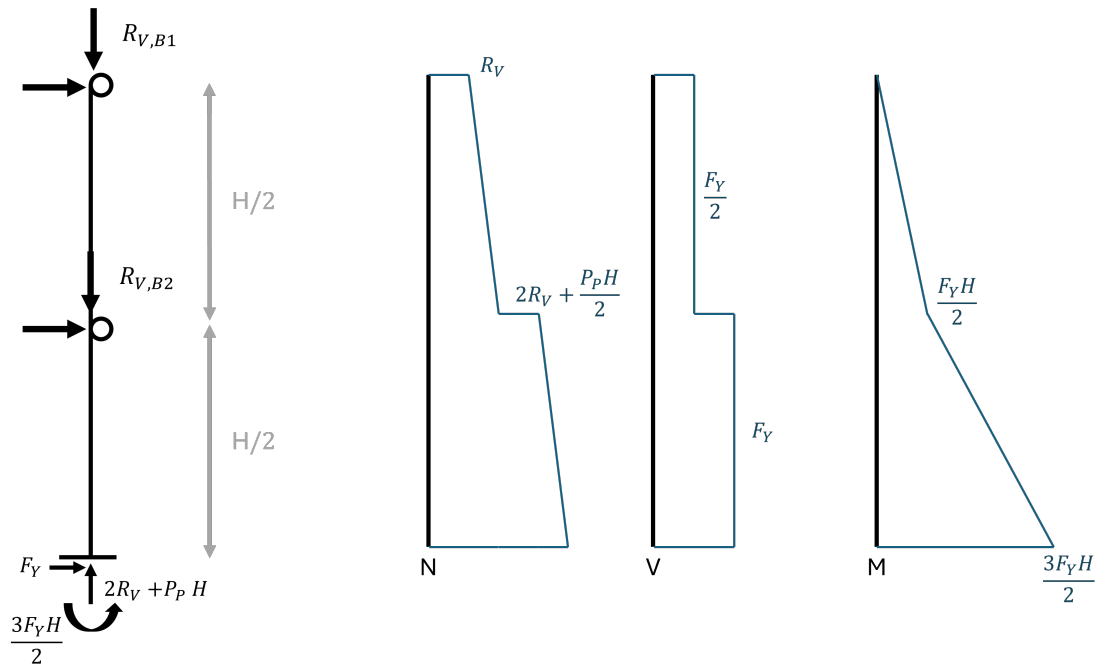


FIGURE III.3 – Efforts internes au sein des colonnes.

Nous pouvons donc conclure que les efforts maximums qui s'exercent dans la colonne correspondent aux efforts au pied de la colonne :

- Effort normal : $N = 2R_V + P_P H$
- Effort tranchant : $V = F_Y$
- Moment de flexion : $M = \frac{3F_Y H}{2}$

7.3 Critères de dimensionnement des éléments bois

Afin de dimensionner notre structure, nous allons utiliser différents critères selon la membrure analysée.

Pour rappel :

$$f_{x,d} = \frac{k_{mod} f_{x,k}}{\gamma_m}$$

Pour la poutre, trois critères sont analysés :

- Effort tranchant : $\sqrt{\sigma_{V,Y}^2 + \sigma_{V,Z}^2} \leq f_{v,d}$

- Flexion biaxiale : $\frac{M_Y}{W_Y} + \frac{M_Z}{W_Z} \leq f_{m,d}$
- Flèche : $\delta_Y + \delta_Z \leq \frac{L}{300}$

Pour la colonne, cinq critères seront analysés, en ce compris les critères propres au flambement :

- Compression pure : $\sigma_{comp} \leq f_{c,0,d}$
- Effort tranchant : $\sqrt{\sigma_{V,Y}^2 + \sigma_{V,Z}^2} \leq f_{v,d}$
- Flexion : $\frac{M_0}{W} \leq f_{m,d}$
- Flèche : $\delta_H + \delta_{H/2} \leq \frac{H}{300}$
- Flambement : $\lambda \leq 250$ et $\sigma_{comp} \leq k_c f_{c,0,d}$

8 Calcul des efforts de vent

Au travers de cette section, nous allons parcourir les différentes manières dont la littérature nous propose d'évaluer les efforts de vents agissant sur une structure ou toute autre surface.

Un premier point important est de rappeler que la littérature prend constamment en compte que le vent agit de manière perpendiculaire à la face sur laquelle il agit, ici la face du panneau. (Anderson, 2016) Ajoutons également que dans la suite de ce chapitre, par facilité pour le lecteur, nous ne considérerons que le cas des barrières agrivoltaiques verticales à panneaux oscillants. Dans un premier temps, les différentes modélisations seront explorées au travers de l'étude d'un panneau simple et adimensionnel.

Avant d'aller plus loin dans la formulation exacte des efforts, il est bon de d'abord définir les différents efforts s'appliquant sur le panneau ainsi que les grandeurs prises en compte. Ceci se trouve sur la figure III.4 :

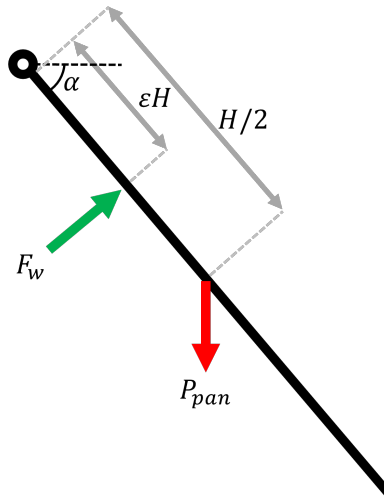


FIGURE III.4 – Représentation des efforts agissants sur le panneau.

Nous pouvons tout d'abord noter que l'angle α est déterminé de manière telle que $\alpha = 0^\circ$ soit considéré pour un panneau à l'horizontale et $\alpha = 90^\circ$ représente un panneau complètement vertical.

Le paramètre ε détermine la position du centre de pression des efforts de vents. Ce dernier va légèrement varier en fonction de l'angle du panneau. Le raisonnement ainsi que les valeurs de ce coefficient sont développés au cours de la section 9. Le poids surfacique du panneau quant à lui est d'environ $120 \left[\frac{N}{m^2} \right]$ et s'applique au centre de gravité de ce dernier.

Pour ce qui est de F_w , nous allons dans un premier temps définir les efforts de vents au travers de la formule suivante présente au travers de la littérature (Liu, 2021) :

$$F_w = C_N \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{pan} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- F_w : L'effort de vent exercé sur la surface $[N]$
- C_N : Le coefficient normal de pression $[-]$
- ρ : La masse volumique du fluide (ici l'air) $[\frac{kg \cdot m}{s^2}]$
- V : La vitesse du vent $[\frac{m}{s}]$
- A_{pan} : L'aire de la surface (ici le panneau) $[m^2]$

Parmi ces différents paramètres, la masse volumique du vent peut être considérée comme étant $1.25 [\frac{kg \cdot m}{s^2}]$, la vitesse du vent et l'aire sur laquelle le vent s'applique sont généralement supposées connues. Cependant, le coefficient C_N est quant à lui à déterminer. Il s'agit d'un coefficient dont la formulation varie selon les méthodes employées et qui contribue à augmenter ou diminuer la pression agissant sur la surface.

Au travers de la littérature, ce coefficient varie en fonction du type de surface, de la vitesse, mais aussi de l'angle du panneau. Cependant, puisque l'angle du panneau varie uniquement en fonction des efforts et donc de la vitesse du vent, nous pouvons aisément déterminer que α dépend de la vitesse du vent. Nous pouvons donc reformuler l'ensemble de l'équation III.1 :

$$F_w(\alpha, V) = C_N(\alpha(V)) \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{pan} \quad (\text{III.2})$$

Cette formulation permet de visualiser assez vite l'importance de deux points. Premièrement, la relation $\alpha(V)$ est d'une importance clé, car elle détermine l'ensemble du comportement de la structure. Deuxièmement, la formulation du paramètre C_N . En effet, les efforts de vents dépendent de ces paramètres qui dépendent eux-mêmes de la vitesse ainsi que de l'angle du panneau, or l'angle dépend des efforts et ainsi de suite.

Nous avons donc ici une relation implicite qui est plus qu'importante à résoudre. Cette relation peut être résolue à l'aide d'un algorithme programmable en Python ou sur Excel qui permet de déterminer si la structure est à l'équilibre ou non. Pour ce faire, déterminons d'abord l'équilibre en question. Pour cela, reprenons la figure III.4 qui montre les forces en jeu. Pour ce cas, l'équilibre s'écrit comme tel :

- Dans le cas d'un effort F_w perpendiculaire :

$$\sum M_O = F_w \cdot \varepsilon L - m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \frac{L}{2} \quad (\text{III.3})$$

- Dans le cas où on décompose l'effort F_w selon F_d et F_l :

$$\sum M_O = F_{w,d} \cdot \varepsilon L \cdot \sin(\alpha) + F_{w,l} \cdot \varepsilon L \cdot \cos(\alpha) - m \cdot g \cdot \frac{L}{2} \cdot \cos(\alpha) \quad (\text{III.4})$$

Maintenant que l'équilibre est défini, nous pouvons détailler le comportement de l'algorithme qui se comporte comme suit :

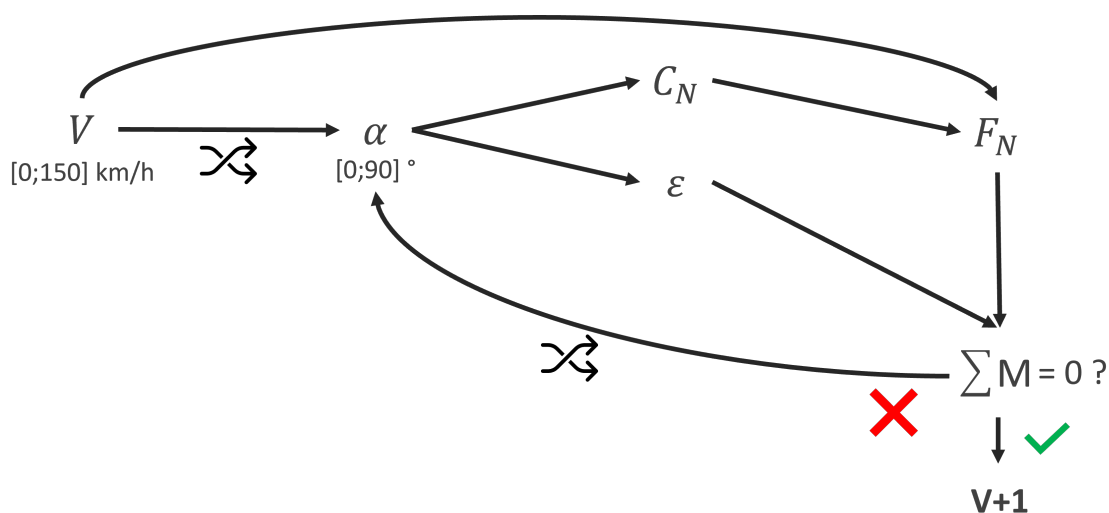


FIGURE III.5 – Représentation du fonctionnement de l'algorithme.

Concrètement, pour chaque vitesse de vent, définies à l'avance, nous allons déterminer l'angle α . Pour ce faire, le code va évaluer l'équilibre des moments avec différentes valeurs possibles de α jusqu'à ce que le moment résultant soit nul. Une fois cette valeur obtenue, la même boucle se répète avec la vitesse suivante, jusqu'à avoir parcouru l'ensemble de la liste.

Ceci permet de déterminer la relation $\alpha(V)$ qui permettra ensuite de déterminer les différents efforts en fonction de la vitesse du vent.

La section suivante se concentre sur la manière dont le coefficient C_N est exprimé au travers de la littérature.

Le coefficient C_N peut également être décomposé en deux coefficients, le coefficient de portance C_L et le coefficient de trainée C_D . Ces deux coefficients dépendent du coefficient C_N et de l'angle, on peut décomposer cette relation selon l'équation III.5 :

$$\begin{aligned} C_D &= C_N \cdot \sin(\alpha) \\ C_L &= C_N \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

9 Modélisation du centre de pression

Le centre de pression est défini comme étant le point d'application des résultantes des pressions de vents. Le centre de pression est essentiel dans l'équilibre des efforts agissant sur le panneau. Elle est généralement définie dans la littérature par un coefficient ε qui, selon l'axe, est multiplié par la dimension correspondante de l'élément.

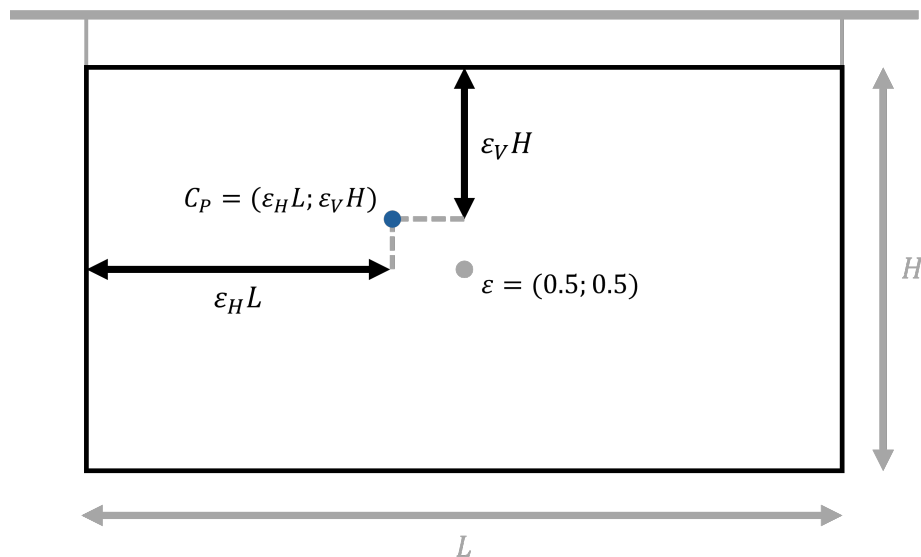


FIGURE III.6 – Représentation du centre de pression et des paramètres.

Au travers de la littérature, le centre de pression peut être défini de plusieurs manières. Notons dans un premier temps, à titre d'exemple, que pour le cas d'un panneau vertical soumis au vent, l'Eurocode considère une valeur de $\varepsilon = 0.5$ pour les deux axes principaux (horizontal et vertical). Cependant, cette valeur n'est pas très représentative pour les panneaux oscillants étant donné qu'il a été défini pour un panneau fixé à la verticale. Il faut donc se référer à des ouvrages portant sur l'aérodynamique.

Ces derniers proposent des modèles plus précis prenant en compte l'angle du panneau appelé angle d'attaque en mécanique des fluides. L'angle d'attaque se définit comme étant l'angle d'une plaque mince (airfoil) par rapport à la direction de l'écoulement du fluide. Parmi les différents ouvrages portant sur l'analyse de plaques soumises à un écoulement, deux articles proposant chacun une modélisation du centre de pression sont régulièrement cités :

- "Investigations of plate-type windborne debris—Part II : Computed trajectories" ([Holmes et al., 2006](#))
- "Numerical Calculation of the 3-Dimensional Motion of Wind-borne Debris" ([Richards et al., 2008](#))

9.1 Modèle de Holmes

L'article "Investigations of plate-type windborne debris—Part II : Computed trajectories" est particulièrement cité et utilisé dans la littérature. ([Holmes et al., 2006](#))

En considérant une plaque fine, ou un panneau PV, oscillant autour de l'axe horizontal, le modèle présenté dans l'article place le centre de pression au milieu de la dimension horizontale de la plaque. Nous avons donc $\varepsilon_H = 0.5$.

Sur l'axe vertical, la position du centre de pression s'exprimera sous la forme d'une équation dépendant de l'angle du panneau par rapport à l'horizontal. Ce modèle est basé sur un modèle théorique accompagné d'essais expérimentaux qui ont permis d'ajuster les résultats du modèle théorique.

La position du centre de pression peut donc être exprimée tel qu'un rapport $\varepsilon = \frac{C_p}{H}$ représenté sur l'équation III.6 et la figure III.7 :

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.2 + 0.22\left(\frac{\alpha}{38}\right) & \text{si } 0^\circ \leq \alpha \leq 38^\circ \\ 0.42 \cdot \cos[2(\alpha - 38)] & \text{si } 38^\circ < \alpha < 82.5^\circ \\ 0.5 & \text{si } 82.5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

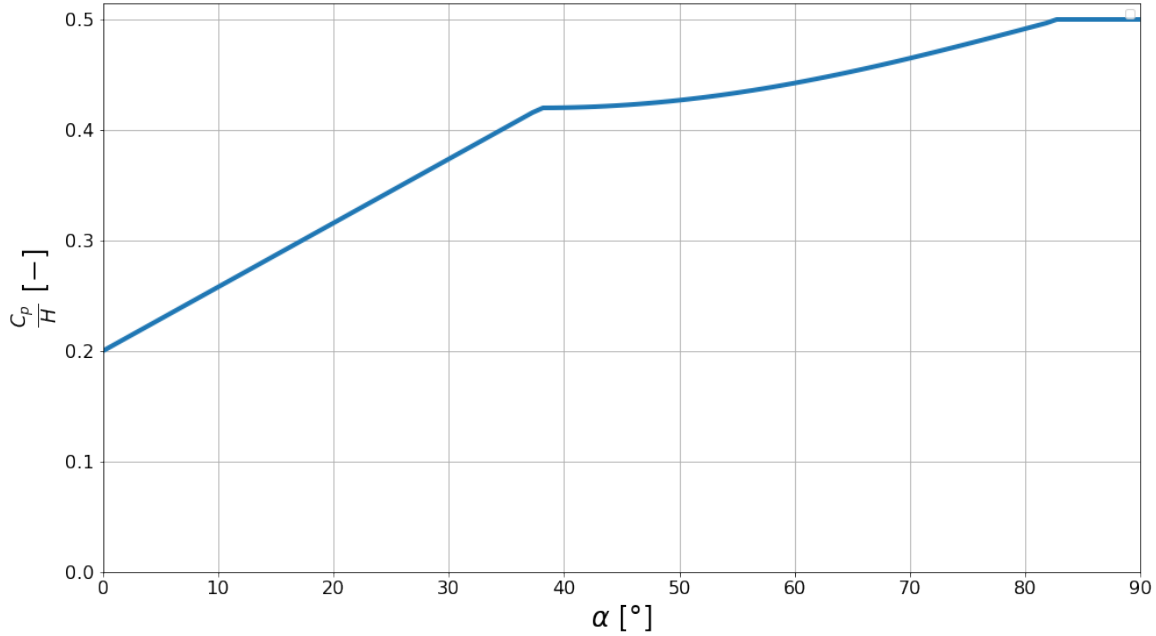


FIGURE III.7 – Évolution du centre de pression selon l'angle d'attaque du panneau.

9.2 Modèle de Richards

Dans l'article "Numerical Calculation of the 3-Dimensional Motion of Wind-borne Debris", le modèle proposé est basé sur des essais en soufflerie dans le tunnel de l'University of Auckland. (Richards et al., 2008) Contrairement au modèle précédent, ce modèle prend en compte deux variations du centre de pression, l'une sur l'axe horizontal, l'autre sur l'axe vertical. Ces évolutions sont décrites par les équations suivantes avec ε_H pour l'axe horizontal et ε_V pour l'axe vertical :

$$\begin{aligned} \varepsilon_H &= \frac{c}{4} \cdot \frac{\frac{\pi}{2} - |\alpha|}{\frac{\pi}{2}} \cdot \sin(\xi) \\ \varepsilon_V &= \frac{c}{4} \cdot \frac{\frac{\pi}{2} - |\alpha|}{\frac{\pi}{2}} \cdot \cos(\xi) \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

- $\xi = \arctan\left(\frac{l_Z \tan(\gamma)}{l_Y}\right)$
- Dimensions du panneau : $l_Z = L_{Pan}$ et $l_Y = H_{Pan}$
- L'angle d'inclinaison autour du centre de gravité (tilt) : $\gamma = 0$

Ces deux équations sont représentées sur la figure III.8 :

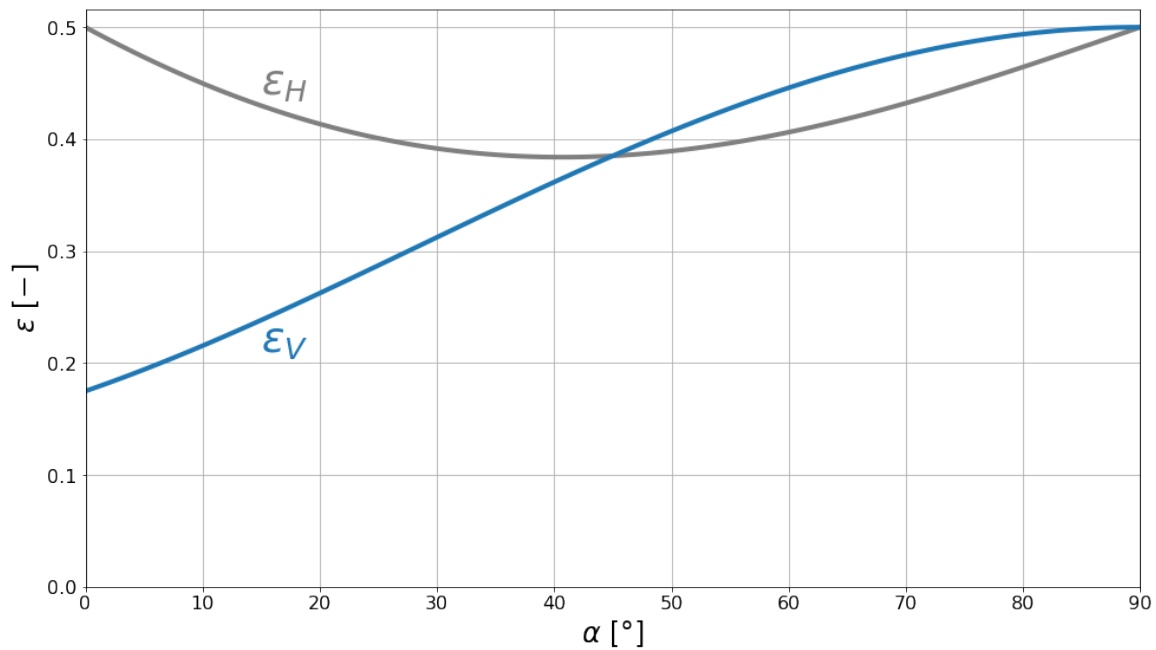


FIGURE III.8 – Évolution du centre de pression selon l'angle d'attaque du panneau pour le modèle de Richards.

9.3 Choix du modèle

Maintenant que ces deux modèles sont présentés, on peut se demander quel est le plus pertinent d'entre eux pour le présent travail. Après comparaison des deux modèles, les résultats obtenus sont assez similaires. La figure III.9 montre bien cette proximité des deux modèles pour le cas d'un panneau photovoltaïque.

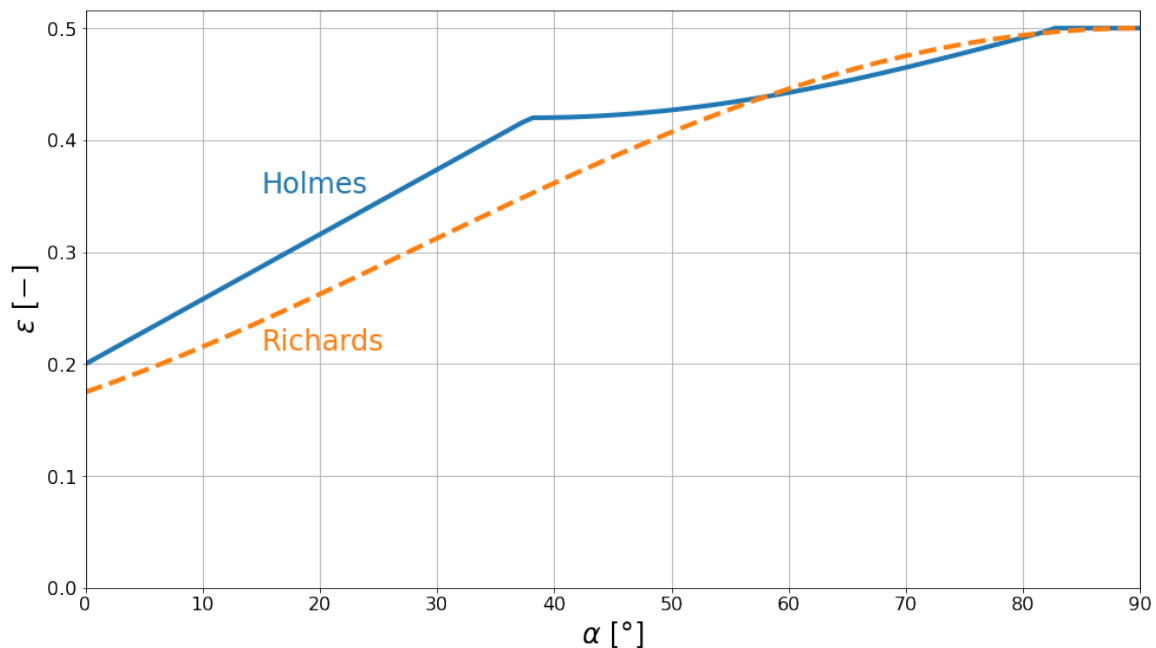


FIGURE III.9 – Comparaison du modèle de Holmes et de Richards sur l'axe vertical.

Le déplacement du centre de pression sur l'axe horizontal ne sera quant à lui pas pris en compte dans notre analyse. L'effet de ce déplacement sur les efforts transmis à la structure est relativement limité

et n'impactera pas directement le dimensionnement. Il n'est dès lors pas intéressant de le prendre en compte. In fine, c'est le modèle de Holmes qui sera retenu pour sa polyvalence et sa simplicité d'utilisation. En effet, ce dernier est indépendant des dimensions de la plaque sur laquelle le vent agit, il propose également un modèle polyvalent qui est compatible avec tous types de panneaux photovoltaïques.

10 Calcul du coefficient C_N

La modélisation du coefficient C_N est essentielle pour pouvoir déterminer les efforts liés au vent. Afin d'exprimer celui-ci, plusieurs modèles existent au travers de la littérature. Comme toujours, l'ouvrage de référence est l'Eurocode pour lequel deux modèles peuvent correspondre au cas étudié au travers de ce mémoire. Cependant, ces modèles étant relativement basiques, l'étude d'autres modèles notamment issus du monde de l'aérodynamique paraissent plus pertinent.

L'étude des plaques fines telles qu'étudiées ici font l'objet de plusieurs ouvrages présentant aussi bien des modèles théoriques que des modèles basés sur des essais expérimentaux. Ce chapitre se place donc comme une synthèse de ces différents modèles permettant de déterminer le coefficient.

10.1 Modélisation selon l'Eurocode

Avant de pouvoir utiliser en détail les modèles proposés par l'Eurocode, il faut d'abord définir la formule proposée par l'Eurocode qui diffère de celle proposée dans la littérature générale :

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

- $c_s c_d$: Le coefficient structural.
- c_f : Le coefficient de force.
- $q_p(z_e)$: La pression de pointe à la hauteur de référence z_e .
- A_{ref} : L'aire de référence de l'élément.

Concernant le coefficient structural, l'Eurocode nous indique que pour une hauteur inférieure à 15m, le coefficient peut être pris comme $c_s c_d = 1$. Le coefficient de force c_f est quant à lui défini au cas par cas, c'est donc ce dernier que nous analyserons par après.

La pression de pointe q_p est définie comme telle :

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (\text{III.9})$$

Pour laquelle on a :

$$I_v(z) = \frac{k_l}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \quad (\text{III.10})$$

Dans laquelle on a :

- $k_l = 1$: Le coefficient de turbulence
- $c_o = 1$: Le coefficient orographique
- $z_0 = 0.05$ et $z_{min} = 2$: Paramètres pour un terrain de type II

Au final, en prenant en compte la hauteur maximale de la structure, à savoir 3.5 [m] pour un module de deux panneaux, on obtient $I_v(z) = 0.235$.

Ensuite, v_m , la vitesse moyenne du vent, est définie comme :

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (\text{III.11})$$

Avec :

- $c_r = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$: Le coefficient de rugosité
- $k_r = 0.19$: Le facteur de terrain pour $z = 3.5[m]$
- v_b : La vitesse de base du vent, qui ici sera notre variable V

Au final, nous obtenons que $v_m(z)$ peut s'écrire de la manière suivant :

$$v_m(z) = 0.807 \cdot V \quad (\text{III.12})$$

Nous allons donc pouvoir déterminer q_p comme étant une fonction de la vitesse du vent. Cependant, pour retrouver la forme initiale présentée précédemment avec l'équation III.8, nous allons réécrire l'équation de l'Eurocode sous sa forme complète :

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (0.807 \cdot V)^2 \cdot A_{ref} \quad (\text{III.13})$$

Et nous pouvons ensuite définir le terme C_N comme étant :

$$C_N = c_s c_d \cdot c_f \cdot [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot 0.807 = 1.067 \cdot c_f \quad (\text{III.14})$$

Au travers de la suite de cette section, nous allons définir C_N comme étant une fonction de c_f .

10.1.1 Modèle du drapeau fixe

Ce premier modèle proposé par l'Eurocode est celui qui, par sa définition, se rapproche le plus du cas étudié. Cependant, ce modèle est aussi l'un des moins précis de l'EC, car il ne prend pas en compte l'inclinaison de la surface, ici l'angle d'attaque du panneau. Bien qu'il ne corresponde pas vraiment au fonctionnement de la structure, cette modélisation n'en reste pas moins une bonne base qui fournira une borne supérieure pour la suite de notre étude.

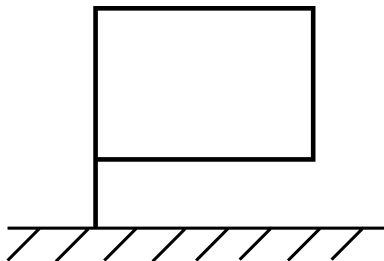
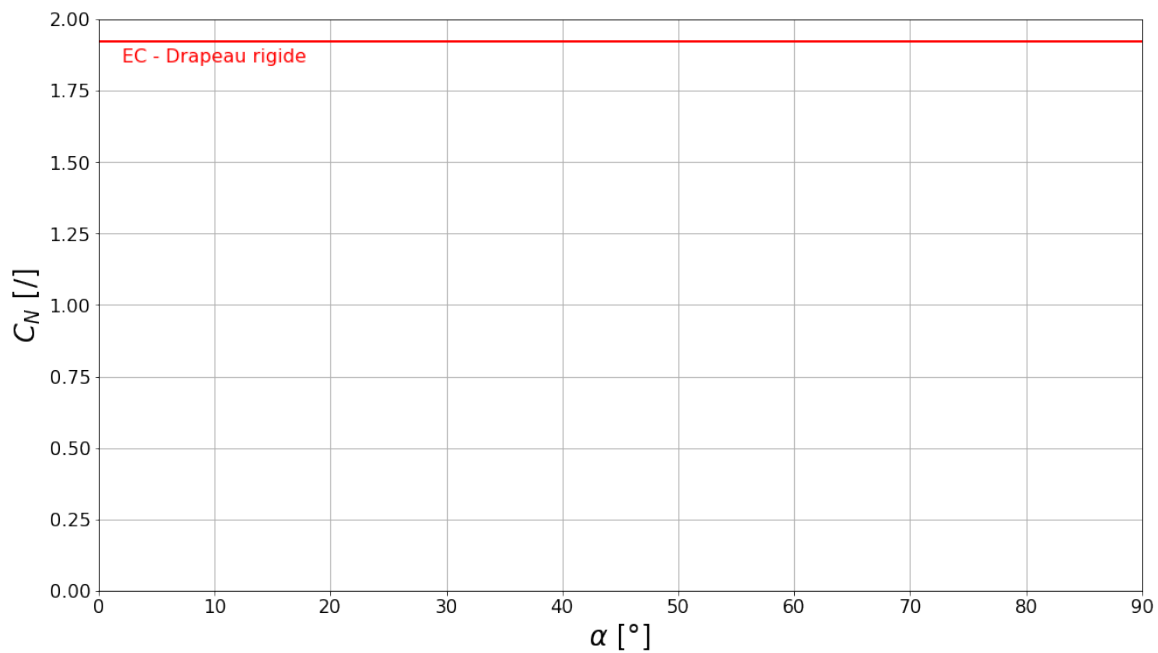


FIGURE III.10 – Illustration du modèle drapeau fixe.

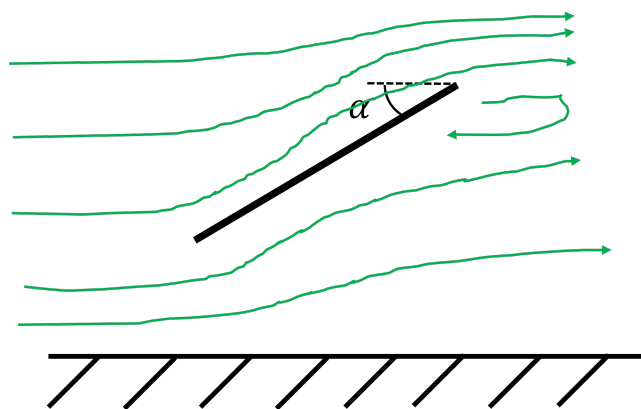
Selon l'Eurocode, pour un drapeau fixe de taille quelconque, le coefficient C_f est fixé à 1.8 peu importe l'angle d'attaque de ce dernier. Ceci donne donc au vu de l'équation III.14 une valeur de $C_N = 1.921$

FIGURE III.11 – Évolution de C_N dans le cas du drapeau fixe.

Cette valeur de C_N constitue une première base à la suite de l'analyse. Cependant, pour obtenir un modèle plus précis, ce coefficient devrait évoluer en fonction de l'angle d'attaque plutôt que d'être représenté par une simple ligne droite. Nous le verrons plus tard, cette valeur correspond en réalité à une surestimation, pouvant servir de borne supérieure lors de l'analyse.

10.1.2 Modèle des toitures isolées

Dans le cas de ce second modèle, nous allons considérer une toiture isolée d'un seul versant. Plus précisément, cette toiture est considérée comme non obstruée ($\varphi = 0$) selon l'Eurocode car rien n'est disposé en dessous. Ce modèle est représenté sur la figure figure III.12.

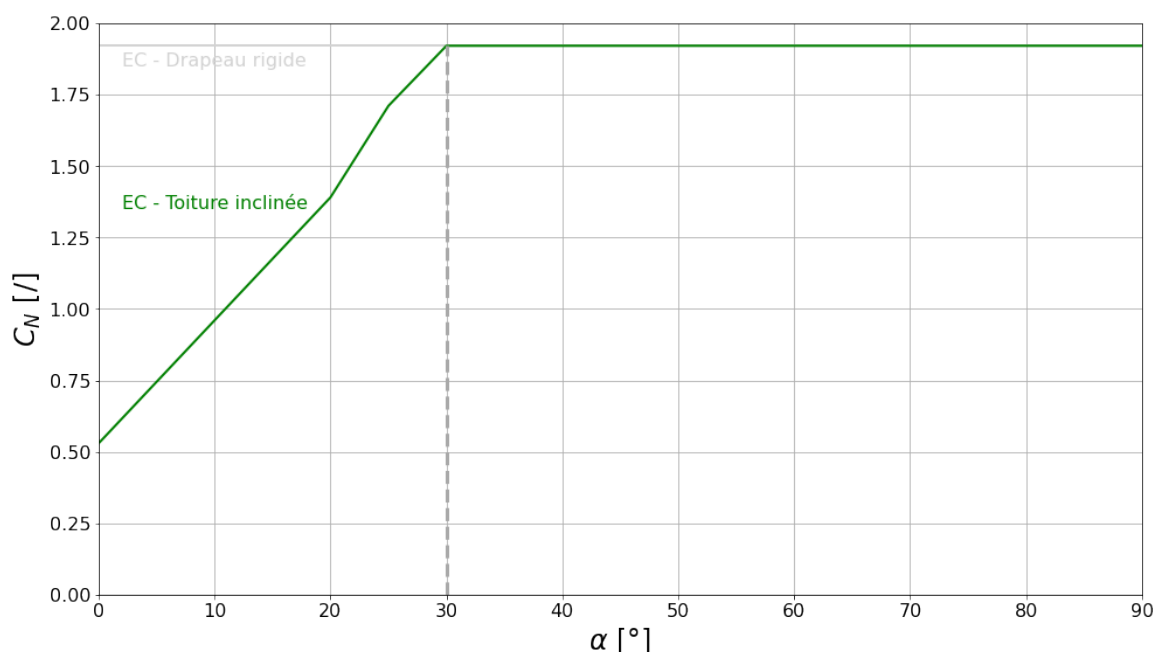
FIGURE III.12 – Toiture isolée vide ($\varphi = 0$).

À nouveau, nous appliquerons directement le coefficient de 1.067 au coefficient c_f afin d'en déduire C_N . Pour ce cas, l'Eurocode recommande l'utilisation des valeurs suivantes :

Angle d'attaque [°]	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	90°
c_f [-]	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.6	1.8	1.8
C_N [-]	0.53	0.75	0.96	1.17	1.39	1.71	1.92	1.92

TABLE III.1 – Évolution du coefficient C_N en fonction de l'angle d'attaque du panneau.

Afin d'obtenir une courbe qui correspond au mieux à la réalité, la courbe d'évolution du coefficient a été interpolée. Cette évolution est représentée sur le graphique en figure III.13.

FIGURE III.13 – Evolution de C_N dans le cas de la toiture inclinée.

Nous pouvons constater une évolution assez constante de 0° à 30° , cependant, à partir de 30° , le coefficient est constant et fixé à 1.92 et n'évolue plus. Ce modèle est plus précis que le précédent, mais il n'est pas encore parfait car il ne considère pas de valeurs spécifiques pour des angles supérieurs à 30° . Pour cela, nous allons étudier d'autres modèles de la littérature, basés sur des raisonnements analytiques ou expérimentaux.

10.2 Modèles analytiques

Un modèle analytique est défini comme étant une représentation mathématique d'un problème ou d'un système. Cette représentation est basée sur des équations dérivées des principes fondamentaux tels que les lois de la mécanique ou de la thermodynamique.

Pour ces différents modèles, l'équation permettant de définir les efforts est sensiblement différente de celle évoquée plus tôt pour le cas des Eurocodes. L'équation III.15 montre cette formulation :

$$F_w(V) = C_N(\alpha(V)) \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A_{pan} \quad (\text{III.15})$$

Cette équation est d'application pour les modèles analytiques et empiriques qui seront présentés au cours de la suite de cette section.

Dans un premier temps, nous utiliserons des modèles exposés dans l'article "Evolutionary understanding of airfoil lift". (Liu, 2021) Cet article assez complet expose trois modèles variant tous en fonction de l'angle d'attaque de la surface sur laquelle le vent s'exerce.

10.2.1 Modèle de Newton

La loi du sinus carré de Newton est une application directe de la mécanique des fluides newtoniens. Dans cette loi, on considère l'impact des particules qui agissent de manière normale à la surface sur laquelle elles agissent (dans ce cas la panneau). Cette situation est représentée sur la figure III.14 :

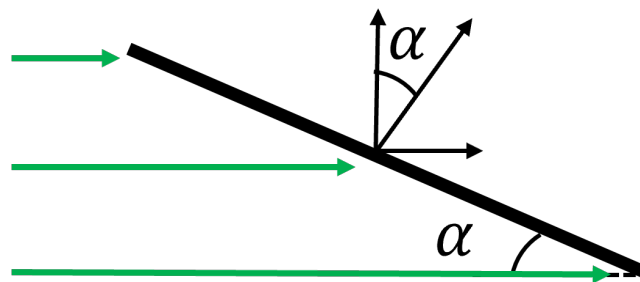


FIGURE III.14 – Représentation des efforts exercés sur une plaque rigide selon le modèle de Newton.

Dans ce cas, utilisé dans l'équation III.1, le coefficient C_N peut s'écrire selon la forme suivante :

$$C_N = \sin^2(\alpha) \quad (\text{III.16})$$

À nouveau, l'évolution peut être visible sur la figure figure III.15.

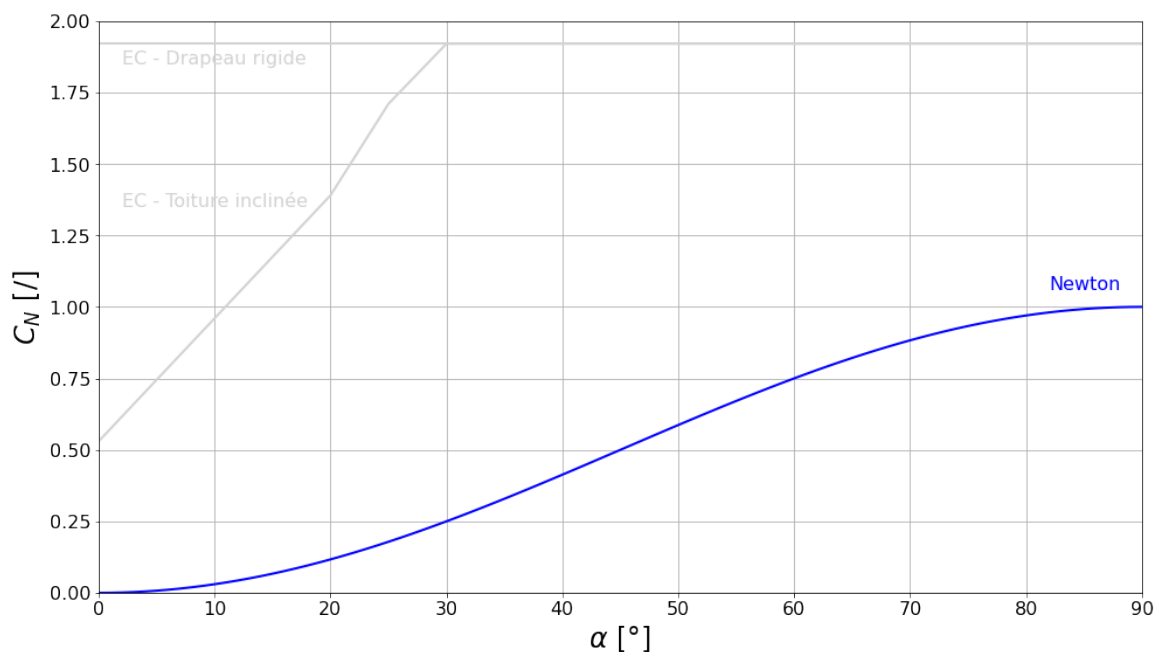


FIGURE III.15 – Évolution de C_N pour le modèle de Newton.

Nous constatons qu'à l'inverse des modèles suggérés par l'Eurocode, le coefficient vaut zéro lorsque le panneau est parfaitement horizontal. L'évolution paraît plus naturelle que les coefficients de l'Eurocode.

10.2.2 Modèle de Rayleigh

Le modèle de Rayleigh quant à lui représente une transformation de Kirchoff sur un profil de plaque plane. Le modèle considère comme le montre la figure III.16 un écoulement avec deux lignes discontinues de part et d'autre de la plaque.

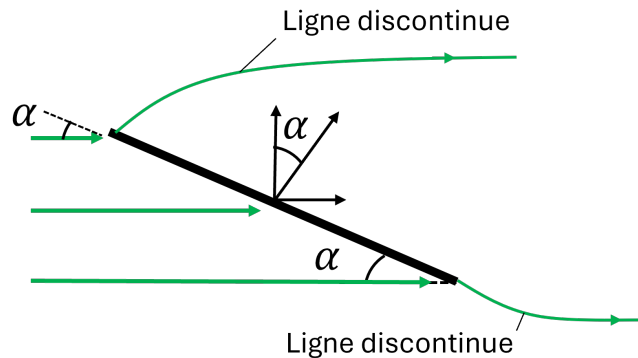


FIGURE III.16 – Représentation du passage du fluide sur la plaque selon le modèle de Rayleigh.

Ce coefficient peut s'écrire selon la forme suivante :

$$C_N = \frac{\pi \sin(\alpha)}{4 + \pi \sin(\alpha)} \quad (\text{III.17})$$

L'évolution de ce coefficient peut être visualisée sur la figure III.17

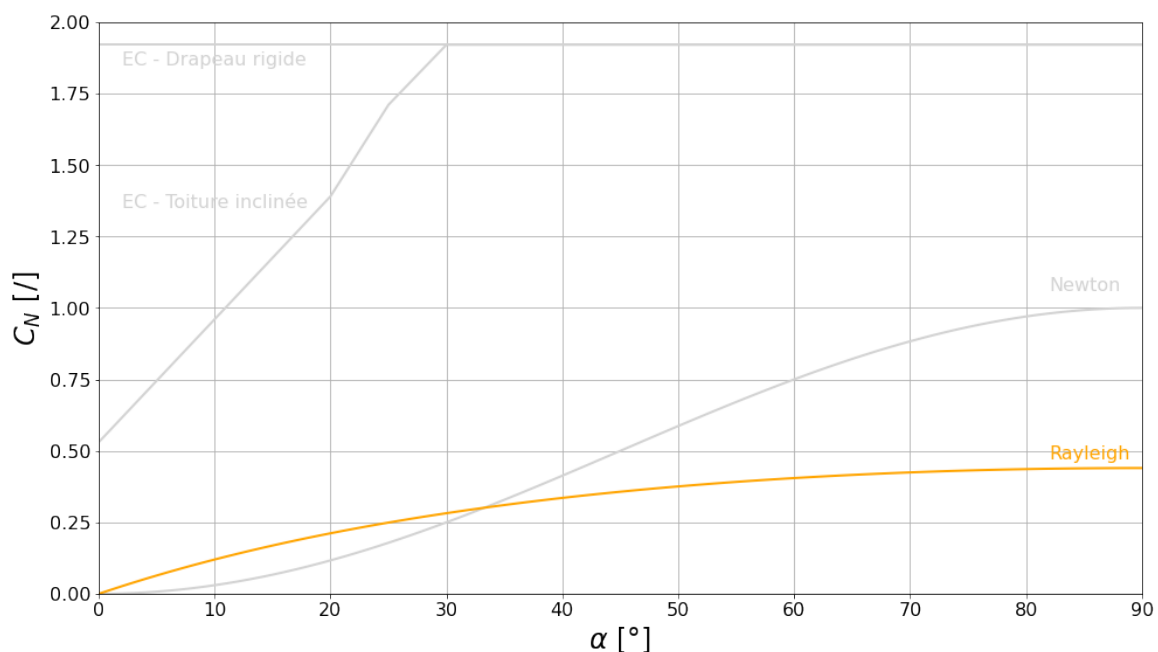


FIGURE III.17 – Evolution de C_N pour le modèle de Rayleigh.

10.2.3 Portance générée par la viscosité de l'air

Ce modèle ne définit pas directement le paramètre C_N comme les précédents, mais il définit les paramètres de frottement et de portance C_D et C_L comme défini dans l'équation III.5. (Liu et al., 2017) Ceci permet donc les mêmes calculs que précédemment, mais en décomposant cette fois les efforts.

Le modèle définit ces coefficients comme tel :

$$\begin{aligned} C_D &= 2\pi \cdot \alpha \cdot F(\alpha) \cdot \sin(\alpha) + C_{d,0} \\ C_L &= 2\pi \cdot \alpha \cdot F(\alpha) \cdot \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (\text{III.18})$$

Cependant, contrairement aux autres modèles, ce modèle est particulièrement adapté à des petites valeurs de α . L'article ne fait référence qu'à des angles d'un maximum de 10° . Ceci est donc à prendre en compte dans l'interprétation des résultats qui seront adaptés en conséquence.

Avec $C_{d,0}$ le frottement initial et où $F(\alpha)$ est un facteur non linéaire défini comme tel :

$$F(\alpha) = \frac{R_q}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi}\right) \frac{4 + \Delta C_{p,TE} R_q^{-1} (\pi - 3\alpha)}{(\pi - \alpha)^2 - 4\alpha^2} \quad (\text{III.19})$$

Avec comme paramètres :

- $R_q = \left(\frac{U_{ref}}{U_\infty}\right)^2 \cdot Re_c^{2m_1}$: Le rapport entre les pressions dynamiques au bord de fuite et l'écoulement libre
- $Re_c = \frac{U_\infty c}{\nu}$: Le nombre de Reeynolds
- c : La longueur caractéristique
- U_∞ est la vitesse du fluide à une distance infinie de la plaque (ici V, la vitesse du vent)
- $U_{ref} = a_1 \cdot \left(\frac{\nu}{U_\infty}\right)^{m_1}$
- $m_1 = \frac{-\alpha}{\pi - \alpha}$

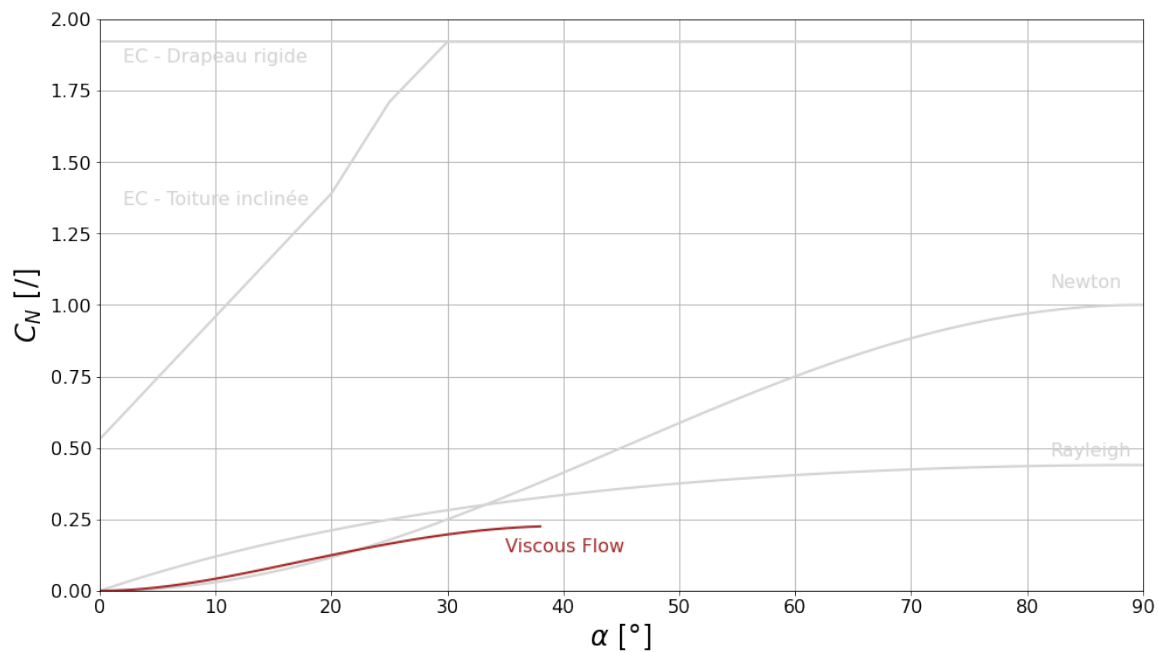
Le paramètre $\Delta C_{p,TE}$, quant à lui, dépend de l'angle d'attaque α et est basé sur des mesures expérimentales telles que $\Delta C_{p,TE} = a_1 + a_2 \cdot \alpha + a_3 \cdot \alpha^2$ avec :

- $a_1 = -0.002599$
- $a_2 = 0.06412$
- $a_3 = -0.000963$

Enfin, nous partirons des hypothèses suivantes :

- $Re_c = 200$
- $\frac{U_{ref}}{U_\infty} = \frac{\pi}{\sqrt{2}}$

Tout ceci permet donc de déterminer les coefficients C_D et C_L , représentés sous la forme du coefficient C_N sur la courbe nommée "Viscous flow" présente sur la figure III.18 :

FIGURE III.18 – Évolution de C_N pour le modèle "Viscous flow".

10.3 Modèles empiriques

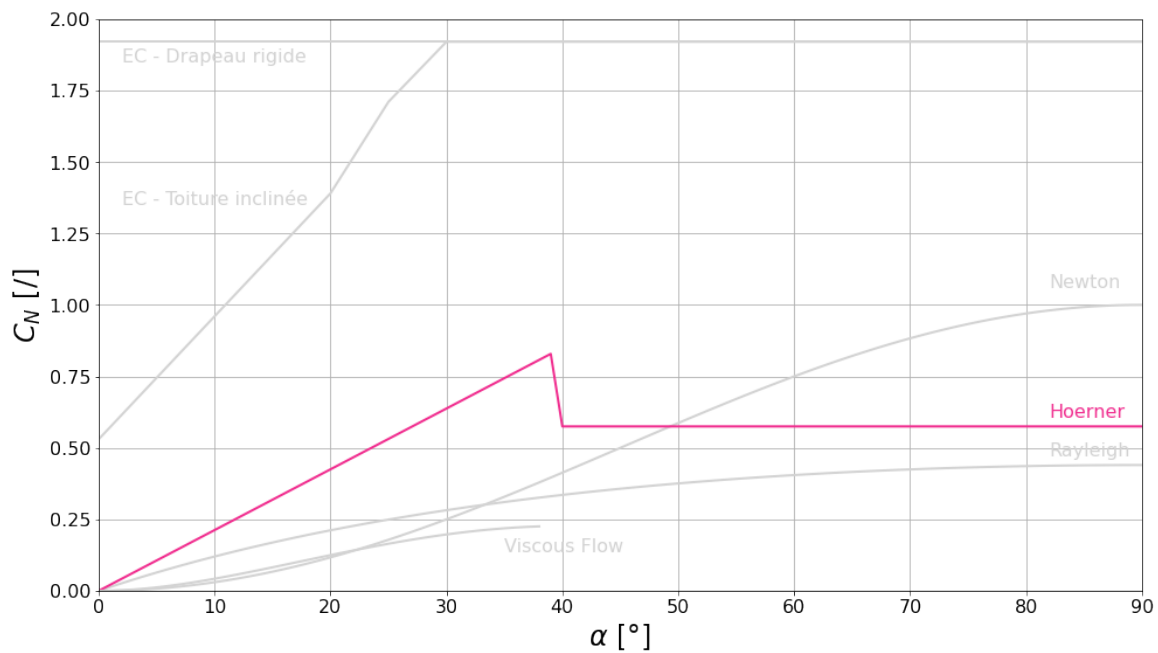
Contrairement aux modèles analytiques qui se basent plutôt sur une analyse théorique et littéraire du cas, les modèles empiriques se basent quant à eux sur des observations expérimentales.

10.3.1 Modèle de Hoerner

Ce modèle est basé sur des expériences réalisées en 1932 par Flachsbart qui a mesuré les efforts appliqués sur une plaque carrée pour différents angles d'attaque. (Holmes et al., 2006) Ces données ont été reprises par Hoerner qui les a synthétisées au travers de la formulation suivante :

$$C_N = \begin{cases} 0.85 \cdot \frac{\alpha}{40} & \text{si } 0^\circ \leq \alpha < 40^\circ \\ 0.575 & \text{si } 40^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Nous pouvons modéliser ce coefficient sous forme graphique. Cette modélisation est visible sur la figure III.20.


 FIGURE III.19 – Évolution de C_N pour le modèle de Hoerner.

On constate qu'à partir d'environ 40° , la plaque décroche et les efforts diminuent d'un coup. Le phénomène de décrochage est un comportement assez classique dans le monde de l'aérospatial et peut, par exemple, se produire sur un avion lorsque celui-ci vole trop lentement pour un angle d'attaque trop grand. Ce phénomène se produit pour des angles d'attaque élevés, lorsque l'air se décroche brutalement de l'aile. Ceci fait chuter la portance et augmenter la trainée. Ce qui explique le comportement de la courbe aux environs des 40° .

10.3.2 Modèle de Hayibo

Ce modèle est développé par l'article "Vertical free-swinging photovoltaic racking energy modeling : A novel approach to agrivoltaics". (Hayibo and Pearce, 2023) Au travers de cet article, les auteurs développent en détails les modèles de panneaux photovoltaïques libres. Afin d'étayer leur article, les auteurs ont réalisé une étude dans la soufflerie de la "Western University". Cette étude a permis de déterminer le coefficient de frottement C_D selon l'angle du panneau et donc de la vitesse.

Cependant, au travers de l'étude, aucun modèle de coefficient de portance n'est donné. Pour palier à ce problème, nous allons utiliser le coefficient de portance du modèle de Newton qui est plus précis que les autres développés jusqu'à présent. Par ailleurs, après avoir effectué plusieurs essais, le choix du C_L n'influence que très peu le coefficient C_N qui sera déterminé en réalisant le bref calcul suivant : $\sqrt{C_D^2 + C_L^2}$.

Les auteurs fournissent une formule résultant de l'interpolation des 10 points de mesure pris lors de leurs essais en soufflerie. Cependant, après avoir comparé l'équation et le graphique expérimental fourni, il apparaît qu'une erreur s'est glissée dans leur formulation de la fonction d'interpolation. J'ai donc pris la liberté, sur base des points, de déterminer l'équation permettant d'interpoler les points expérimentaux de manière exacte. L'équation obtenue est la suivante :

$$C_D = (-8.809 \times 10^{-6} \cdot \alpha^3 + 0.001191 \cdot \alpha^2 - 0.01636 \cdot \alpha + 0.2852) \cdot \frac{1}{2} \quad (\text{III.21})$$

Le coefficient $\frac{1}{2}$ permet d'ajuster l'équation proposée à l'équation III.2.

Cette équation ajoutée au coefficient C_L du modèle de Newton permet de déterminer un coefficient C_N représenté sur la figure III.20 :

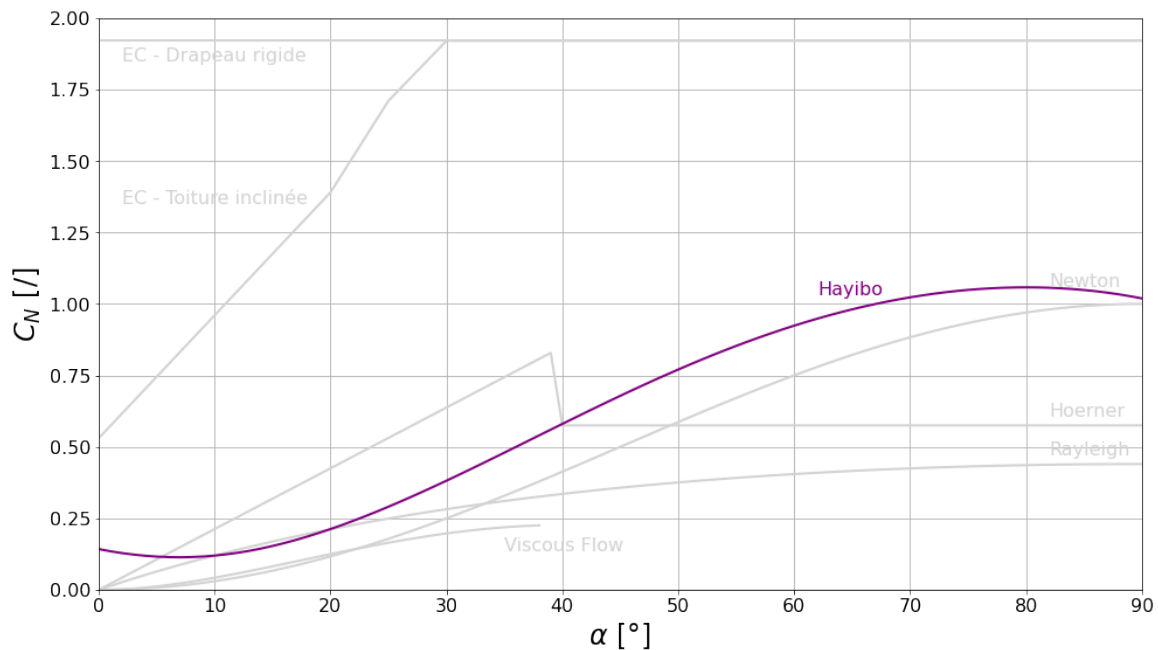
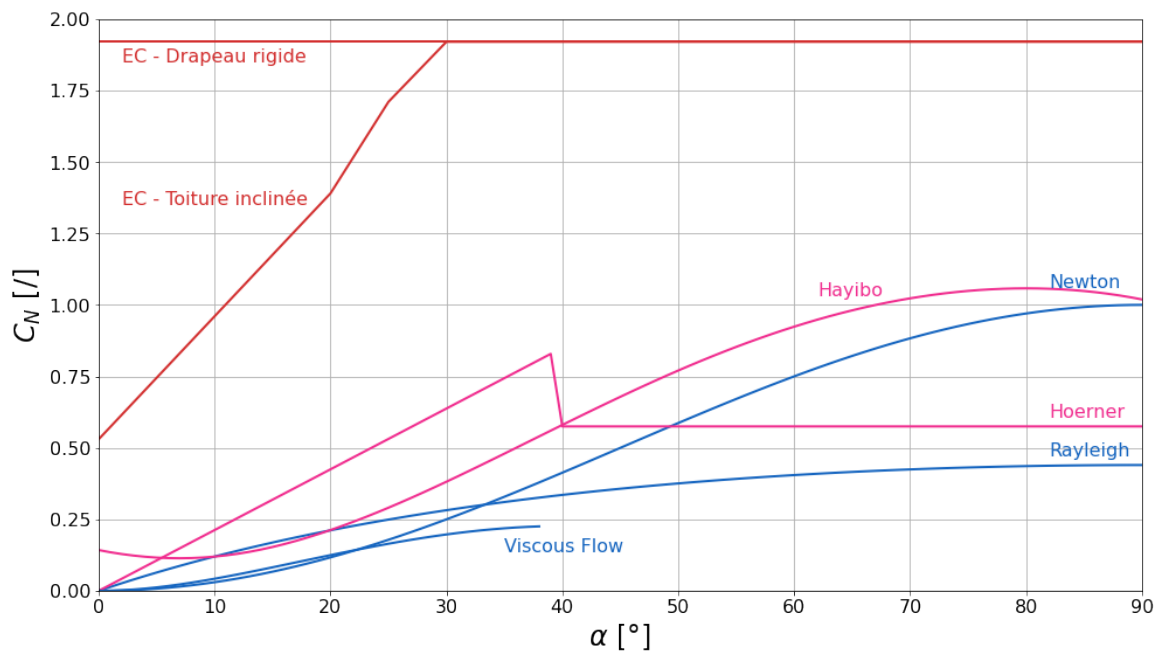


FIGURE III.20 – Évolution de C_N pour le modèle expérimental proposé par Hayibo et Pearce.

On peut voir que la courbe suit assez bien les différents modèles montrés précédemment. De manière générale, le modèle est assez proche de celui de Newton, ce qui indique que ce dernier est assez fiable. La proximité avec les autres modèles vient également confirmer leur pertinence dans l'analyse de ce genre de structure. Étant donné que cette courbe est obtenue à l'aide d'essais en soufflerie, elle se rapproche le plus possible du cas réel et agit donc comme un parfait exemple pour comparer les différents modèles théoriques et empiriques.

L'ensemble des modèles présentés au cours de cette section peuvent être synthétisés dans une seule figure. La figure III.21 présente l'ensemble de ces modèles avec respectivement, en rouge les modèles de l'Eurocode, en bleu les modèles théoriques et en rose, les modèles expérimentaux.

FIGURE III.21 – Évolution des coefficients de C_N en fonction de la vitesse du vent.

11 Comparaison des différents modèles

Maintenant que les différents modèles, aussi bien théoriques qu'empiriques, ont été développés, nous pouvons maintenant passer à leur comparaison. Pour cela, nous utiliserons surtout deux outils, à savoir le graphique de la relation angle-vitesse ainsi que les graphiques représentant les efforts de manière adimensionnelle.

11.1 Relation angle-vitesse

En suivant l'algorithme détaillé à la figure III.5, nous pouvons obtenir le graphique représentant la relation entre la vitesse et l'angle α du panneau. Ceci est assez pertinent à étudier, car il nous permettra de comparer les différents modèles entre eux afin de déterminer lesquels sont similaires ainsi que le comportement que chaque modèle propose. Cette comparaison permet également de visualiser le comportement théorique du panneau face au vent. L'évolution de cette relation peut être représentée graphiquement par la figure III.22 :

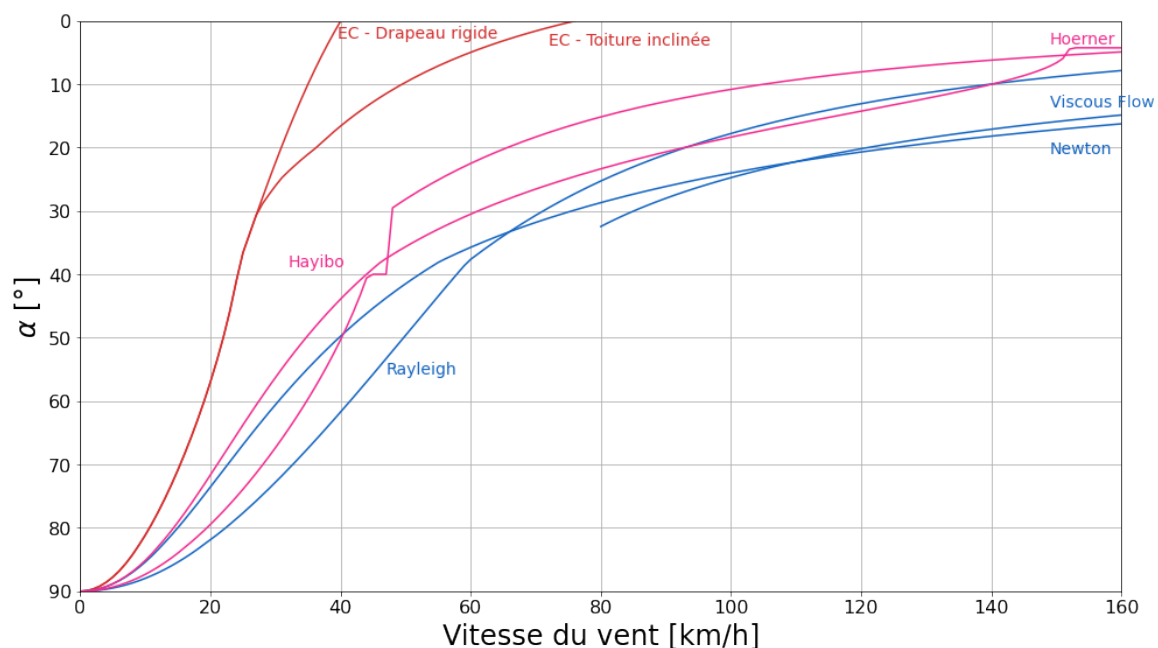


FIGURE III.22 – Relation vitesse angle.

Comme pressenti lors de la présentation des différents modèles, les modèles Eurocode ont un comportement qui ne reflète pas la réalité. Intuitivement, nous pouvons imaginer que le panneau n'atteindra jamais une position parfaitement horizontale étant donné que plus le panneau est à l'horizontal, plus les efforts verticaux diminueront. Or, ce sont ces derniers qui vont lutter contre le poids du panneau pour le maintenir en position. Le panneau tendra donc intuitivement vers une position horizontale pour une force de vent infinie. Nous pouvons donc conclure que les Eurocode fournissent un comportement trop conservateur qui n'est pas représentatif de la réalité. Il paraît évident que le panneau n'atteint pas la position horizontale avec seulement 40 [km/h] comme décrit par le modèle du drapeau rigide. Idem pour le modèle de la toiture inclinée qui suggère une position horizontale vers 75 [km/h]. Les modèles Eurocode seront donc exclus du reste de l'analyse au vu de leur faible pertinence.

En analysant le modèle de Hoerner, nous pouvons observer que le décrochage mentionné plus tôt est toujours présent. Ce comportement n'est pas choquant, mais apparaît plus lorsque la vitesse diminue. Nous pouvons également remarquer que le modèle tend à donner au panneau une position plus horizontale que les autres modèles, ce qui pourrait avoir tendance à diminuer les efforts. Ce modèle n'est donc pas à exclure tout de suite, mais quelques doutes pourraient être émis quant à sa précision.

Le modèle dit "Viscous flow" quant à lui est supposément le plus précis de tous les modèles théoriques au vu de son développement. Cependant, on peut remarquer qu'il colle presque parfaitement au modèle de Newton. Étant donné que le modèle "Viscous flow" n'est valable que pour des petits angles, et donc des vitesses importantes, nous allons également l'exclure au profit du modèle de Newton.

Enfin, nous pouvons comparer le modèle de Hayibo, supposé plus précis, avec le modèle de Rayleigh et de Newton. Nous pouvons constater que le modèle expérimental suit la même allure que le modèle de Newton, mais avec une évolution légèrement plus rapide. À partir de 80 [km/h], le modèle de Rayleigh colle assez bien au comportement observé dans l'article "Vertical free-swinging photovoltaic racking energy modeling : A novel approach to agrivoltaics" ([Hayibo and Pearce, 2023](#)).

Cependant, étant donné que des vitesses supérieures à 80 [km/h] ne se produisent que quelques fois par an, on peut se demander quel modèle est le plus approprié.

Nous pouvons également noter que le modèle de Newton, grâce à son évolution plus lente, offre un comportement plus conservateur, car il tendra à augmenter les efforts.

11.2 Efforts adimensionnels

Nous pouvons maintenant analyser les efforts selon chaque modèle étudié. Pour cela, nous allons utiliser une modélisation adimensionnelle des efforts en fonction du poids du panneau photovoltaïque concerné.

Analysons d'abord les réactions horizontales qui sont les plus importantes, car elles conditionnent le dimensionnement :

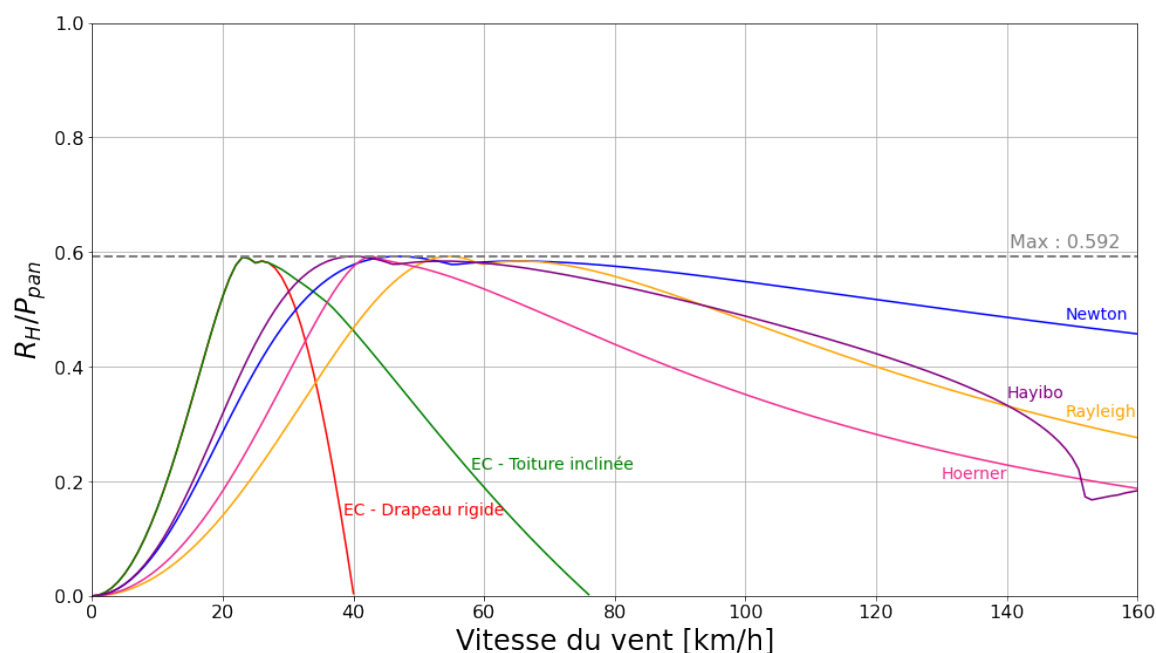


FIGURE III.23 – Réactions horizontales en fonction du poids du panneau.

La première chose que nous pouvons noter est que les réactions horizontales atteignent toutes un maximum, identique peu importe le modèle employé.

Ce maximum, atteint peu importe le modèle, est assez intéressant à noter car il conditionne les efforts maximum que va subir la structure et donc le dimensionnement de cette dernière. On note également que pour des vitesses très élevées, les efforts diminueront tout de même. Le modèle choisi n'apporte en réalité aucune plus-value dans l'analyse des efforts horizontaux. Cette représentation des efforts permet également de confirmer que les modèles de l'Eurocode ne sont pas utiles dans cette analyse étant donné que les efforts retombent assez vite à zéro.

Nous pouvons constater comme prévu que le modèle de Newton apporte un modèle plus conservateur des efforts là où le modèle de Rayleigh est moins conservateur et colle avec les observations expérimentales. Nous pouvons voir sur la figure III.24 que le comportement du moment est similaire à celui des efforts horizontaux, ce qui est attendu.

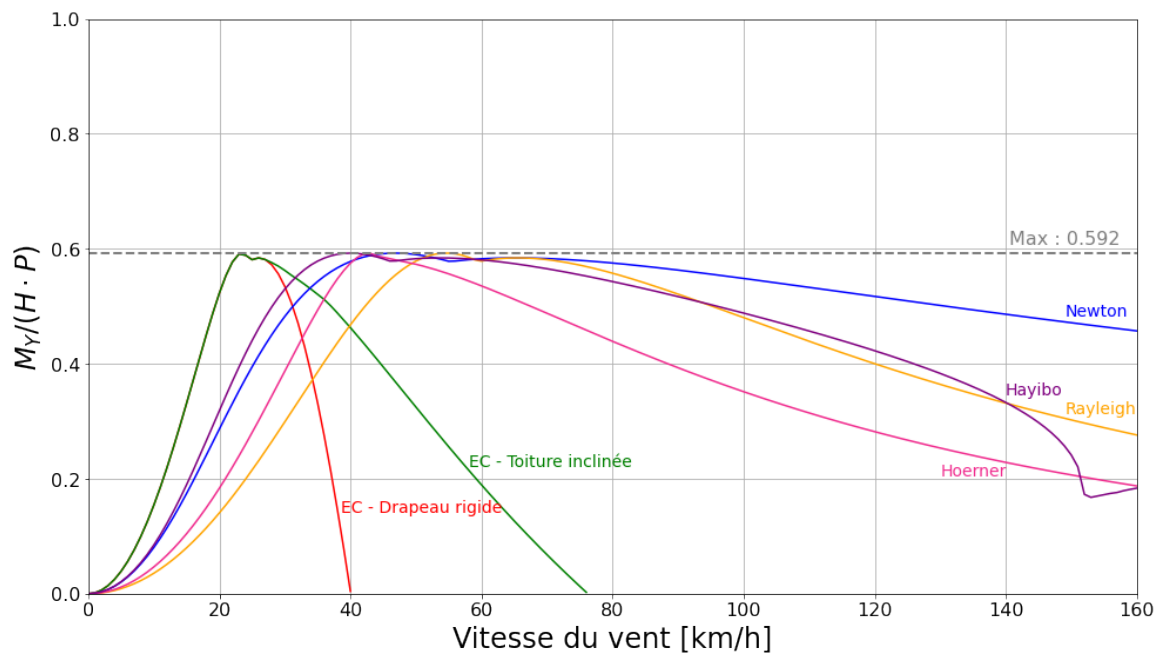


FIGURE III.24 – Réactions liées au moment en fonction du poids et de la hauteur du panneau.

Nous pouvons maintenant analyser les efforts verticaux, plus précisément les réactions verticales en fonction du poids du panneau. Intuitivement, au vu des efforts engendrés, on peut se demander si le vent ne va pas avoir tendance à soulever la structure. Pour cela, la figure III.25 permet de visualiser les réactions générées par le vent en fonction de la vitesse de ce dernier.

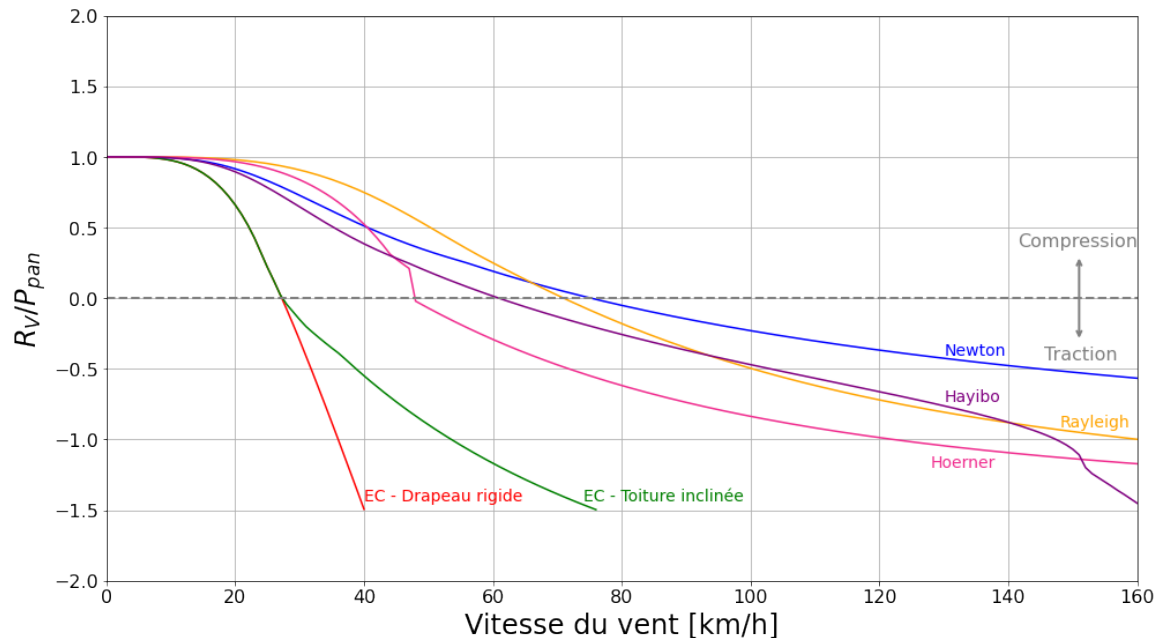


FIGURE III.25 – Réactions verticales en fonction du poids du panneau.

Nous pouvons remarquer que les contraintes verticales deviendront des contraintes de traction aux alentours de 60 à 80 [km/h], ce qui signifie donc que le panneau va avoir tendance à soulever la structure. Cependant, le poids de la structure n'est pas pris en compte dans ce calcul, ce qui pourrait donc probablement résoudre le problème. Si ce dernier persiste, l'ajout d'un ballast peut être pertinent. Les résultats obtenus en prenant en compte le poids de la structure sont présents en fin de

dimensionnement à la sous-section 14.1

Finalement, au vu des diverses observations effectuées, le choix des modèles de Newton et de Hoerner s'avère être pertinent dans le cadre de l'analyse conduite dans ce travail. Au travers de la suite de ce travail, c'est le modèle de Newton et de Hoerner qui seront utilisés, le but étant de déterminer lequel des deux est le plus précis.

12 Étude en soufflerie

Afin de pouvoir définir quel modèle théorique est le plus adéquat, une étude en soufflerie s'avère pertinente. Cette dernière permettra de déterminer un modèle spécifique aux panneaux photovoltaïques oscillants qui servirait de modèle de référence pour comparer les modèles théoriques entre eux et déterminer le plus précis. Un autre intérêt d'un tel modèle serait d'avoir des données précises notamment pour des angles proches de la verticale, souvent peu étudiées par les modèles expérimentaux.

C'est dans cette idée que l'essai suivant intervient. Il a pour but de modéliser le comportement, ici l'angle, d'un panneau en fonction de la vitesse du vent.

Afin de se rapprocher le plus possible du système utilisé sur une barrière agrivoltaïque à panneaux oscillants, un panneau sera suspendu en son sommet et placé directement face au vent. Pour cela, nous utiliserons un panneau correspondant aux caractéristiques suivantes :

- Dimensions : même rapport $H \times L$ que le panneau PV utilisé pour le prototype, à savoir $L_{Pan} = 1.846 \cdot H_{Pan}$
- État de surface : Lisse au touché, proche d'un panneau PV
- Poids surfacique : $118.85[N/m^2]$ à $\pm 10\%$, identique au panneau PV utilisés dans le cadre de ce mémoire

Ce panneau sera ensuite suspendu en son sommet à l'aide d'une rotule (ici une charnière de porte) qui permet une rotation avec le moins de frottement possible. Le panneau sera fixé par sa rotule à une structure stable qui empêche tout mouvement parasite.

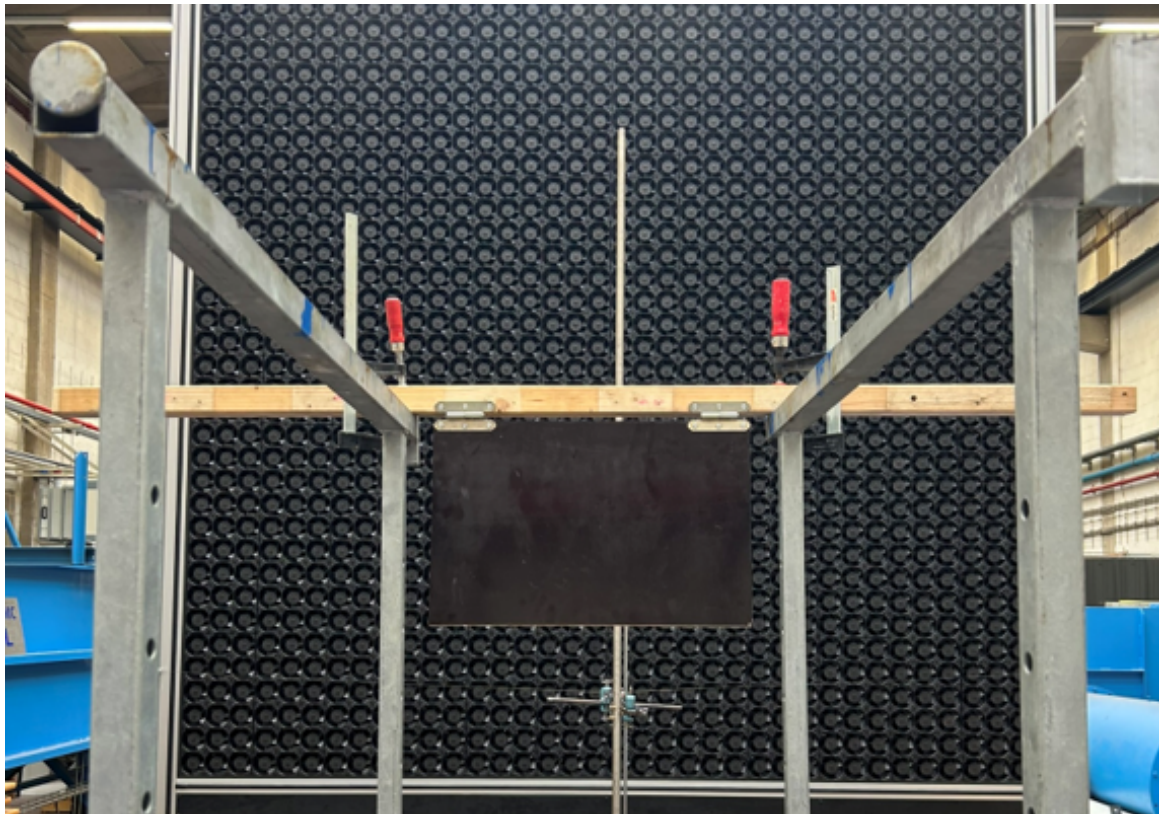


FIGURE III.26 – Installation effectuée en laboratoire, supports et modèle réduit.

12.1 Installation et protocole expérimentale

Pour réaliser cet essai, la soufflerie utilisée est une soufflerie "WindShaper". Les résultats présentés à l'aide de cette soufflerie sont rendus possible grâce aux infrastructures acquises dans le cadre de la mesure BE-C[C72]-I[I-711], Plateforme de Recherche pour la Transition Énergétique de la Communauté française, financée via le chapitre REPowerEU du plan NextGenerationEU. Cette dernière possède plusieurs centaines de petits ventilateurs qui permettent de générer différents types de configuration de flux et d'atteindre une vitesse de $16[m/s]$. Dans le cas de cet essai, c'est un flux laminaire, régulier et sans turbulence, qui sera utilisé.

Afin de mesurer la vitesse du vent, une sonde Pitot est placée face au WindShaper à $1[m]$ de distance. Cette sonde mesure la pression dynamique de l'air arrivant directement de la soufflerie ainsi que la pression statique. La sonde retourne la valeur correspondant à la différence de pression entre ces deux valeurs. Cette pression ainsi obtenue permet de déterminer la vitesse de l'air en utilisant l'équation de Bernoulli :

$$P_{Pitot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \quad (\text{III.22})$$

La masse volumique de l'air pour cet essai est de $1.1738[kg/m^3]$, mesuré le jour même de l'essai par Julien Dandoy qui m'a assisté pour la réalisation de celui-ci.

Le panneau utilisé pour réaliser l'essai est un panneau multiplex bakélinisé de $15[mm]$ d'épaisseur et d'un poids surfacique de $117.46[N/m^2]$, très proche du panneau PV utilisé. Ce panneau a l'avantage d'avoir un traitement de surface lisse qui permet donc un comportement similaire à un panneau PV. Afin de correspondre aux dimensions de l'installation, le modèle réduit mesure $50[cm]$ de large et fait $27[cm]$ de haut. Ce panneau est fixé, à l'aide de deux charnières, à un élément en bois qui est

solidement fixé de part et d'autre à l'aide de supports métalliques. Ceux-ci sont placés de manière à ne pas gêner le flux d'air et l'oscillation du panneau. La surface du panneau se situe à $2.20[m]$ de la soufflerie et à $1.20[m]$ de la sonde Pitot.

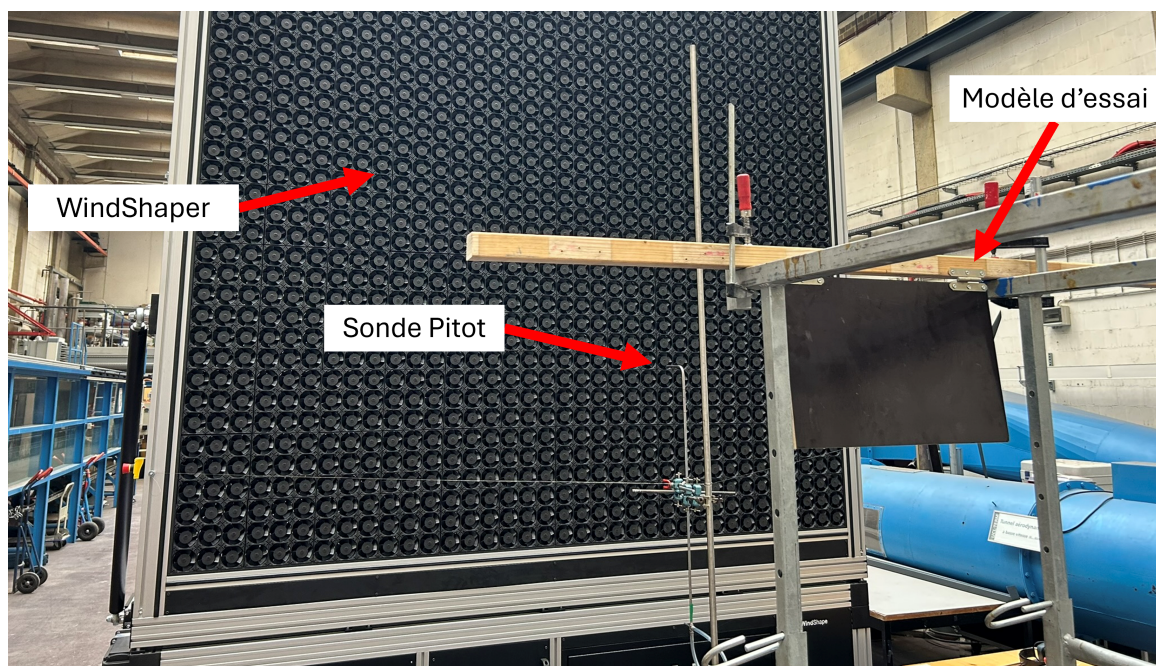


FIGURE III.27 – Installation effectuée en laboratoire.

Après installation du modèle, nous pouvons remarquer qu'au repos le panneau ne se trouve pas parfaitement à la verticale. La rotule n'étant pas centrée par rapport au centre de gravité du modèle, le panneau du modèle à un angle initial de $4.92 [^\circ]$.

Lorsque le modèle sera soumis aux différentes plages de vent, l'angle sera mesuré à l'aide d'un appareil photo. Ce dernier sera placé perpendiculairement à l'axe de rotation du modèle, permettant ainsi de connaître son angle par rapport à un repère vertical. La figure III.28 montre une image prise pendant l'essai.



FIGURE III.28 – Image prise lors de l’essai pour une puissance de 70%.

Afin de calculer l’angle, un script python permettant de tracer des vecteurs et de déterminer l’angle entre ces derniers. Afin de permettre d’analyser plusieurs images, le script réalisera une moyenne des angles obtenus pour une même vitesse. La figure III.29 montre les résultats obtenus par le logiciel pour une puissance de soufflerie de 100%.



FIGURE III.29 – Utilisation et résultats du script Python.

12.1.1 Protocole expérimental

Pour chaque essai, la puissance de la soufflerie va être augmentée par palier de 10%, ce qui correspond à environ 1.5 [m/s]. Un délai de quelques secondes sera observé jusqu’à ce que le modèle se stabilise. Une fois ce dernier stabilisé, et pour chaque palier, plusieurs photos (au moins 5) seront prises par un appareil photo. Le fait de prendre plusieurs photos permet de moyenner les mesures obtenues et supprimer les petites oscillations du panneau. Cela permet également de diminuer les erreurs lors de la prise de mesure de l’angle, étant donné que cette dernière est manuelle. La vitesse de vent est mesurée par une sonde Pitot.

Une fois l'essai terminé, l'ensemble des images seront traitées pour déterminer l'angle du panneau pour chaque palier de vitesse.

12.2 Résultats des essais

Après analyse des résultats obtenus lors de l'essai en soufflerie, nous obtenons les résultats visibles sur le tableau III.2 :

Vitesse [m/s]	Vitesse [km/h]	Angle du panneau [°]	Angle corrigé [°]
0	0	85.08	90
2	7.2	83.34	88.26
3.5	12.6	80.27	85.19
5	18	76.17	81.09
6.5	23.4	69.58	74.5
8	28.8	63.13	68.05
9.5	34.2	56.63	61.55
11	39.6	48.58	53.5
12.5	45	39.54	44.46
14	50.4	31.57	36.49
15.5	55.8	24.57	29.49

TABLE III.2 – Données obtenues lors de l'essai.

La colonne angle corrigé correspond aux résultats obtenus après soustraction de l'angle initial pour une vitesse de $0[km/h]$. Cet angle peut en effet être déduit et considéré comme égal à $0[^\circ]$ car il correspond à une résultante du moment causé par le non-alignement du centre de gravité du modèle avec l'axe autour duquel ce dernier est rotulé. Les données obtenues avec l'angle corrigé peuvent être représentées sous la forme d'un graphique.

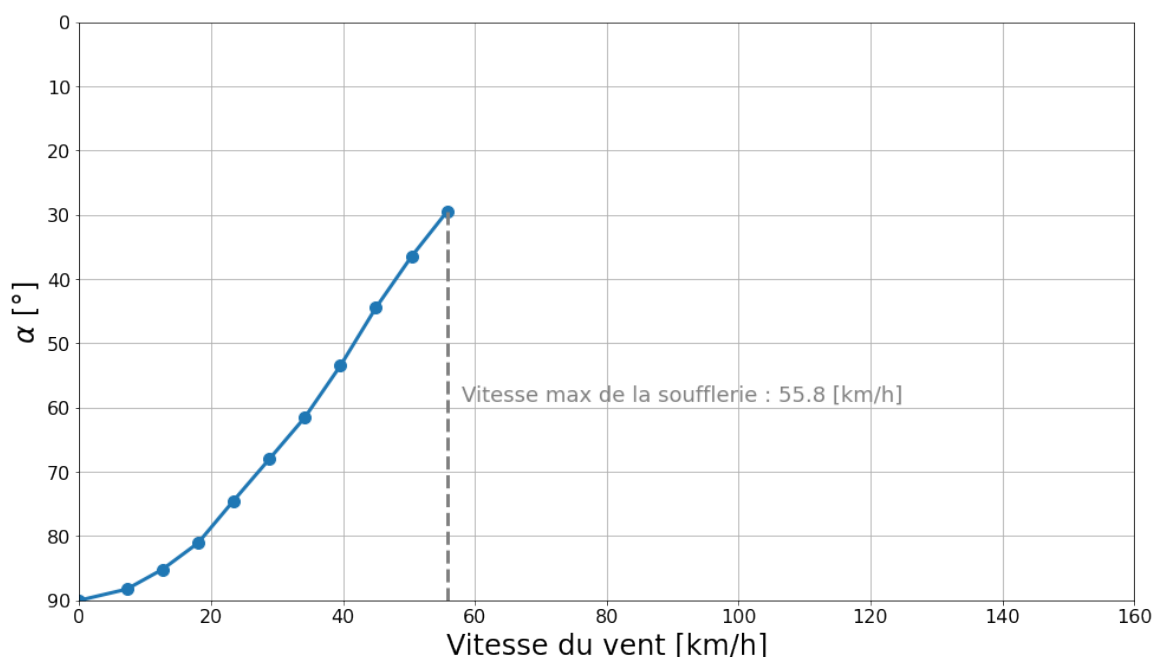


FIGURE III.30 – Résultats obtenus lors de l'essai.

12.3 Comparaison avec les modèles existants.

Le but premier de cet essai est d'aider à déterminer quel est le modèle théorique le plus proche de la réalité. Pour ce faire, nous allons utiliser la figure III.22 dans laquelle sont représentés les modèles.

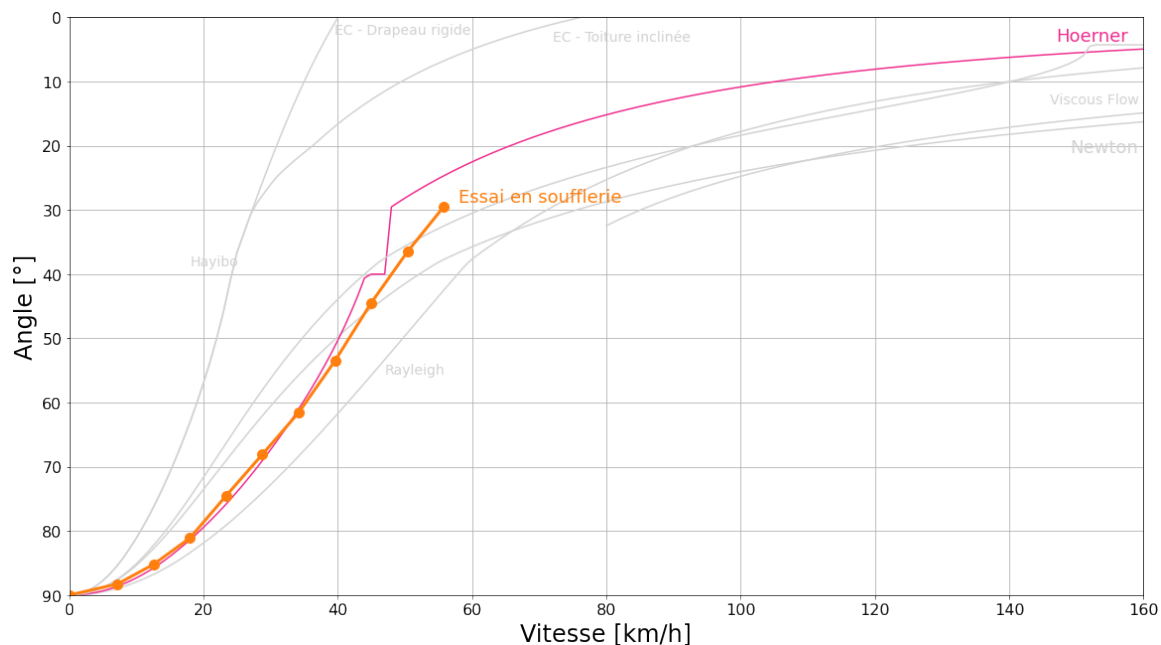


FIGURE III.31 – Comparaison de l'essai avec les modèles théoriques.

Cette figure nous permet de voir que l'essai en soufflerie correspond assez bien au modèle de Hoerner. Cependant, pour des vitesses plus élevées, nous pouvons remarquer que le modèle tend à s'éloigner légèrement de la courbe bien que ceci puisse s'expliquer assez simplement par le fait que le saut présent dans le modèle de Hoerner n'est pas applicable au cas étudié ici.

Malheureusement, la soufflerie ayant une capacité maximale de 55.8 [km/h], nous ne pouvons pas déterminer avec certitude que le comportement sera similaire à celui proposé par le modèle de Hoerner. Mais l'allure de la courbe ainsi que la direction vers laquelle cette dernière tend laisse à penser que le modèle de Hoerner s'avère être le plus précis. Ceci sera abordé plus tard dans ce mémoire, à la lumière des résultats obtenus par l'analyse du prototype.

13 Efforts de vents sur la structure

Maintenant que les efforts transmis par les panneaux à la structure ont été définis, nous pouvons nous demander quel seront les effets du vent sur cette dernière. En effet, la structure portante représente une surface non négligeable qui sera exposée aux vents et qui aura donc des effets sur cette dernière.

Afin de déterminer les efforts maximaux agissant sur la structure, nous considérons que le vent agit de manière uniforme sur la structure et les efforts sont définis selon l'Eurocode 1-4 portant sur les efforts de vents.

Hypothèses

- Vent uniformément réparti défini par le point le plus haut de la structure
- La vitesse de base du vent considérée sera celle de l'annexe belge de l'Eurocode : $V_b = 25[m/s]$

- Considérons un air classique à 25°C : $\rho = 1.25[kg/m^3]$
- Terrain de catégorie II avec $z_0 = 0.05$ et un $z_e = H_{struct}$
- $Re = 300.000$, fixé au vu des résultats obtenus précédemment

Rappelons tout d'abord la formule suggérée par l'Eurocode permettant de déterminer les efforts de vents :

$$F_w = C_s C_d \cdot c_f \cdot q_p(z_e) \cdot A_{ref} \quad (III.23)$$

Nous pouvons maintenant exprimer ces paramètres en fonction de la hauteur maximale de l'élément ainsi que du diamètre des sections.

En utilisant la formule de la pression dynamique de pointe q_p qui est écrite telle que :

$$q_p(H) = \left[1 + 7 \frac{1}{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(H) \quad (III.24)$$

Qui peut être réécrite comme étant :

$$q_p(H) = 14.10 \left[\ln\left(\frac{H}{0.05}\right)^2 + 7 \ln\left(\frac{H}{0.05}\right) \right] \quad (III.25)$$

Les autres paramètres sont déterminés à l'aide des données fournies par l'Eurocode, visible à la figure III.32, nous obtenons donc :

- $C_s C_d = 1$
- $C_f = 0.784$
- $A_{ref} = L_{elem} \cdot D_{elem}$

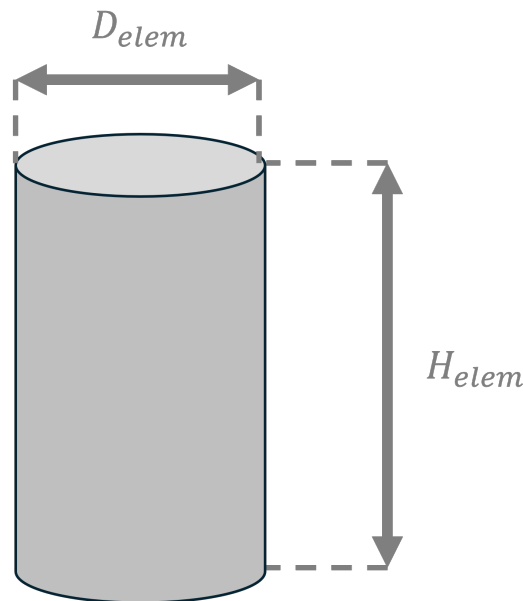


FIGURE III.32 – Paramètres de la section circulaire.

Nous pouvons donc maintenant définir les efforts maximaux agissant sur la structure selon l'Eurocode comme étant :

$$F_w(H, H_{elem}, D_{elem}) = 11.05 \left[\ln \left(\frac{H}{0.05} \right)^2 + 7 \ln \left(\frac{H}{0.05} \right) \right] \cdot H_{elem} \cdot D_{elem} \quad (\text{III.26})$$

Dans le cas de poutres horizontales, $H_{elem} = L_{elem}$, la longueur des éléments.

Cette relation étant implicite, elle nécessitera plusieurs itérations avant d'être résolue.

Effet des efforts

Pour les poutres, l'effet du vent sera compté comme une charge surfacique, répartie sur l'ensemble de la poutre. Cet effort sera placé horizontalement, dans le même sens et la même direction que les efforts transmis par le panneau afin d'accentuer l'effet défavorable du vent.

Concernant les colonnes, ces dernières subiront premièrement le vent sous forme d'une charge surfacique agissant sur l'ensemble de celle-ci, à nouveau de manière horizontale afin d'être défavorable. Cependant, la colonne subira également des efforts ponctuels au niveau des appuis des poutres.

Les efforts dus au vent se présentent sous cette forme :

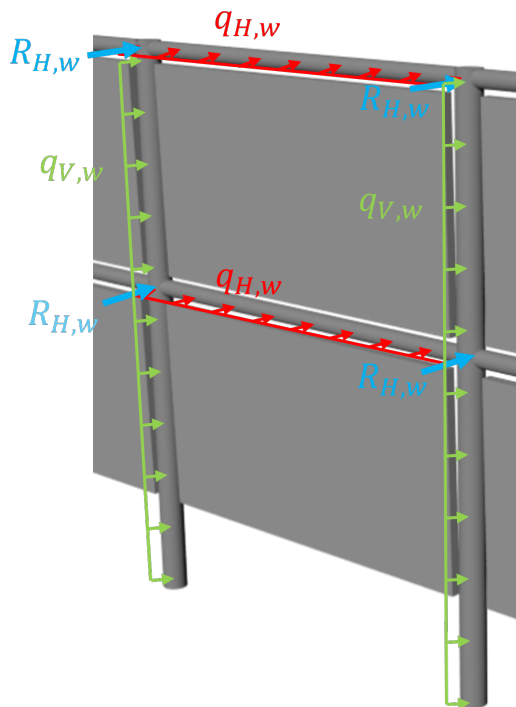


FIGURE III.33 – Efforts de vents transmis à la structure. ©B. Dardenne

13.1 Quel impact sur le dimensionnement

Au vu des valeurs des efforts, ces derniers auront forcément un impact sur le dimensionnement.

Nous pouvons alors nous demander quel serait cet impact par rapport aux efforts. Pour cela, nous utiliserons le modèle de Newton afin de comparer les efforts avec ou sans la prise en compte des effets du vent sur la structure. Dès lors, nous analyserons comme précédemment l'effort transmis horizontalement à la structure :

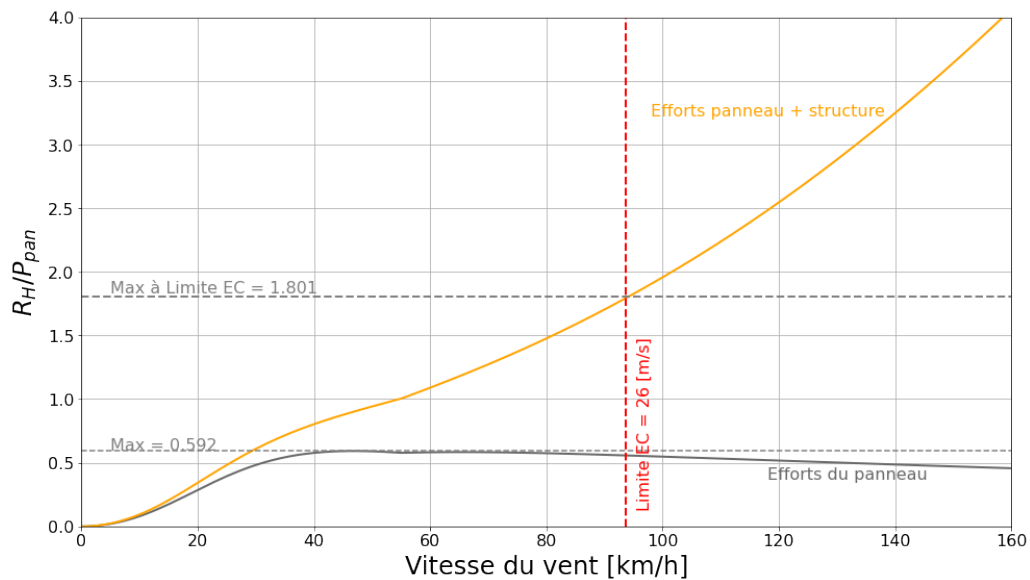


FIGURE III.34 – Réactions horizontales au pied de la structure.

L'analyse des efforts verticaux n'est pas nécessaire car les efforts de vents agissant sur la structure n'impactent pas ces derniers. Cependant, l'analyse du moment causé par le vent est quant à elle pertinente car le moment est un des paramètres agissant directement dimensionnement, on peut représenter les résultats sur la figure suivante :

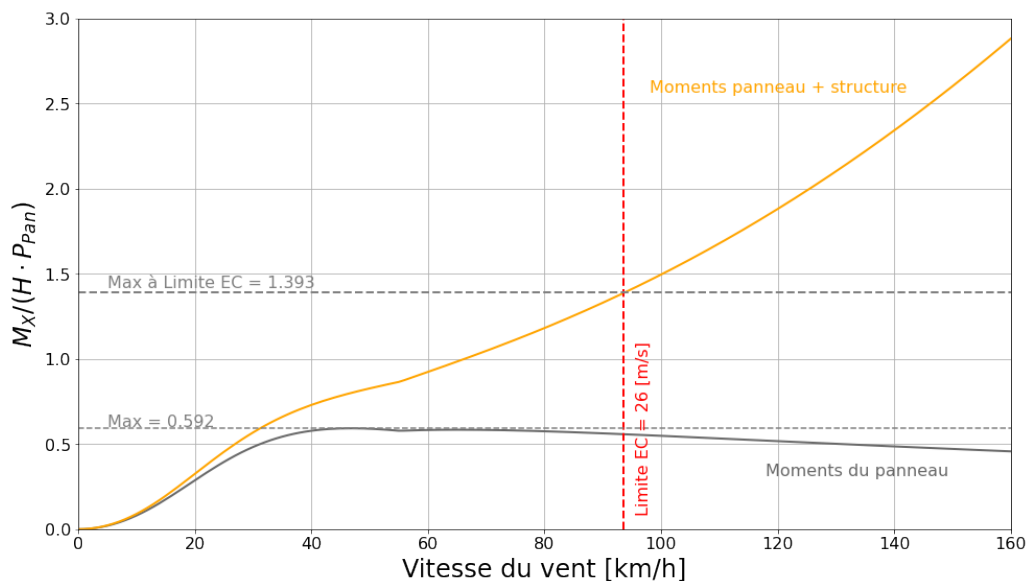


FIGURE III.35 – Moment au pied de la structure.

Ces graphiques démontrent assez bien l'impact de la prise en compte des efforts de vent sur la structure. En effet, nous pouvons constater que les efforts horizontaux transmis à la structure augmentent de 304% pour un dimensionnement à l'Eurocode. En sachant cela, il est donc clair que leur prise en compte est essentielle pour réaliser un dimensionnement. Le dimensionnement du prototype, présenté à la sous-section 14.1, permettra de quantifier la différence lors du dimensionnement d'un module de deux panneaux.

Chapitre IV

Étude du prototype

Ayant défini les efforts qui peuvent transiter au sein d'une barrière agrivoltaïque, il convient maintenant de vérifier si ces derniers sont en adéquation avec la réalité du terrain. En plus de cela, le prototypage est un élément essentiel dans toute réalisation. Ce dernier va nous permettre de passer de la théorie à la réalité et de définir si les objectifs mentionnés plus tôt sont ou non réalistes.

Ce chapitre passera en revue toutes les étapes nécessaires au dimensionnement d'un module de deux panneaux verticaux.

14 Dimensionnement d'un module de deux panneaux

Comme évoqué plus tôt, l'intérêt est de dimensionner un module à deux panneaux. Ce module correspond aux dimensions, hypothèses et critères de dimensionnement évoqués lors de la section 7.

Plusieurs étapes sont nécessaires afin de réaliser ce dimensionnement. Dans un premier temps, nous allons analyser les éléments structuraux afin de déterminer les dimensions des poteaux et des poutres en comparant l'intérêt ou non de prendre en compte les efforts de vents agissant sur le portique. Une fois les dimensions définies, l'étape suivante portera sur la détermination de la profondeur minimale à laquelle la structure doit être enfoncée. Ce paramètre de la structure s'appelle également la fiche.

14.1 Dimensions des éléments

Dans un premier temps, il faut déterminer les efforts maximum à prendre en compte. Pour cela, nous allons nous servir des résultats obtenus au travers de la sous-section 11.2, plus précisément les résultats prenant en compte les efforts de vent agissants sur le portique. Pour rappel, les efforts adimensionnels obtenus dans cette section permettent d'obtenir les réactions en pied de colonne pour les efforts causés par un panneau soumis au vent. Les efforts adimensionnels retenus sont les suivants :

$$\frac{R_H}{P_{Pan}} = 1.801 \quad \frac{R_V}{P_{Pan}} = 1 \quad \frac{M_X}{H \cdot P_{Pan}} = 1.393 \quad (\text{IV.1})$$

Ces efforts agissent sur la structure de manière suivante :

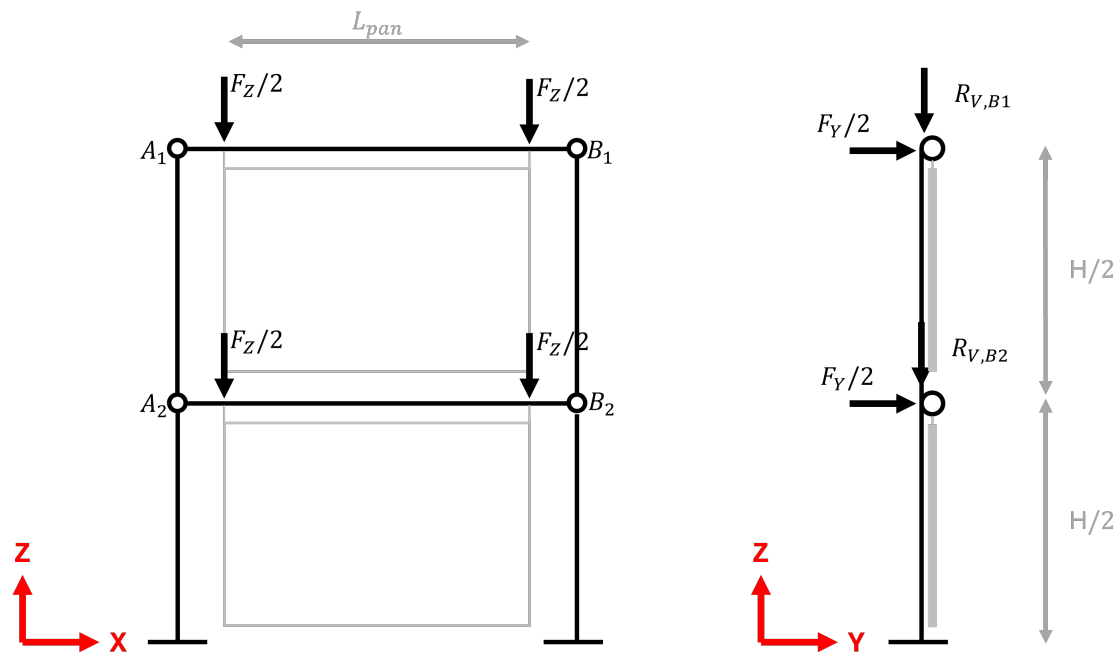


FIGURE IV.1 – Schéma statique d'un module.

Sachant que le module est composé de deux panneaux, le premier placé à $1.75[m]$, le second à $3.5[m]$, nous pouvons déterminer les efforts au pied de la structure à l'aide des efforts adimensionnels. En prenant en compte la répartition des efforts au sein de la structure, nous pouvons déterminer les efforts agissant sur celle-ci en chaque point.

De ces efforts, nous ne retiendrons que les efforts maximums, responsables du dimensionnement. À l'aide des critères de dimensionnement présentés à la sous-section 11.2, nous obtenons la tableau IV.1 qui permet d'obtenir les dimensions des éléments de la structure :

Élément	Effort max.	Diamètre min.	Aire	Masse
Poutre	$N = 0 \text{ [kN]}$	10 [cm]	78.50 [cm ²]	16.19 [kg]
	$V_Y = 0.13 \text{ [kN]}$			
	$V_Z = 0.28 \text{ [kN]}$			
	$M_Y = 0.09 \text{ [kNm]}$			
	$M_Z = 0.17 \text{ [kNm]}$			
Poteau	$N = 1.97 \text{ [kN]}$	14 [cm]	153.86 [cm ²]	40.39 [kg]
	$V = 0.64 \text{ [kN]}$			
	$M = 1.11 \text{ [kNm]}$			

TABLE IV.1 – Dimensionnement des éléments pour des panneaux oscillants avec le vent agissant sur la structure.

Avec ces dimensions, les taux de travail obtenus pour chaque critère sont les suivants :

Élément	Critère	Taux de travail (ϕ)
Poutre		
	Effort tranchant	0.17
	Flexion bi-axiale	0.04
	Flèche (L/300)	0.94
Critère dimensionnant	Flèche	0.94
Colonne		
	Compression	0.005
	Effort tranchant	0.05
	Flexion	0.26
	Flèche (L/300)	0.98
	Flambement	0.11 et $\lambda = 200$
Critère dimensionnant	Flèche	0.98

TABLE IV.2 – Taux de travail par critère pour la poutre et la colonne.

Nous pouvons voir ici que les deux critères les plus importants dans le dimensionnement sont le flambement et la flèche. Mais nous retiendrons surtout la flèche, plus dimensionnante et moins arbitraire que le choix de la limite du flambement. Cette dernière est basée sur les valeurs de λ , la sensibilité au flambement, qui sont à proscrire dès qu'elles dépassent 200.

On note finalement une diminution de la quantité de matière utilisée de 500% par rapport au dimensionnement réalisé pour un même module à panneau fixe !

Effet de la prise en compte du vent

On pourrait se demander quel est l'impact de la prise en compte des efforts de vents sur le portique. Pour ce faire, le tableau suivant permet de quantifier les efforts internes subis par la structure si on ne prend pas en compte ces efforts.

Élément	Effort max.	Diamètre min.	Aire	Masse
Poutre	$N = 0$ [kN]	10 [cm]	78.50 [cm ²]	16.19 [kg]
	$\bar{V}_Y = 0.06$ [kN]			
	$V_Z = 0.23$ [kN]			
	$\bar{M}_Y = 0.04$ [kNm]			
	$M_Z = 0.12$ [kNm]			
Poteau	$N = 0.78$ [kN]	14 [cm]	153.86 [cm ²]	40.39 [kg]
	$V = 0.12$ [kN]			
	$M = 0.61$ [kNm]			

TABLE IV.3 – Dimensionnement des éléments sans prise en compte du vent sur le portique.

On constate que les efforts sont bien diminués. Cependant, les dimensions de la structure restent identiques. L'absence de différence de section s'explique par les critères utilisés, notamment le critère de sensibilité au flambement pour la colonne qui devient le plus dimensionnant.

En analysant les taux de travail de ce cas, disponibles sur le tableau IV.4, un élément supplémentaire s'en dégage. En ignorant le critère sur l'indice de flambement, le poteau pourrait en réalité être légèrement plus petit avec un diamètre de 13[cm]. C'est alors le critère de la flèche qui sera dimensionnant.

Élément	Critère	ϕ (avec vent)	ϕ (sans vent)
Poutre			
	Effort tranchant	0.17	0.04
	Flexion biaxiale	0.04	0.14
	Flèche (L/300)	0.94	0.73
Critère dimensionnant	Flèche	0.94	0.73
Colonne			
	Compression	0.005	0.005
	Effort tranchant	0.05	0.01
	Flexion	0.26	0.14
	Flèche (L/300)	0.98	0.54
	Flambement	0.11 et $\lambda = 200$	0.11 et $\lambda = 200$
Critère dimensionnant	Flèche/Flambement	0.98	$\lambda = 200$

TABLE IV.4 – Taux de travail par critère pour la poutre et la colonne.

Les résultats obtenus ci-dessus, montrent que la prise en compte du vent sur le portique aura bien un impact sur les efforts internes de ce dernier. Il est donc important de prendre ces effets en compte lors du dimensionnement, d'autant plus que l'impact sur les sections est relativement faible pour un module de deux panneaux.

Maintenant que les dimensions de la structure sont connues, le poids de cette dernière peut être pris en compte afin de déterminer les efforts adimensionnels. Ceci permet d'obtenir le résultat visible à la figure IV.2 :

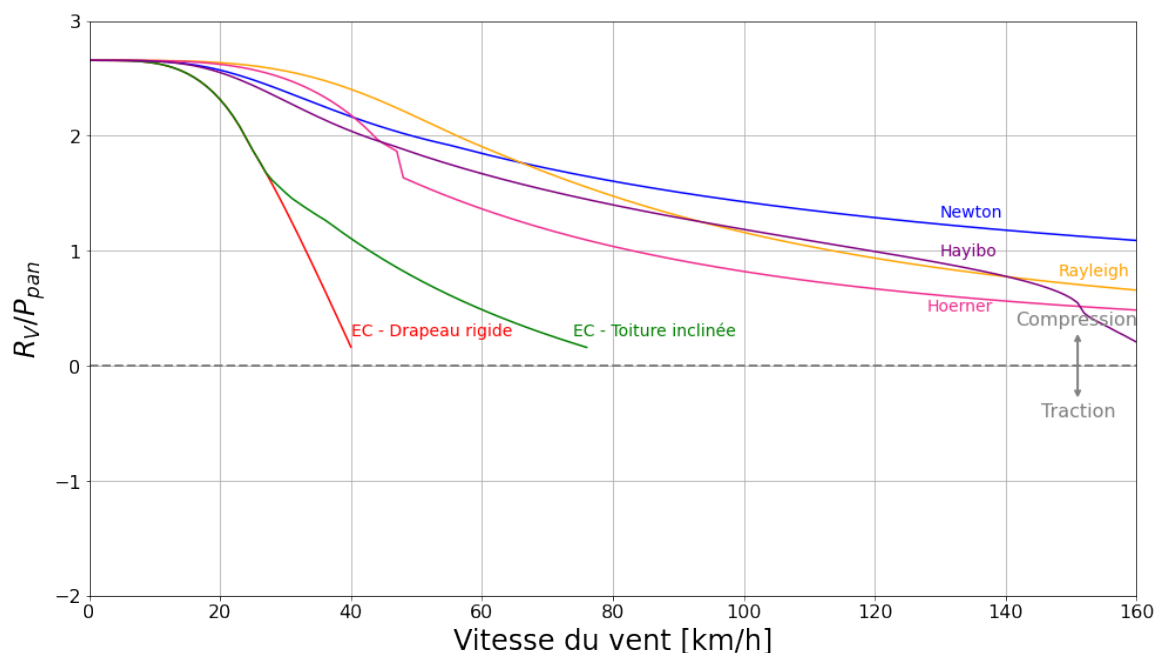


FIGURE IV.2 – Réactions verticales adimensionnelles, poids de la structure pris en compte.

On peut voir que comme pressenti, l'ajout de ballast n'est pas nécessaire car le poids de la structure compense les efforts de traction générés par le vent.

14.2 Fiche minimale de la structure

Afin de déterminer la profondeur à laquelle les poteaux de la structure doivent être enfoncés, nous allons utiliser les modèles classiques de la géotechnique utilisé pour déterminer les dimensions des pieux courts. (Rattez, 2023b) Nous utiliserons les formules de Broms et Brinch-Hansen (Hansen, 1961) qui sont présentées ici :

$$V_{res} = \frac{1}{2} \cdot \gamma \cdot L^2 \cdot D \cdot K_p \quad M_{res} = \frac{1}{6} \cdot \gamma \cdot L^3 \cdot D \cdot K_p \quad (\text{IV.2})$$

Où :

- M_{res} : Le moment résistif du poteau
- V_{res} : L'effort tranchant résistif du poteau
- $K_p = \tan(45 + \phi/2)^2$: Le coefficient de poussée passive du sol
- c, ϕ et γ : Les paramètres du sol
- L : La fiche d'un poteau
- D : Le diamètre d'un poteau

Nous pouvons maintenant réécrire les deux formules sous la forme suivante :

$$L_V = \left(\frac{2 \cdot V_{max}}{\gamma \cdot D \cdot K_p} \right)^{\frac{1}{2}} \quad L_M = \left(\frac{6 \cdot M_{max}}{\gamma \cdot D \cdot K_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{IV.3})$$

Et donc, la profondeur à laquelle sera enfoncé le poteau est $L_{fiche} = \max(L_V, L_M)$. Avant de pouvoir la déterminer, il faut d'abord définir les paramètres du sol. Pour cela, nous utiliserons les paramètres d'un sol limoneux, typique de la région autour de laquelle le prototype sera installé. Ces valeurs moyennes sont définies par l'annexe Belge de l'Eurocode 7 (Bureau de Normalisation (NBN), 2022) comme étant :

- $c = 25[kPa]$: La cohésion du sol
- $\phi = 25[^\circ]$: L'angle de frottement du sol
- $\gamma = 18[kN/m^3]$: Le poids volumique du sol

Nous pouvons maintenant déterminer $K_p = \tan(45 + 25/2)^2 = 2.464$.

Finalement, nous obtenons :

$$L_V = 0.454[m] \quad L_M = 1.024[m]$$

Dont nous retenons la profondeur minimale à laquelle les poteaux du portique doivent être enfoncés, à savoir :

$$L_{fiche} = \max(L_V, L_M) = 1.024[m]$$

14.3 Plan de la structure

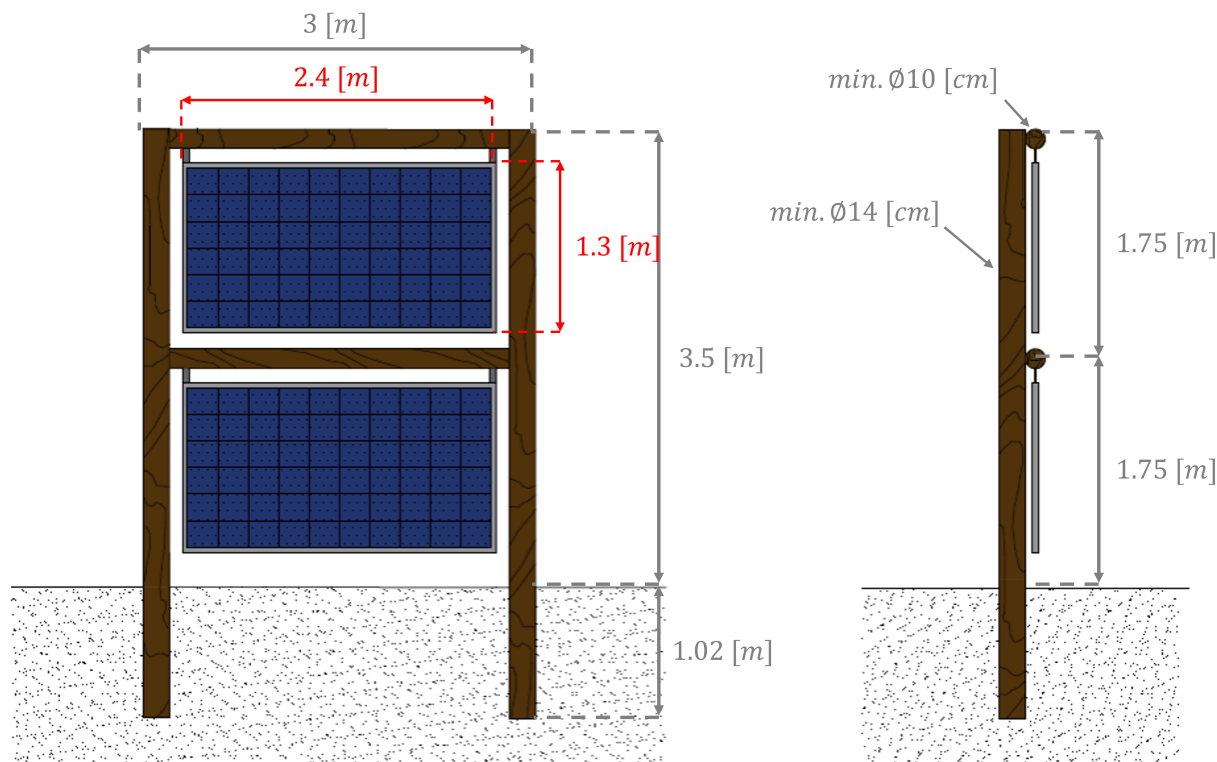


FIGURE IV.3 – Plan d'un module de deux panneaux utilisés pour le prototype.

15 Conception du prototype

Maintenant que les dimensions des membrures d'un module à deux panneaux ainsi que la profondeur de la fiche sont connus, nous pouvons désormais nous intéresser aux détails qui composent la structure. Cette étape, cruciale à la bonne tenue de la structure, nécessite plusieurs niveaux de détails. Premièrement, les assemblages bois-bois qui permettent de relier les membrures entre elles. Ensuite, ce sont les différentes méthodes de fixation des panneaux PV à la structure qui nous intéresseront. Et enfin, c'est le traitement spécifique apporté au bois, notamment pour sa longévité, qui fera l'objet d'une partie détaillée.

15.1 Assemblages bois-bois

Concernant les assemblages bois-bois, ces derniers doivent remplir deux objectifs. Premièrement, ils doivent permettre la connexion des poutres aux colonnes à la manière d'un appui rotulé. Ensuite, ces assemblages doivent également permettre à deux modules d'être interconnectés. Pour ce faire, les assemblages doivent permettre de fixer deux poutres sur une même colonne. Pour ce deuxième objectif, les poutres sont disposées de chaque côté du poteau afin d'équilibrer les charges. Nous avons donc la configuration suivante :

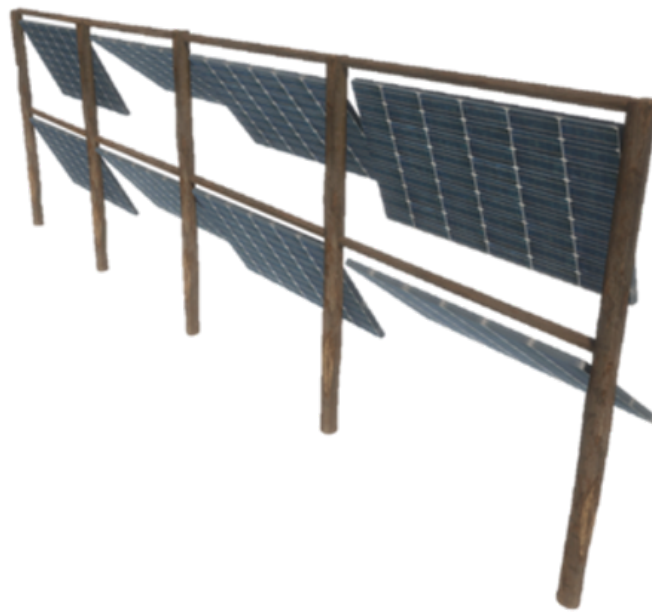


FIGURE IV.4 – Exemple de structure libre. ©B. Dardenne

La solution la plus simple pour réaliser cet assemblage est l'utilisation d'une tige filetée sur laquelle sont assemblées des rondelles et des écrous de chaque côté. Ceci permet aux membrures d'être coincées entre les rondelles et d'appliquer une légère pression sur le bois, limitant tout déplacement parasite.

La longueur de la tige filetée dépend des dimensions des membrures sélectionnées, mais celle-ci ne doit pas être plus petite que $39[cm]$ afin de permettre le passage de deux poutres, une colonne et les écrous et rondelles de chaque côté tels que visible à la figure IV.5.

Concernant le diamètre, un bref dimensionnement, selon les normes et méthodes d'application, (Latteur, 2024) permet d'obtenir que la tige filetée peut être d'un diamètre inférieur à $4[mm]$. Cependant, au vu des dimensions standards utilisées dans la construction et de l'usage de cette structure, un diamètre minimal de $8[mm]$ est recommandé. Cet assemblage est visible sur la figure IV.5 :

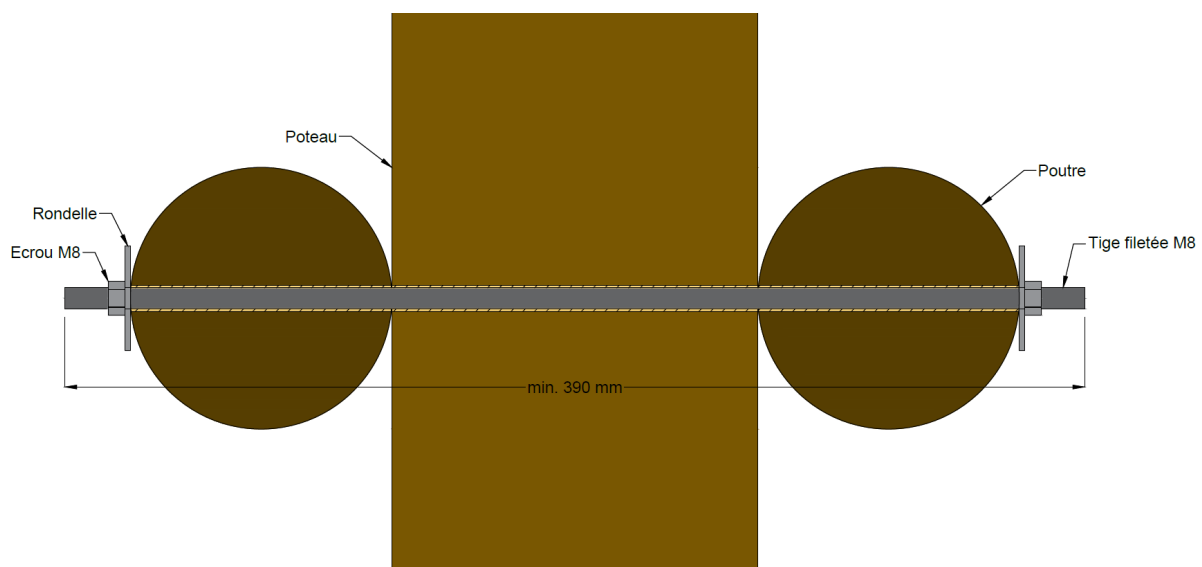


FIGURE IV.5 – Illustration de l'assemblage poteau-poutres.

15.2 Assemblages panneaux-portique

Les assemblages panneaux-portiques permettent aux panneaux photovoltaïques d'être fixés à la structure. Pour ce faire, une infinité de systèmes est possible. Cependant, seuls deux ont été retenus, notamment pour leur polyvalence et facilité d'installation. Ces deux systèmes sont un assemblage dit "à câble" et un second, qui se compose d'une rotule mécanique.

Ces deux systèmes ont le même objectif, permettre au panneau d'osciller librement au gré du vent en limitant le moins possible l'oscillation pour que le fonctionnement du système soit le plus proche possible de la théorie.

15.2.1 Assemblage à câble

La meilleure manière de décrire le fonctionnement du mécanisme des panneaux oscillants est de l'imager en décrivant son fonctionnement comme étant semblable à du linge qui sèche sur une corde au vent. C'est de cette représentation qu'est venue l'idée de cet assemblage. L'idée de l'assemblage dit "à câbles" est de suspendre un câble métallique entre les poteaux d'un module et d'y fixer solidement le panneau. Ainsi, le panneau est libre d'osciller, tout en entraînant avec lui la rotation du câble qui, grâce à sa rigidité torsionnelle, amortira légèrement les chocs et les vibrations lors du mouvement.

Les intérêts de limiter les chocs et vibrations sont multiples. Cela permet notamment de protéger le panneau photovoltaïque qui pourrait, à long terme, s'abîmer à cause des vibrations dues au vent, notamment par des microfissures qui diminueraient les performances. (Shen et al., 2024)

Le système est composé d'un câble tendu sous les poutres, fixé de part et d'autre aux colonnes à l'aide d'un piton à œil vissé sur une tige filetée traversant chaque colonne. Le câble est tendu à l'aide d'un tendeur à vis disposé d'un côté du panneau PV.

Le panneau est fixé sur le câble à l'aide d'une cornière métallique. Cette cornière est vissée d'un côté sur la tranche du panneau à même le cadre et de l'autre, elle possède deux serre-câbles traversant directement la cornière et permettant de fixer directement le câble à la cornière. Le câble utilisé pour cet assemblage est un câble classique en torons de 4[mm] de diamètre. Le plan complet de l'assemblage est disponible en annexe B. La figure IV.6 en montre un extrait qui permet de mieux visualiser l'assemblage :

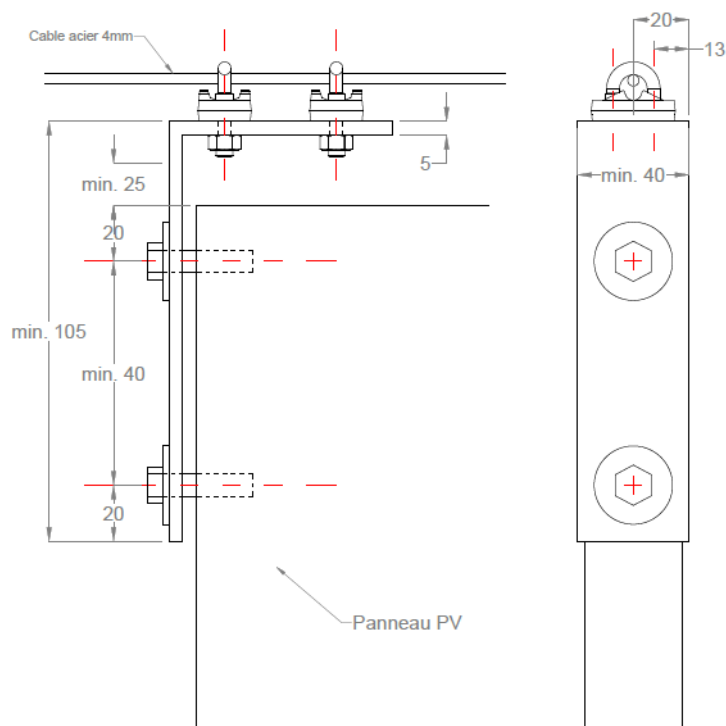


FIGURE IV.6 – Système de fixation "à câbles".

Lors de la réalisation de cette pièce au laboratoire, aucun problème spécifique n'a été noté. L'assemblage est assez simple, seule la réalisation des percements peut poser un problème. Ceci pourrait être réglé en réalisant un gabarit de perçement adaptable selon le format de cornière utilisé. Afin d'avoir assez de place pour accéder aux fixations et autre, une cornière de $150 \times 100 [mm]$ est recommandée, mais des dimensions plus petites peuvent être utilisées (comme montré sur la figure IV.6).



FIGURE IV.7 – Assemblage à câbles installé sur prototype.

15.2.2 Assemblage à rotule

Première version

Pour cette première version, nous allons utiliser un système de rotule mécanique. Celle-ci se compose, au niveau du pivot, d'une chape mécanique d'une part et de l'autre un plat métallique percé en son milieu afin de permettre une rotation. Le but de cet assemblage est d'avoir un vrai mécanisme de rotule et de limiter au mieux la rigidité de l'ensemble. Bien que ce système n'offre pas une rotation aussi parfaite qu'un système de roulement, il permet néanmoins une grande solidité et longévité.

Le plan de ce mécanisme, disponible en annexe B, peut-être synthétisé par les détails suivants (extrait du plan complet) figure IV.8 :

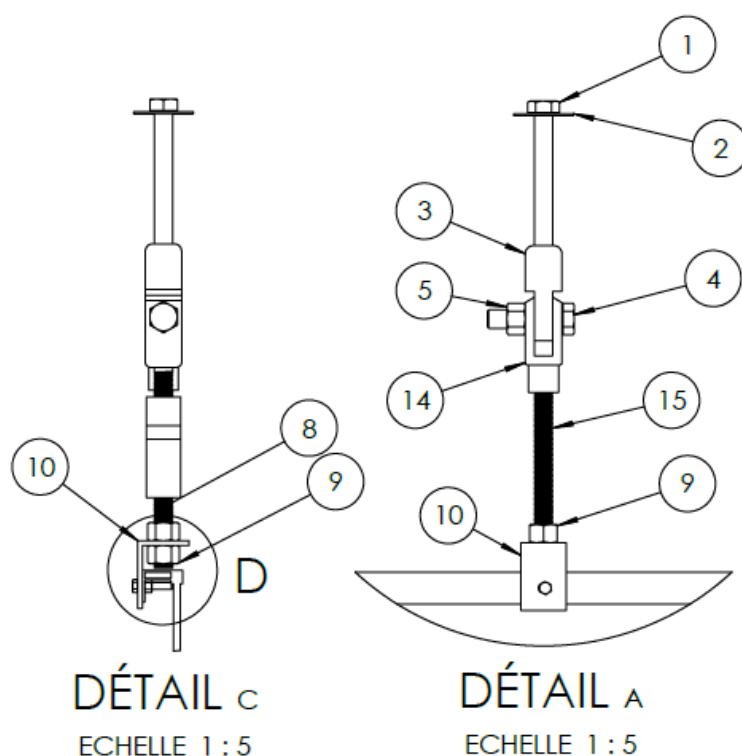


FIGURE IV.8 – Extrait du plan des rotules mécaniques.

Le plat percé est situé coté poutre, il est soudé à une longue tige filetée qui traverse la poutre de part et d'autre et qui est ensuite boulonnée en son sommet. Sous le plat percé, on retrouve la chape boulonnée à une tige filetée, elle-même boulonnée à une cornière métallique. Cette cornière métallique est à son tour percée, permettant la connexion avec le cadre en aluminium du panneau photovoltaïque.



FIGURE IV.9 – Système de rotule mécanique installé sur le prototype.

Seconde version

Cette seconde version de l'assemblage rotulé a été réalisé par Benjamin Dardenne. Elle est la suite de la première réalisée par mes soins.

À l'inverse de la première version qui se fixait sur une fine partie de la tranche supérieure du panneau, cet assemblage tire profit de l'entièreté de la longueur, et donc de la rigidité, des tranches latérales du panneau. Pour ce faire, une latte métallique est boulonnée tout le long du panneau à l'aide de boulons M4 et l'ensemble est ensuite suspendu par une cornière placée sur le haut de la latte à l'aide du système de rotule que présenté précédemment.

Cet assemblage présente de nombreux avantages vis-à-vis de la première version, notamment en tirant parti de la rigidité de l'ensemble du cadre. Ceci permet donc de diffuser les efforts au travers de l'ensemble de la structure métallique, diminuant ainsi les contraintes et donc l'usure. Cet assemblage est représenté sur la figure IV.10 :

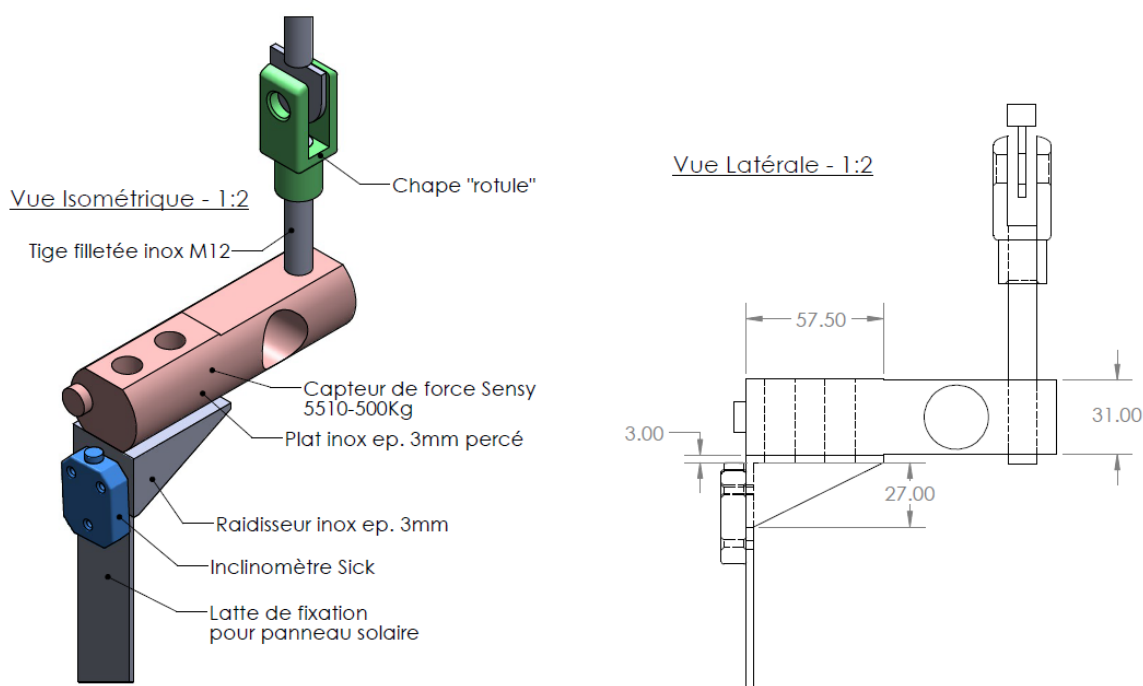


FIGURE IV.10 – Plan du système d'assemblage complet équipé d'un capteur de force et inclinomètre.
©B. Dardenne

15.3 Traitement spécifique du bois

Étant donné que nous utilisons du bois brut, à savoir non-écorcé, quelques mesures sont à prendre en compte lors de la préparation du bois. Tout d'abord, l'écorce doit rester la plus intacte possible, cette dernière permettant de protéger naturellement le bois.

Cependant, afin de pouvoir être enfoncés dans le sol, les poteaux ont besoin d'être retravaillés. Ce travail consiste en la taille d'une pointe permettant au poteau de pénétrer plus facilement le sol. Cette taille pose un problème, en effet, le bois est nu et se retrouve directement en contact avec le sol dans lequel ce dernier est enfoncé. En contact direct avec le sol, la durée de vie du bois est réduite. Pour un bois feuillu comme utilisé dans le cadre de ce mémoire, du chêne par exemple, la durée de vie au contact du sol est, selon houtinfobois.be¹, limitée entre 10 et 15 ans. Or, l'objectif de la structure est de pouvoir tenir au minimum 20 ans en place sans nécessité de remplacer les éléments.

Afin de résoudre ce problème, un traitement de surface va être appliqué sur le bois taillé afin de le protéger. Il s'agit d'un enduit bitumineux qui empêchera le contact entre l'eau du sol et la fibre du bois. L'enduit utilisé dans le cadre de ce prototype est un enduit naturel à base de goudron de pin, obtenu par pyrolyse du bois de pin². Cet enduit a l'avantage d'être naturel et non toxique pour les sols, le rendant ainsi compatible avec la culture agricole et l'élevage.

Il est appliqué au rouleau ou au pinceau directement sur le bois taillé sans préparation de support nécessaire. Par souci de sécurité, il est recommandé de couvrir l'entièreté de la surface en contact avec le sol ainsi qu'au minimum une dizaine de centimètres en surface pour protéger le bois de l'humidité venant de la végétation ou du ruissellement. Un exemple est visible sur la figure IV.11 :

1. <https://www.houtinfobois.be/essences/chene-deurope-et-damerique/>

2. <https://www.protection-traitement-bois.fr/traitement-bois-exterieurs/238-lacq-goudron-suedois.html>



FIGURE IV.11 – Poteaux taillés et enduits.

15.4 Instrumentation du prototype

Le prototype réalisé dans le cadre de ce mémoire a deux objectifs. Premièrement, étudier le système global de la structure en analysant les fixations ainsi que la partie mécanique de la structure, ce qui permettra d'obtenir un bon nombre d'informations utiles.

Le second objectif de ces prototypes est la prise de mesures. Celle-ci se fait au travers de plusieurs capteurs disposés sur la structure et sur les panneaux. Étant donné les contraintes auxquelles nous avons dû faire face durant la réalisation de ce mémoire, seul un prototype a été analysé. Nous avons disposé les différents capteurs sur le prototype dont le système de rotules est mécanique.

L'instrumentation du prototype a été rendue possible grâce à l'aide du LEMSC, plus particulièrement d'Alex Bertholet et Antoine Bietlot

15.4.1 Type de capteurs utilisés

Nous utilisons ici quatre types de capteurs. À savoir, plusieurs capteurs de forces, des inclinomètres, une anémo-girouette et le contrôleur de charge qui permettra de capter la production en électricité des panneaux.

Les **capteurs de forces** sont placés au niveau de chaque rotule afin de reprendre l'entièreté des efforts transmis du panneau à la structure. Ils sont placés sur la tige fileté traversant la poutre et fixés à la rotule de l'autre côté. Ce capteur est un "Capteur de pesage en cisaillement - 5510" de la marque Sensy.

Les **inclinomètres** sont placés sur la tranche des panneaux, solidement fixés au cadre en aluminium du panneau. Ils permettent de connaître de manière précise l'angle du panneau et donc d'en récupérer les données. Cet inclinomètre est fabriqué par la société SICK, le modèle est le "TMS/TMM22".

L'**anémo-girouette** dont le modèle est le "Vantage Pro2™" à deux fonctions, celle d'anémomètre, qui mesure la vitesse du vent, ainsi que celle de girouette, qui permet de donner la direction du vent. Ces informations sont précieuses dans l'analyse du comportement de la structure, car elles permettent d'établir un lien entre toutes les données prises par les autres capteurs via la vitesse du vent.

Enfin, le **contrôleur de charge**, un MPPT 100|50 de la marque Victron Energy, qui permet de "lisser" le courant fourni par les panneaux afin de l'envoyer dans les batteries. Ceci permettra à l'ensemble du système de prise de mesures d'être 100% autonome, car la batterie sera alimentée par les panneaux. Le système n'aura donc pas besoin de source d'alimentation externe, ce qui est un avantage non négligeable au vu de la localisation du prototype. Ce contrôleur permettra également de mesurer la production énergétique des panneaux.

15.4.2 Schéma d'installation

Le schéma de l'installation électrique du système d'acquisition de donnée, fourni par Benjamin Dardenne, est présent à la figure IV.12

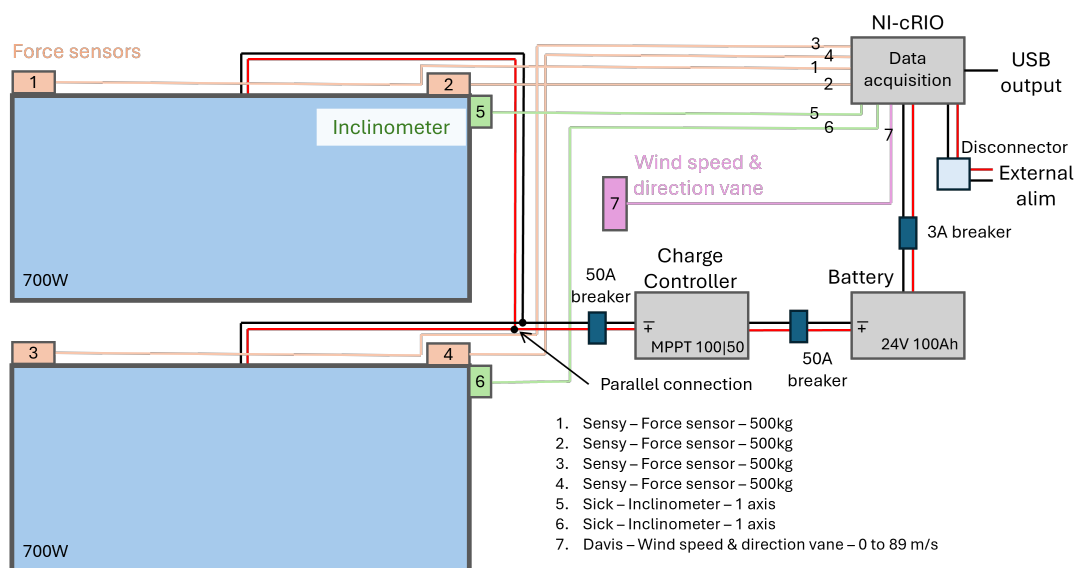


FIGURE IV.12 – Schéma électrique du système d'acquisition du prototype. ©B. Dardenne

On y retrouve respectivement, en bleu, les panneaux photovoltaïques, en gris, les différents composants techniques et enfin les câbles.

Au niveau production électrique, les panneaux renvoient directement leur production au boîtier MPPT, relié à la batterie. L'ensemble du système est protégé par des disjoncteurs 50A. Ce système a pour but de maintenir le niveau de charge de la batterie qui permet d'alimenter l'ensemble du système d'acquisition.

Les différents capteurs sont quant à eux reliés à un boîtier d'acquisition de la marque "National instruments", plus précisément le modèle CompactRio (appelé NI-cRIO sur le schéma). Ce boîtier est alimenté en 24V directement par la batterie et enregistre l'ensemble des données sur une clé USB. En cas de problème avec la batterie ou encore pour des tests ou autre, une alimentation externe est disponible, permettant au système de fonctionner sur secteur en transformant le courant de 220V en 24V.

16 Installation du prototype

16.1 Localisation

Le prototype réalisé dans le cadre de ce mémoire est placé dans une prairie appartenant à l'UCLouvain, située à Chaumont-Gistoux. Ce site de l'université est appelé la "Ferme de Corroy". Cette ferme

sert notamment à de nombreuses expérimentations sur le monde agricole, notamment autour du sujet de l'élevage ainsi que l'alimentation des bovins et ovins. Elle dispose, entre autres, d'une prairie parfaitement située pour l'installation d'un prototype tel que celui-ci. Loin de la végétation et des habitations, la ferme dispose d'une prairie située en hauteur et exposée aux vents. Cette situation est idéale pour soumettre le prototype aux efforts de vents les plus intenses possibles.

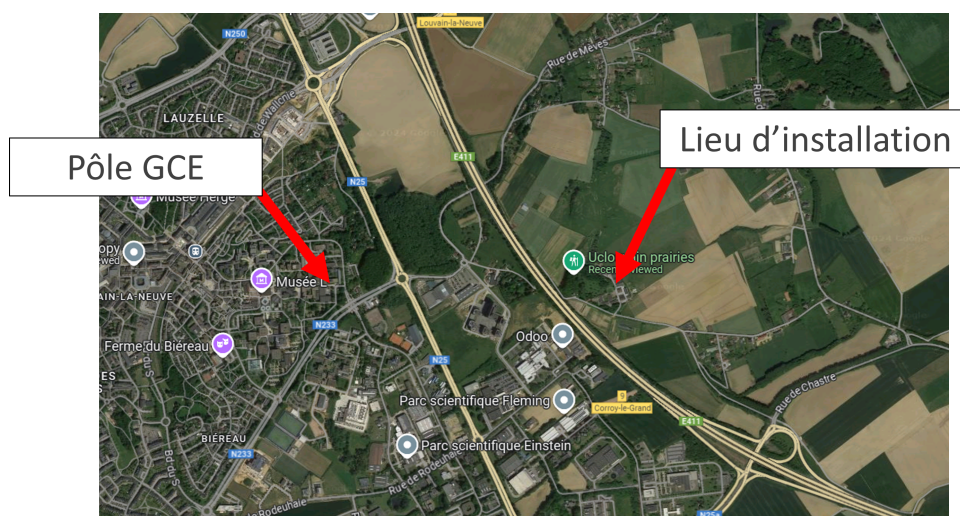


FIGURE IV.13 – Lieu d'installation des prototypes.

Afin de correspondre à l'utilisation de ce type de structure, le prototype sera placé sur un axe nord-ouest, le rendant ainsi exposé majoritairement aux vents venant du sud-ouest et du nord-est, dominants en Belgique comme nous avons pu le voir au travers de la sous-section 4.1. Cette disposition, ainsi que la situation géographique du prototype, en font un exemple parfait d'efforts types qu'une telle structure subira au cours de sa durée de vie. Plus précisément, le prototype sera placé sur l'axe 315°N.

Le prototype installé à la ferme de Corroy a été réalisé en deux phases, une première fin novembre 2024 et une seconde début juin 2025. Ce sont ces deux versions qui seront ensuite détaillées.

16.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la réalisation des prototypes viennent de diverses sources.

Pour ce qui est du bois, les grumes ont été prélevées dans des arbres tombés au sol. Ces grumes proviennent en partie du bois de Lauzelle, propriété de l'UCLouvain ainsi que du Bois du Baron situé à Anderlues. Les panneaux photovoltaïques, quant à eux, sont la propriété de la faculté d'agronomie "Gembloux Agro-Bio Tech" de l'ULiège. Le reste de la quincaillerie et des pièces métalliques utilisées pour la construction du prototype ont été fournies par le LEMSC de l'UCLouvain.

16.3 Première version du prototype

La première version du prototype se composait d'un seul module simple, dépourvu d'instrumentation. Ce dernier était destiné dans un premier temps à tester le système de panneau oscillant avant d'être instrumenté plus tard.

Le module se compose de deux panneaux, dont l'oscillation est rendue possible par la première version du système de rotule mécanique présenté dans la sous-sous-section 15.2.2.

Afin d'installer la structure portante, un minimum de deux personnes est nécessaire. En plus de cela, une liste de matériel est nécessaire (voir ci-après) parmi laquelle il faut idéalement compter une tarière, afin de réaliser un trou permettant d'enfoncer partiellement le poteau dans le sol, ainsi qu'un chariot télescopique, ou autre engin agricole ou de construction, pourvu d'un bras (ex. chargeuse, pelle,...).

La liste suivante présente de manière non exhaustive le matériel nécessaire à la mise en place d'un module. Cette liste fait exception des éléments essentiels tels que les panneaux PV, les éléments structurels, la quincaillerie, etc... :

- Échelle
- Perceuse
- Mèches à bois adaptées à la quincaillerie
- Sangles
- Marteau
- Pelle
- Clés et outils pour la quincaillerie
- Scie à bois
- Scie à métaux

Les figure IV.14 montrent le prototype durant sa réalisation ainsi que quelques jours après son installation.



(a) Construction du prototype.



(b) Prototype fini.

FIGURE IV.14 – Première version du prototype.

16.3.1 Problèmes rencontrés

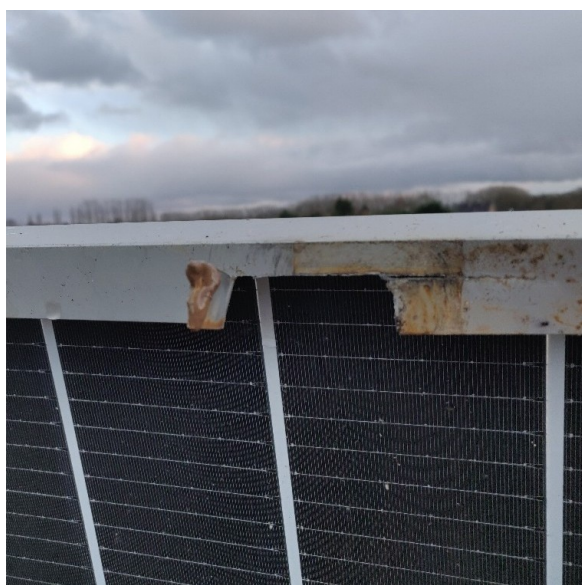
Plusieurs informations pertinentes sont à noter après l'analyse de ce premier prototype. Premièrement, dans les quelques jours qui ont suivi l'installation, un tassement du sol au niveau des proches

alentours du poteau a pu être remarqué. Ce dernier est probablement dû au changement du taux d'humidité, dans le sol suite à la fonte de la neige et au dégel présente lors de l'installation. La figure IV.15 montre ce tassement, ayant agi dans un rayon d'environ 5 à 10 [cm] autour du périmètre du poteau.



FIGURE IV.15 – Tassement du sol autour d'un poteau.

Le plus gros problème rencontré lors de cette première phase d'analyse se trouve au niveau des assemblages panneau-portique. Plus précisément, au niveau de l'interface entre le panneau et le système de rotules. Les oscillations fréquentes du système ainsi que les vibrations provoquées par le vent, ont engendré une fatigue au niveau du cadre du panneau PV. L'arrachement du cadre s'est fait des deux cotés du panneau, provoquant la chute de ce dernier. Le second panneau de la structure n'a quant à lui pas subi d'arrachement, mais une amorce de cette usure était clairement visible sur ce dernier.



(a) Coté gauche.



(b) Coté droit.

FIGURE IV.16 – Déchirement du panneau PV. ©B. Dardenne

L'analyse de cet incident nous a mener à la conclusion que les assemblages panneau-portique devaient être retravaillés et repensés. Dans cet objectif, deux assemblages ont été imaginés. Une seconde version de l'assemblage rotulé, imaginé par Benjamin Dardenne et détaillé plus tôt au cours de la figure 15.2.2. Un assemblage à câble, réalisé par mes soins, également présenté plus tôt dans la section 15.2.1.

16.4 Seconde version du prototype

Au vu des problèmes rencontrés avec cette première version du prototype, une révision de ce dernier a été faite. L'assemblage rotulé a été remplacé par sa seconde version, plus solide et un module supplémentaire a été ajouté. Ce second module sera doté du système d'assemblage à câbles.

Afin de permettre la prise de mesure, le module doté de l'assemblage rotulé sera intégralement instrumenté. Ce dernier transmettra les données au système d'acquisition installé dans le coffret électrique placé à côté de celui-ci. Le second module ne sera quant à lui pas instrumenté.



FIGURE IV.17 – Seconde version du prototype en place.

L'installation et le matériel nécessaire pour cette seconde version est identique à la première.

Concernant l'installation du système à câble, celle-ci se fait dans un premier temps par la mise en place de l'œillet qui sert à fixer le câble. Ensuite, le câble, détendu, est placé de part et d'autre du portique en l'attachant à l'aide de manilles. Une fois le câble mis en place, le panneau est suspendu au câble à l'aide des serre-câbles présents sur les fixations. Le panneau étant suspendu, le câble est mis en tension et le panneau est solidement relié à l'assemblage.



FIGURE IV.18 – Photo du système de fixation à câble.

16.4.1 Problèmes rencontrés

À date de la remise de ce mémoire, aucun problème particulier n'a été remarqué au niveau des éléments en bois ou des assemblages. Aucun signe de fatigue ou d'usure précoce n'ont été constaté malgré les sollicitations auxquels la structure a fait face.

Cependant, quelques soucis au niveau de la prise de données ont été constatés. Premièrement, l'acquisition des données liées à la puissance produite par les panneaux photovoltaïques s'est avérée impossible. Le système est tel que lorsque la batterie est chargée à 100%, le système n'enregistre que l'énergie nécessaire au maintien de la charge. Le second problème constaté est plutôt logiciel. Le CompactRio, boîtier d'acquisition pour les données de la structure, a rencontré un problème courant du mois de juillet dû à une saturation de la mémoire interne. Ce problème a causé une perte de données assez importante de plusieurs jours d'intempéries et de vents assez importants. Ce problème a depuis été résolu grâce à la précieuse aide d'Antoine Bietlot du LEMSC.

17 Analyse des prototypes

Au cours de cette section, divers aspects du prototype vont être analysés. Afin d'éviter toute confusion, cette section ne couvrira que l'analyse de la seconde version du prototype, à partir de juin 2025 jusqu'à début août 2025. En outre, la période analysée au cours de la partie "analyse de mesures" se limite aux données prises entre le 17 et le 26 juin 2025, période de l'analyse durant laquelle les efforts de vents mesurés ont été les plus intenses.

17.1 Analyse des mesures

Rappelons tout d'abord les données à notre disposition. Le boîtier d'acquisition, le CompactRio, fournit des fichiers ".csv" qui contiennent les valeurs des différents paramètres. Nous obtiendrons tout d'abord la date et l'heure précise de la prise de mesure ainsi que les mesures de chaque capteur. Ce qui nous permet d'obtenir :

- La vitesse du vent
- La direction du vent
- Les efforts transmis entre chaque panneau et la structure

- L'angle d'inclinaison de chaque panneau

L'ensemble de ces données permettent une analyse complète du comportement du panneau.

Avant de nous intéresser aux informations obtenues et aux relations entre celles-ci, il peut être pertinent d'analyser la réaction du prototype par rapport aux vitesses de vents. Pour ce faire, nous analyserons une petite période datée du 24 juin 2025 entre 10h30 et 11h10.

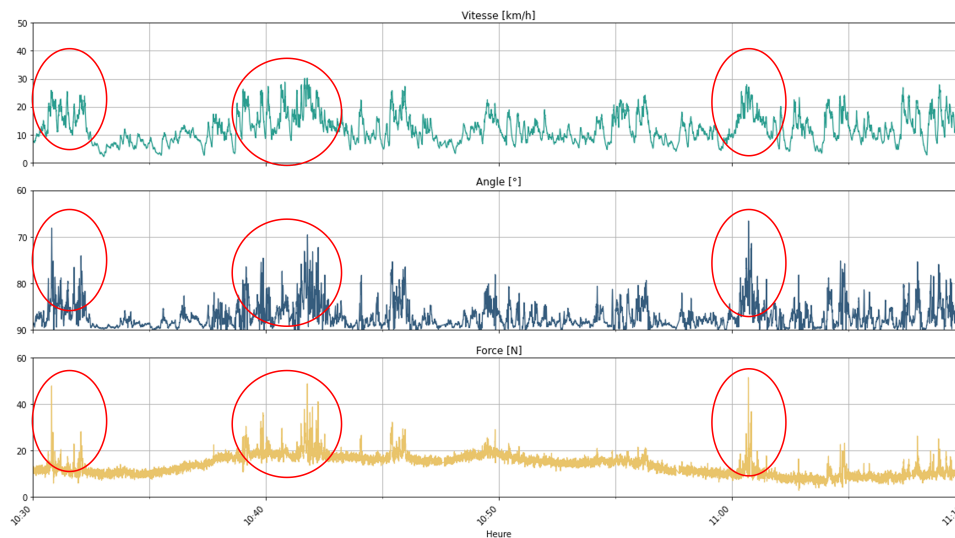


FIGURE IV.19 – Représentation des données de vitesse, angle du panneau et force.

La figure IV.19 montre clairement que la réponse des panneaux est alignée aux efforts provoqués par le vent. Les différents pics marqués sur la figure en attestent pour chaque stimulation causée par le vent, une réponse proportionnelle des panneaux a lieu.

En regardant plus en détails cette comparaison, nous pouvons constater que le délai stimulation-réponse est assez court étant donné que, même sur un graphique à échelle réduite, il n'y a pas de délais visibles. Comme le montre la figure IV.20 :

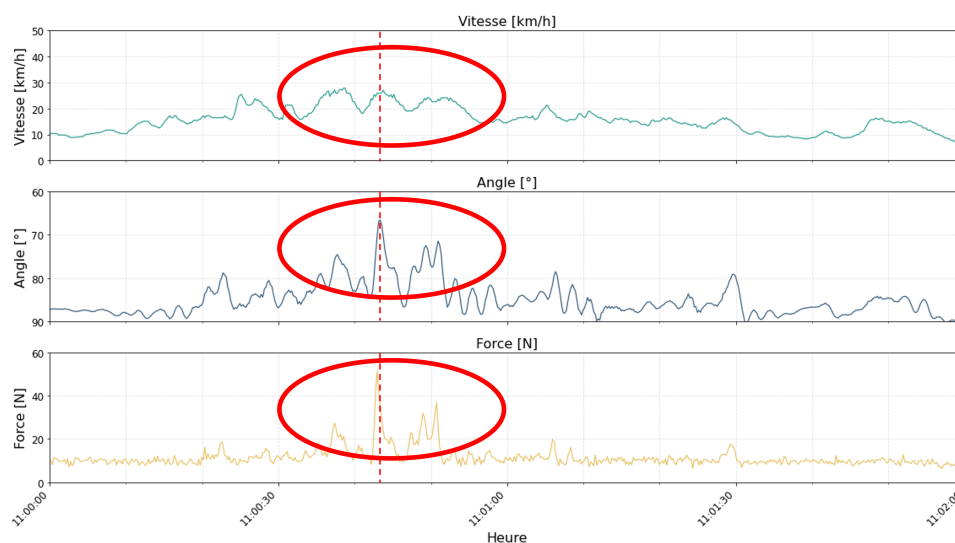


FIGURE IV.20 – Résultats stimulation-réponse sur un intervalle de 2 minutes.

On peut constater ici que pour des vitesses de vents proches, la réaction ne sera pas identique. Cette différence est normale et s'explique simplement par le fait que la direction du vent a changé au cours

de ces quelques secondes, le faisant ainsi agir directement perpendiculairement à la face du panneau, ce qui génère plus d'efforts.

17.1.1 Vitesse et direction du vent

Sur la période concernée par l'analyse, des vitesses de vents allant jusqu'à $51.73[km/h]$ ont été mesurée avec une direction principale venant de $248[^\circ]$. Ce qui correspond à une direction sud-ouest-ouest. Cette direction de vent est pertinente dans le cadre de l'analyse du prototype, car cela signifie que le vent souffle majoritairement face aux panneaux, maximisant ainsi les efforts reçus.

Les données de vent et de direction sont représentée sous forme d'une rose des vents sur la figure IV.21 :

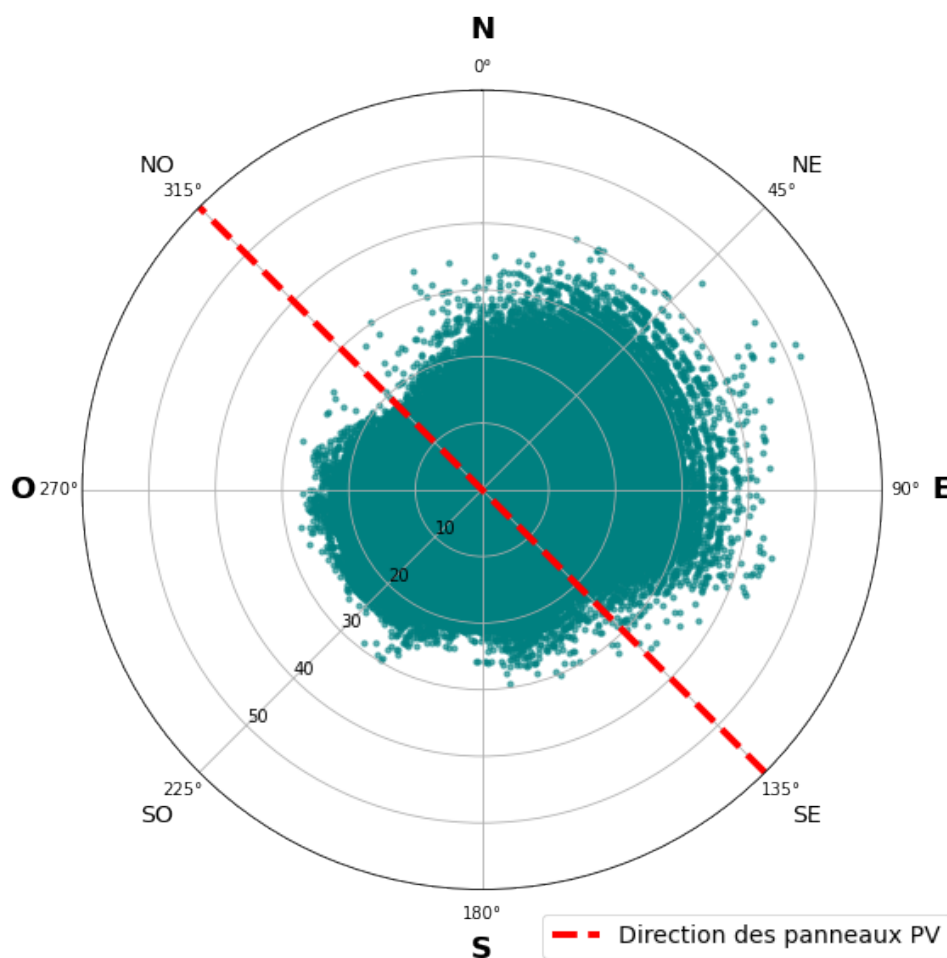


FIGURE IV.21 – Représentation Vitesse - Direction du vent.

On peut voir que, comme attendu, le vent en Belgique provient majoritairement du sud-ouest ou du nord-est. Avec une tendance à des vents plus rapides provenant du nord-est.

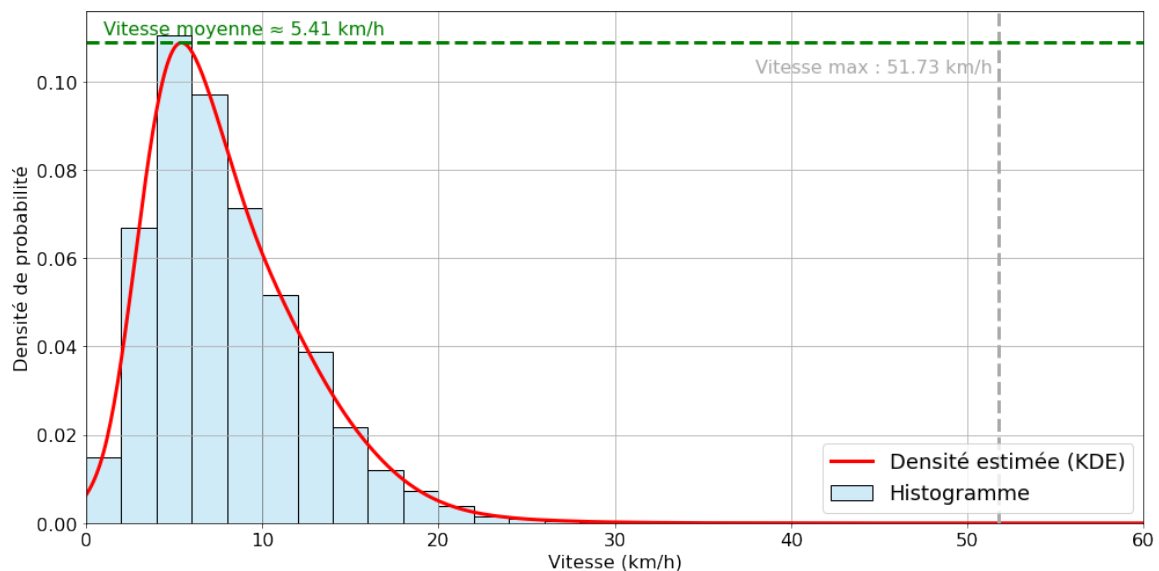


FIGURE IV.22 – Représentation probabiliste des vitesses du vent.

La figure IV.22 montre la répartition probabiliste des vitesses de vents sur la période analysée. Nous pouvons y constater que la vitesse moyenne se trouve aux alentours des $5.5[km/h]$. La plage de vitesse concernée par cet échantillon de mesure étant assez large, elle peut être considérée comme valide pour la suite de notre analyse.

17.1.2 Vitesse du vent et angle du panneau

Afin de pouvoir analyser en détails ces données, il est d'abord important d'en effectuer une représentation brute afin de comprendre comment celles-ci fonctionnent. Nous allons ici utiliser les données fournies par le capteur d'angle du panneau supérieur du module instrumenté. Ce dernier étant plus haut, il subit plus de vent que celui placé proche du sol. Cela permet également de négliger les éventuelles turbulences causées par le sol ou les plantations.

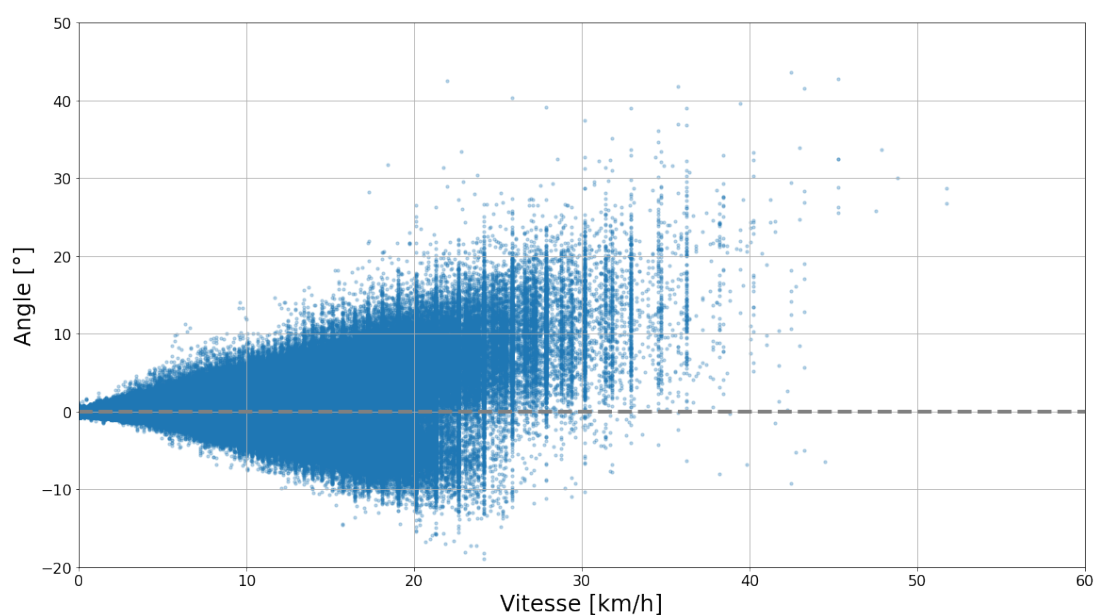


FIGURE IV.23 – Représentation brute des données vitesse-angle.

Ces données indiquent une tendance croissante de l'angle en fonction de la vitesse du vent, ce qui est attendu. On peut également remarquer que des valeurs sont également présentes du côté négatif, ce qui est assez logique étant donné que le vent peut souffler sur une face ou sur l'autre du panneau, sans oublier l'éventuel effet dynamique. Afin de traiter au mieux ces données, la partie négative peut être supprimée sans entraîner de perte d'informations significative.

Une fois ce premier filtre passé, il est intéressant de déterminer la tendance que suivent les données mesurées. Plus précisément, deux courbes sont intéressantes. À savoir, la moyenne du nuage de points ainsi que l'enveloppe supérieure de ce dernier. L'enveloppe supérieure correspond ici au quantile 90% du nuage de points. Ces courbes sont visibles sur la figure IV.24 :

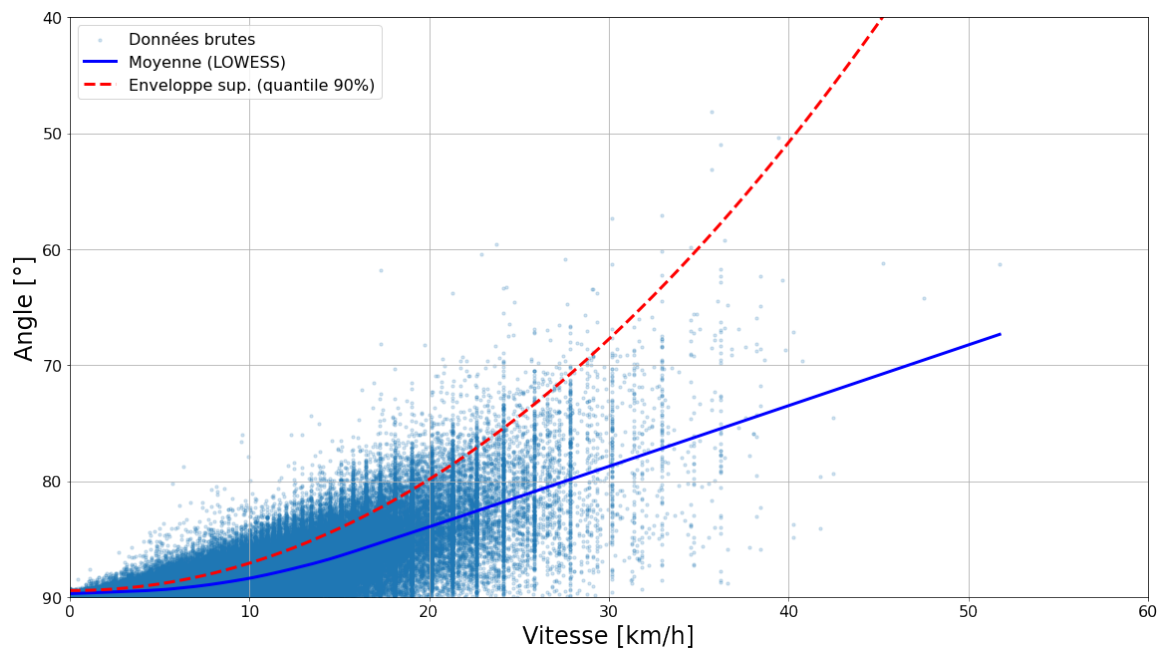


FIGURE IV.24 – Courbe moyenne et enveloppe supérieure.

La moyenne permet de représenter le comportement réel du panneau selon la vitesse du vent. Elle prend en compte les oscillations et variations rapides de vents, ce qui explique la différence avec l'enveloppe supérieure.

L'enveloppe supérieure quant à elle ne représente pas forcément le comportement réel, mais plutôt le potentiel maximum d'angle que pourrait prendre le panneau pour une certaine vitesse. En plus de cela, cette représentation est essentielle pour pouvoir comparer le comportement du prototype aux modèles théoriques. En effet, ces derniers représentent le panneau comme étant stable et ayant une amplitude maximale, ce qui n'est pas le cas une fois que la structure est soumise au vent. Utiliser l'enveloppe maximale permet donc de retenir les amplitudes maximales sans pour autant surévaluer le comportement du panneau. La courbe est représentée par l'équation IV.4

$$\alpha = 89.44 + 0.01 \cdot V - 0.0244 \cdot V^2 \quad (\text{IV.4})$$

La comparaison des résultats avec les modèles théoriques sera faite au cours de la sous-section 17.2.

17.1.3 Vitesse et efforts de vent

Les efforts causés par le vent agissant sur les panneaux sont probablement les données les plus intéressantes à analyser. Ils permettent de définir les contraintes agissant sur les éléments et donc

permettent de définir si le comportement prévu par les modèles théoriques s'avère ou non être corrects.

À nouveau, un nuage de points assez dense est obtenu si l'on analyse directement les résultats bruts. Afin de filtrer cela, des courbes de tendance seront à nouveau utilisées. Premièrement, une courbe représentant la moyenne des efforts transmis à la structure. Et deuxièmement, une courbe donnant l'enveloppe supérieure au quantile 95% qui permet, comme pour l'angle du panneau, de donner un résultat correspondant au comportement proposé par les modèles théoriques. Ces courbes sont visibles sur la figure IV.25 :

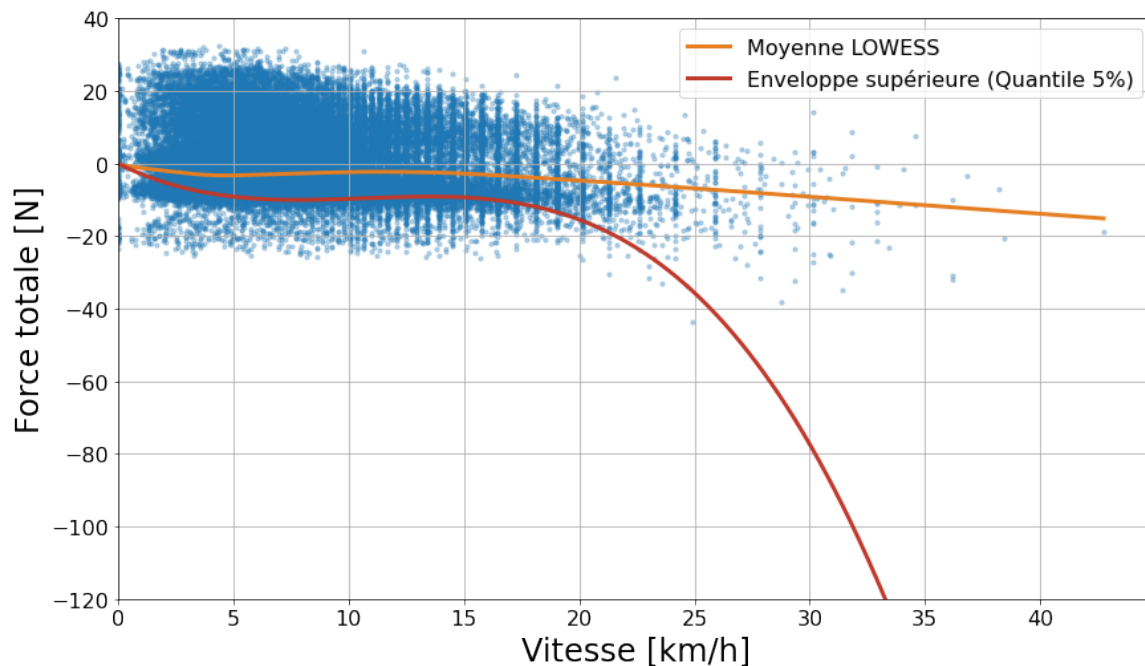


FIGURE IV.25 – Courbe moyenne et enveloppe supérieure.

De ces deux courbes, seule l'enveloppe supérieure sera retenue pour sa pertinence vis-à-vis des données présentées précédemment. Il est également important de rappeler la position des capteurs de force sur la structure. Ces derniers sont placés dans l'axe des rotules mécaniques et fournissent de ce fait la composante de force parallèle à la composante poids du panneau. Il est donc important de prendre cela en compte dans l'analyse des efforts afin de décomposer les efforts mesurés en conséquences.

Une fois cette décomposition des efforts effectuée, le graphique suivant est obtenu :

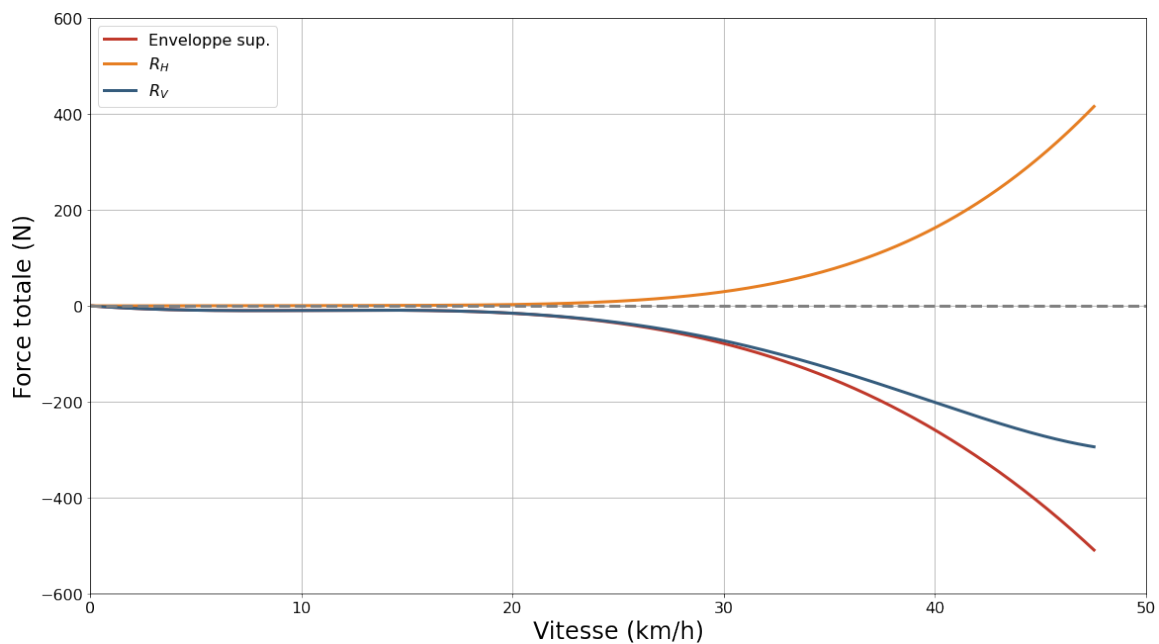


FIGURE IV.26 – Réactions horizontales et verticales.

Cette courbe peut ensuite être passée sous sa forme adimensionnelle, afin de correspondre aux valeurs obtenues précédemment, en prenant soin d'ajouter le poids du panneau pour la composante verticale. Ce qui permet d'obtenir ces courbes :

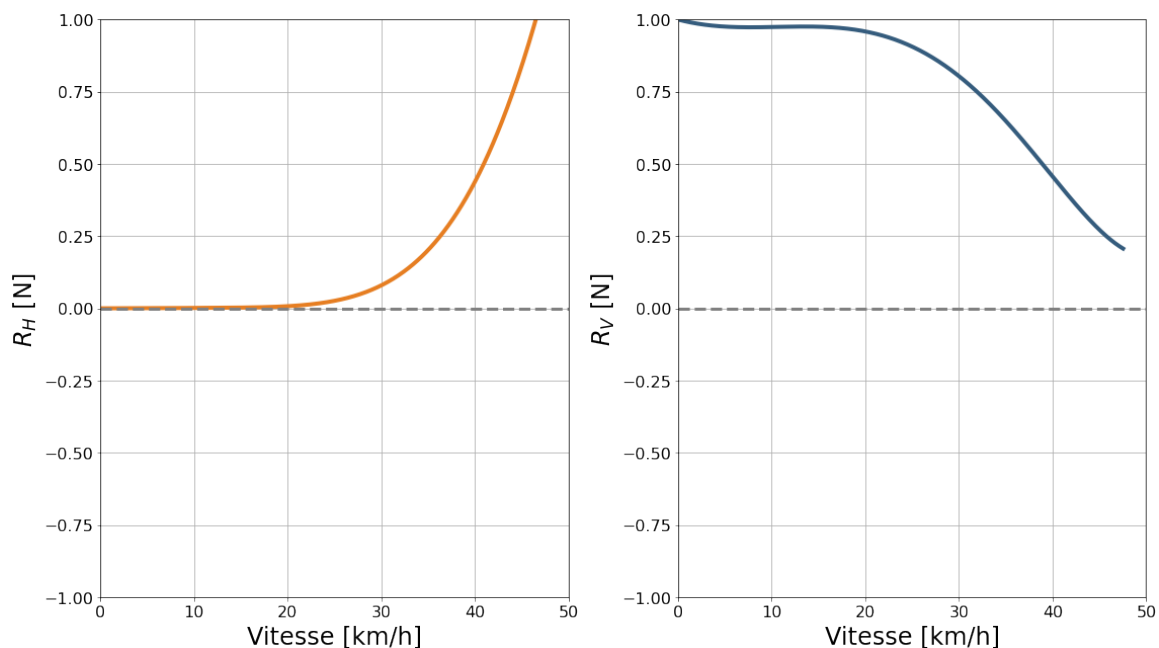


FIGURE IV.27 – Réactions horizontales et verticales adimensionnalisées.

17.2 Interprétation des résultats et comparaison avec les modèles théoriques

Les données présentées précédemment permettent de visualiser au mieux le comportement de la structure. Cependant, le but premier du prototype est de déterminer si les modèles théoriques s'avèrent ou non être précis.

Afin de comparer le comportement du prototype avec le comportement théorique, nous utiliserons le graphique vitesse-angle qui permettra une bonne idée de ce dernier. Nous obtenons la figure suivante :

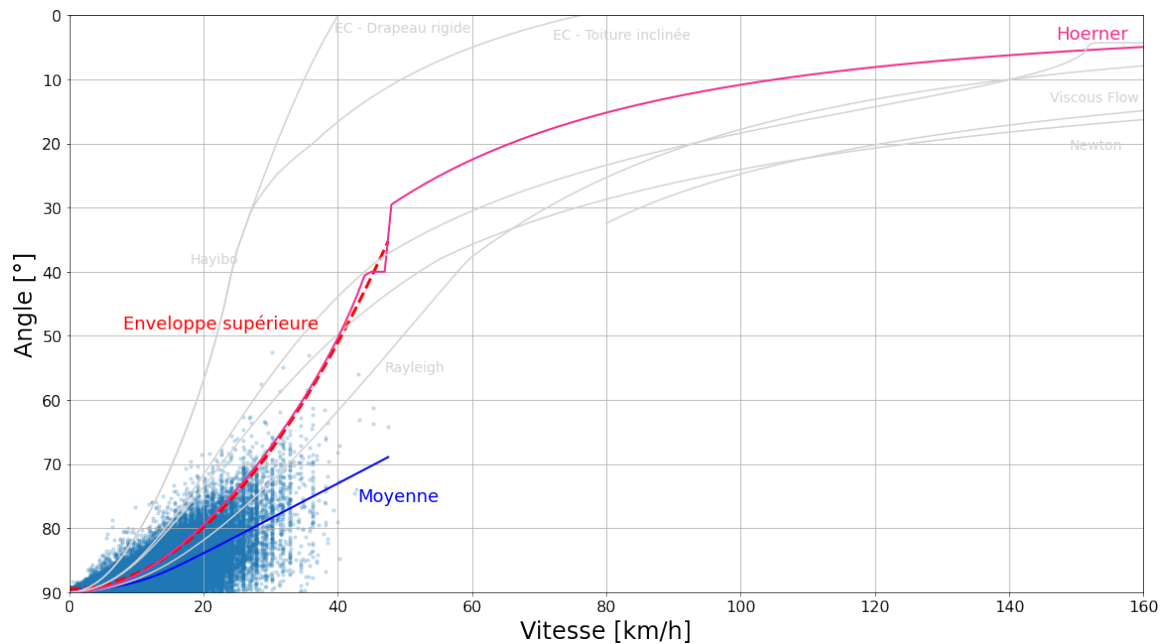


FIGURE IV.28 – Comparaison entre la théorie et les résultats obtenus par le prototype.

La figure IV.28 montre clairement que l'enveloppe supérieure du nuage de points correspond avec les résultats du modèle théorique de Hoerner. On peut voir que la courbe reste identique jusqu'aux limitations des données du prototype. Cette relation n'est pas sans rappeler les résultats obtenus précédemment lors de l'analyse des essais en soufflerie. Visible à la figure figure IV.29 :

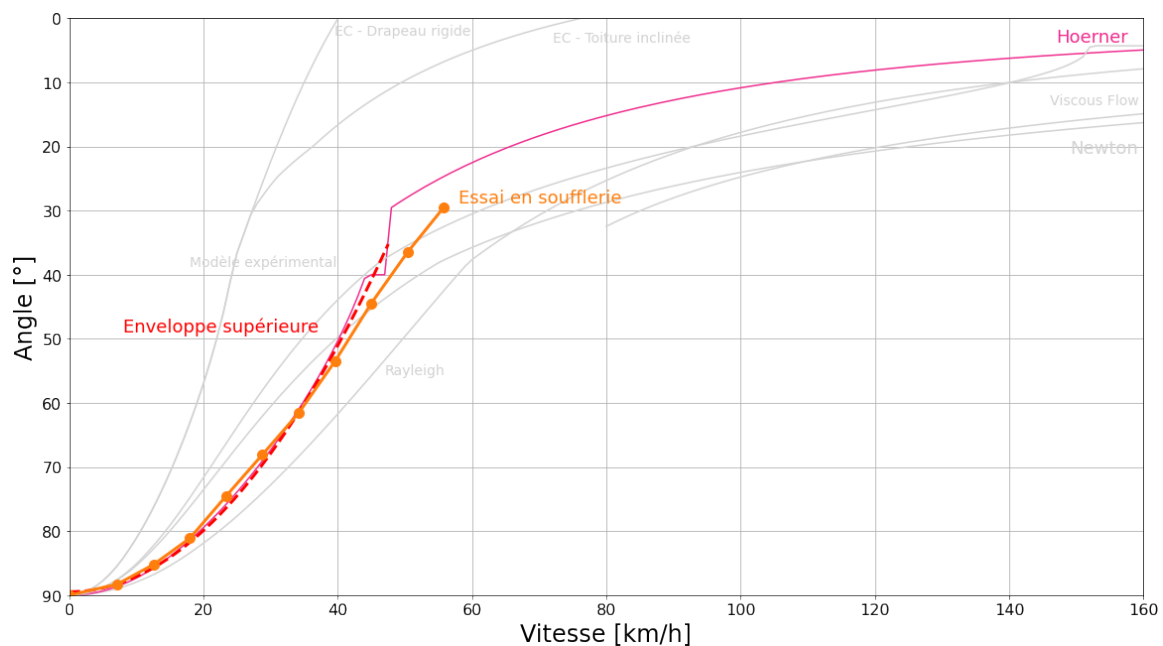


FIGURE IV.29 – Comparaison entre la théorie, l'essai en soufflerie et les résultats du prototype.

Cette figure montre clairement que le modèle de Hoerner est le plus proche des résultats obtenus.

Cependant, la relation alpha-vitesse ne suffit pas en elle-même à justifier l'utilisation d'un modèle plutôt qu'un autre. Afin de confirmer notre hypothèse, nous allons effectuer la même analyse à l'aide des graphiques obtenus pour les efforts.

Tout d'abord, les réactions verticales montrent également une proximité presque parfaite avec le modèle de Hoerner, en témoigne la figure IV.30. Ce qui tend à confirmer l'hypothèse que le modèle de Hoerner peut-être utilisé pour modéliser les efforts agissant sur la structure. Au vu de la tendance de la courbe, si cette dernière était continuée, la tendance serait probablement prolongée.

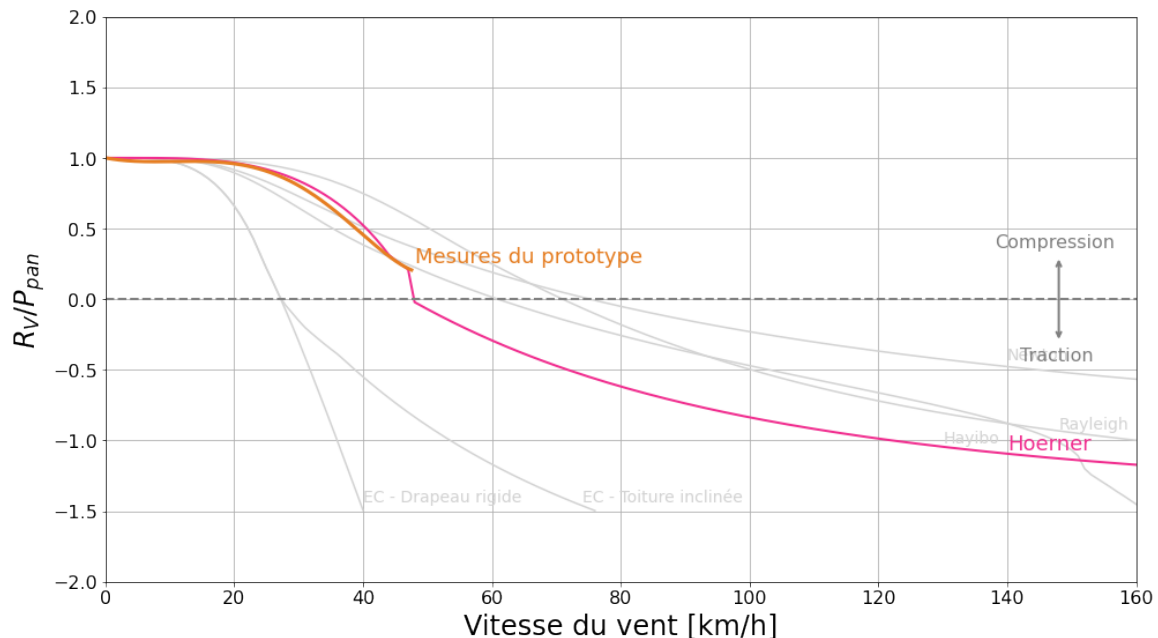


FIGURE IV.30 – Comparaison entre la théorie, l'essai en soufflerie et les résultats du prototype.

Cependant, en réalisant la même analyse avec les réactions horizontales, le résultat obtenu n'est pas aussi probant. En effet, on peut voir que l'enveloppe supérieure (en orange) sur la figure IV.31 que la courbe part complètement au-delà de la limite trouvée plus tôt lors de l'analyse théorique.

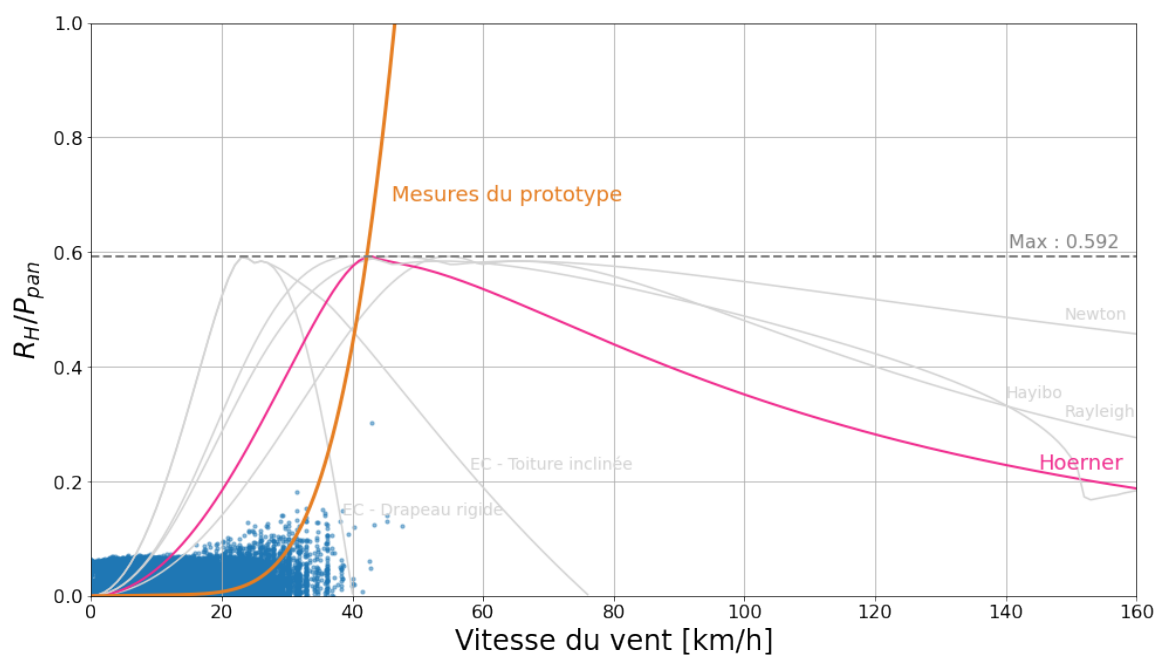


FIGURE IV.31 – Comparaison entre la théorie, l'essai en soufflerie et les résultats du prototype.

Cette augmentation brute est probablement due à une erreur de modélisation et de représentation des données. Cette hypothèse est largement validée par le fait que le nuage de point, se trouve sous la limite de 0.592. Ce qui ressort de cette analyse est que la grande majorité des points du nuage de points se trouvent sous 1/3 du niveau maximum. Nous pouvons constater que les efforts agissant sur la structure seront en réalité plus faibles que ce que les modèles théoriques prévoient. Afin de pouvoir affirmer complètement cette hypothèse, il serait nécessaire de refaire cette analyse avec plus de données, notamment des vitesses de vents plus élevées.

17.3 Analyse structurale

Pour clôturer l'analyse du prototype, il est important d'analyser les différents détails de la structure. Le but de cette sous-section est de déterminer les points d'usure qui sont apparus sur la structure au cours des deux mois écoulés depuis son installation. Les systèmes utilisés pour rotuler chacun des deux modules seront également analysés afin de déterminer quel type de fixation est la plus efficace.

17.3.1 Analyse des points d'usures

Lors de l'analyse de la structure effectuée le 14 août 2025, aucun points d'usure mettant en cause la stabilité de la structure n'a été remarquée. Cependant, quelques détails sont à noter.

Au niveau de la structure, les membrures ne portent aucune trace de fissurations ou de déformations visibles. Elles portent par contre des traces de séchage assez forte avec notamment un soulèvement des écorces le long des poteaux comme montré à la figure IV.32 :



FIGURE IV.32 – Écorces soulevées à cause du bois ayant séché.

Ceci n'est pas réellement un problème, mais l'absence d'écorce pourrait réduire la durée de vie de la structure, l'aubier étant directement exposé.

Les rotules mécaniques ainsi que les serre-câbles présentent quant à eux des traces de rouille visibles. Cependant, tous les éléments présents sur la structure sont en acier inoxydable, on peut donc imaginer que cette corrosion visible est uniquement une corrosion de surface comme le montre la figure IV.33 :



(a) Corrosion sur la rotule mécanique.



(b) Corrosion sur le système à câbles.

FIGURE IV.33 – Traces de corrosion retrouvée sur la structure.

17.3.2 Comparaison des systèmes de fixation

Aucun des deux systèmes de fixation testé sur le prototype ne présente spécialement un avantage sur l'autre. Les deux systèmes sont en bon état et paraissent tous deux être pertinents dans leur utilisation.

Le système à rotule mécanique est pertinent, mais un problème récurrent a été remarqué, la rotule a tendance à pivoter autour de l'axe des tiges filetées, causant une légère déformation de celle-ci. Ceci est probablement dû aux vibrations subies par la structure et pourrait être évité si la rotule était fixée directement au panneau à l'aide d'écrous autobloquant. Ce problème paraît donc être plutôt une conséquence de la présence du capteur de force. La figure IV.34 montre la rotule désaxée :



FIGURE IV.34 – Rotule ayant pivotée.

Le système à câble, quant à lui, ne présente pas de signe d'usure, mais plutôt une tendance à laisser les panneaux osciller moins librement que le système dit mécanique. La rigidité torsionnelle du câble

a tendance à agir comme un frein à l'oscillation, ce qui a tendance cependant à réduire les petits mouvements parasites de la structure, car ceux-ci sont amortis par le câble. Lors des observations réalisées sur le prototype, les panneaux équipés de ce système oscillaient systématiquement moins que ceux équipés du système mécanique et avaient tendance à avoir une amplitude plus faible.

Chapitre V

Discussion

Au fur et à mesure du déroulement de ce mémoire, une série de points ont été abordés, chacun avec leurs propres hypothèses. Au fil de cette section, nous traverserons toute une série d'incertitudes ou de choix qui ont été faits au cours de ce travail.

Le premier sujet de discussion est le fait que la modélisation des efforts a été faite de manière statique. Or, le comportement de la structure est plutôt dynamique étant donné que le vent varie constamment. Ceci dit, l'approche par une analyse statique s'avère être pertinente, notamment au vu des divers résultats obtenus et du comportement du prototype. On peut donc considérer avec assez d'assurance que l'utilisation de modèles statiques telles que présentés au cours de ce travail est bel et bien pertinente.

La prise en compte ou non des efforts de vents s'appliquant directement sur la structure a également fait l'objet d'une étude dont certains points peuvent être remis en cause. Notamment le fait que la modélisation utilisée est extraite des Eurocodes, plus restrictifs que les modèles utilisés pour représenter les panneaux. L'utilisation de modèles plus précis, notamment en déterminant le C_N à l'aide de modèles aérodynamiques par exemples, aurait pu mener à des résultats plus pertinents. Bien que le résultat aurait pu être plus précis, l'idée globale reste la même, les efforts de vent agissant sur la structure doivent être pris en compte, car plus la vitesse augmente, plus ils sont élevés par rapport aux efforts agissant sur le panneau.

L'essai en soufflerie réalisé dans le cadre de ce mémoire peut également être critiqué sur plusieurs points. Tout d'abord ce dernier est assez incomplet, limité par la puissance maximale du WindShapper, la vitesse maximale du vent lors de l'essai était de $55.8[km/h]$, or pour un dimensionnement à l'Eurocode, le vent devrait au moins atteindre la vitesse de base, à savoir $93.6[km/h]$ et $160[km/h]$ pour coller avec la plage de vitesse analysée dans les modèles théoriques. Il serait donc intéressant de refaire cet essai dans une soufflerie avec de plus grandes capacités, par exemple celle de l'ULiège.

La configuration de l'essai peut également soulever des questions. La distance entre le WindShapper et le modèle réduit a été choisie arbitrairement, de même pour la position de la sonde Pitot qui par ailleurs, placée entre la soufflerie et le modèle, pourrait générer des turbulences. L'effet d'échelle n'a pas été pris en compte non plus, le modèle réduit étant beaucoup plus petit qu'un vrai panneau photovoltaïque, il pourrait être intéressant de mesurer l'impact des dimensions du modèle sur les résultats. La position de la rotule, excentrée, crée un moment initial qui a pour effet de donner un angle au panneau même lorsque le vent ne souffle pas. Ce dernier a été simplement déduit de toutes les mesures, mais ce choix est discutable étant donné que le moment généré par l'excentricité de la structure est proportionnellement moins élevé que celui généré par le vent. Enfin, le dernier point

qui peut être reconsidéré est le système de mesure qui n'est pas forcément le plus précis. Étant donné que l'angle est déterminé manuellement, une erreur de $\pm 1[^\circ]$ peut être attribuée à la valeur mesurée. Taux d'erreur dilué par le nombre d'images prise (environ 10 par plage de vitesse). L'appareil photo pourrait également être responsable de légères déformations dues à l'objectif, mais ces dernières sont négligeables et non pertinentes pour cet essai.

Il est important de préciser que les données utilisées pour l'analyse des données font partie d'un échantillon relativement grand qui a donc été réduit de manière pseudo-aléatoire. Pour ce faire, les données ont été "sampler" à l'aide de la fonction `df.sample()` avec les paramètres, `frac = x` qui définit la proportion de fractionnement et `random_state = x`, qui permet de répliquer le fractionnement afin de toujours obtenir les mêmes données. Au cours de travail, la variable `random_state` a été prise comme étant 42.

Durant l'analyse du prototype, notamment pour déterminer les tendances des différents nuages de points, deux méthodes ont été utilisées. La première est la moyenne selon la méthode LOWESS (Locally Weighted Scatterplot Smoothing) et la seconde est l'utilisation des quantiles pour déterminer les enveloppes supérieures. La moyenne LOWESS a généralement été assez négligée au cours de ce travail, car elle ne correspond pas vraiment au comportement tel qu'analysé dans les modèles théoriques.

Cependant, l'enveloppe supérieure déterminée par les quantiles à quant à elle été utilisée pour représenter les tendances des nuages de points et les comparés aux modèles théoriques. Le quantile utilisé a été choisi en fonction des données avec lesquels la tendance était comparée, on peut donc se demander si les choix effectués étaient réellement pertinents. Le choix du quantile 95% se justifie assez simplement par le fait que nombre de sources proposent souvent d'utiliser un quantile 95% pour filtrer le bruit dans les données tout en conservant suffisamment d'informations pour que les résultats soient représentatifs. Le seuil de 90% est généralement moins choisis, mais il peut s'avérer pertinent lorsque la disparité entre les différents points analysés est plus importante.

Quoi qu'il en soit, de manière générale, on recommande l'utilisation de quantiles 90%, 95% ou encore 99%. Ce choix n'est pas forcément normé et s'avère donc plutôt être personnel et au bon vouloir de chacun.

Comme discuté au cours de la section concernée, les efforts horizontaux R_H , tels que développés pour le prototype, ne sont pas forcément des plus pertinents. Cette erreur est plus que probablement dû à la méthode utilisée pour déterminer la tendance des efforts. Probablement qu'un échantillon plus fourni, notamment avec des vitesses plus élevées, permettrait d'obtenir une courbe plus précise et plus proche de la réalité. Cependant, bien que cette modélisation ne permette pas de déterminer clairement les efforts agissant sur la structure, nous pouvons présumer que les efforts seront probablement en dessous de ceux proposés par les modèles théoriques.

Enfin, au vu des différentes comparaisons effectuées au cours de ce mémoire, nous pouvons clairement définir que le modèle de Hoerner est le modèle adéquat pour représenter le comportement du panneau. Que ça soit en comparant avec les résultats du prototype ou encore ceux de l'essai en soufflerie, les courbes sont systématiquement proches de celles obtenues par le modèle de Hoerner.

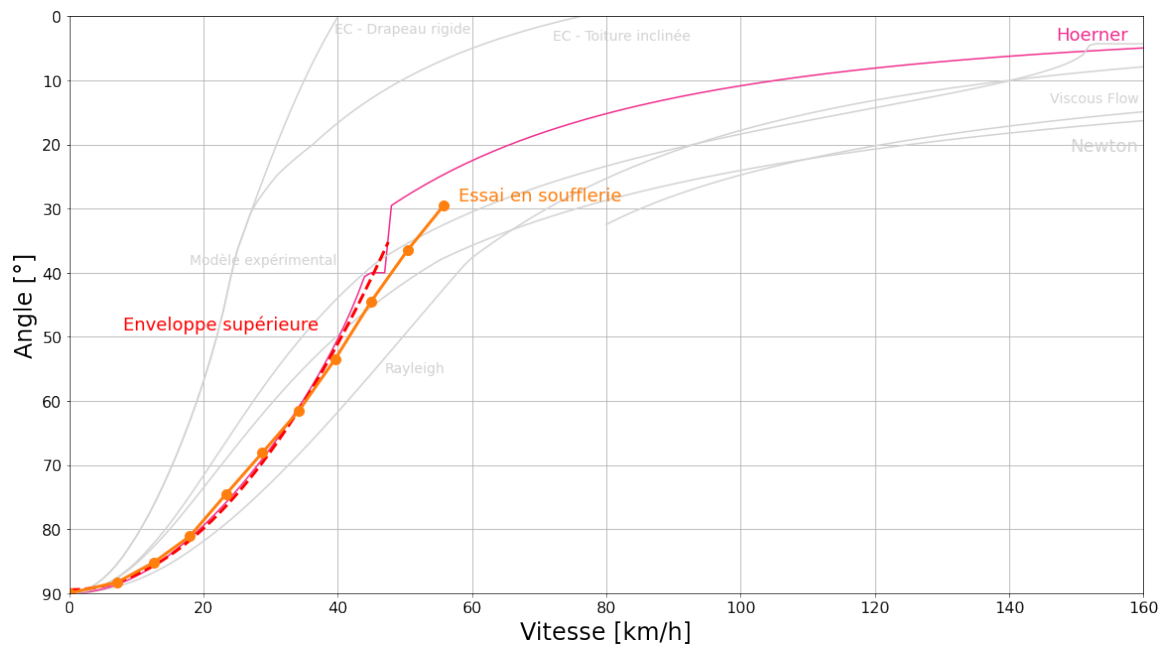


FIGURE V.1 – Comparaison entre la théorie, l'essai en soufflerie et les résultats du prototype.

Cependant, le modèle de Hoerner devrait être légèrement modifié pour être tout à fait précis. Au vu des courbes obtenues, la tendance des courbes laisse à penser que le "saut" qui a lieu entre 40 et 50 [km/h] doit être lissée. Cette idée est d'autant plus justifiée par la cause de ce saut, liée au comportement des ailes d'avion. Cette variation subite du coefficient C_N est dû au principe de décrochage. Le décrochage se définit comme une perte de portance lorsque l'angle d'attaque d'un profil atteint une valeur critique qui provoque une rupture de l'écoulement de l'air. Or, ce phénomène s'applique à des profils avec un angle d'attaque de départ $\alpha = 0^\circ$ qui s'incline pour aller vers $\alpha = 90^\circ$.

Pour lisser ce coefficient, reprenons la définition du coefficient C_N :

$$C_N = \begin{cases} 0.85 \cdot \frac{\alpha}{40} & \text{si } 0^\circ \leq \alpha < 40^\circ \\ 0.575 & \text{si } 40^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{V.1})$$

Pour la lisser, la formulation du coefficient devient la suivante, on obtient donc le coefficient de Hoerner modifié, visible sur l'équation V.2 :

$$\text{Hoerner modifié : } C_N = \begin{cases} 0.575 \cdot \frac{\alpha}{40} & \text{si } 0^\circ \leq \alpha < 40^\circ \\ 0.575 & \text{si } 40^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{V.2})$$

Cette formulation de Hoerner modifié est visible à la figure figure V.2, en comparaison avec les résultats expérimentaux.

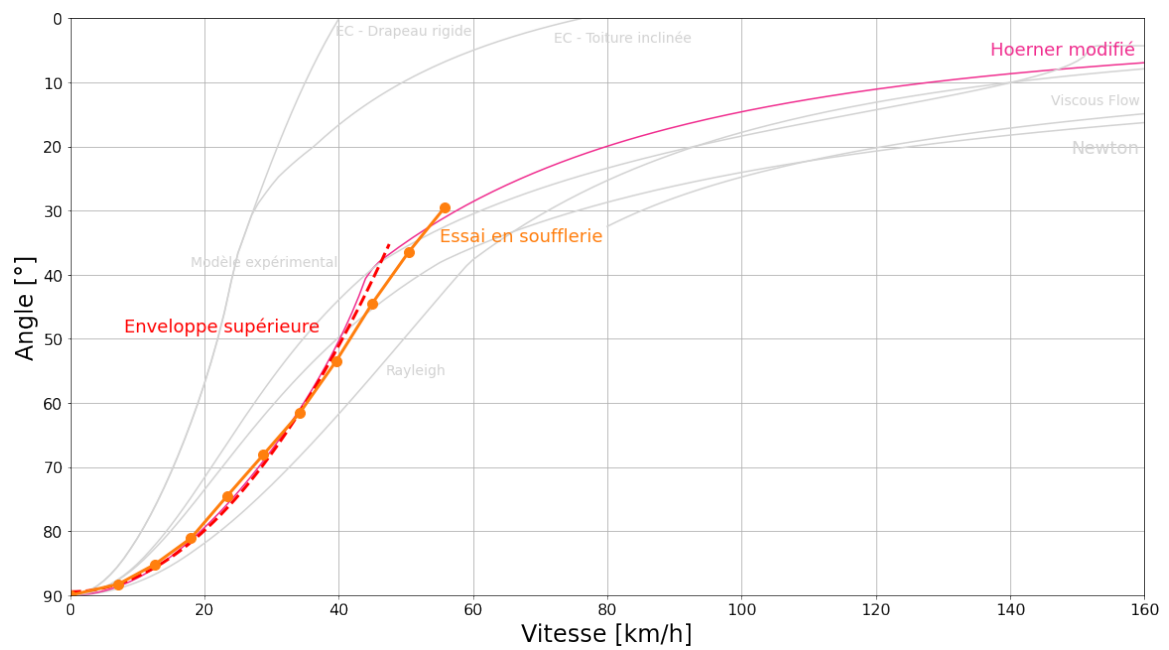


FIGURE V.2 – Comparaison entre la théorie, l'essai en soufflerie et les résultats du prototype.

Chapitre VI

Conclusion

Ce mémoire se place dans un contexte où la demande énergétique mondiale n'a de cesse de croître. Actuellement, une majeure partie de cette énergie prend sa source dans des énergies non renouvelables et polluantes. Ce constat peut également se faire au niveau de la Belgique, bien que la part des énergies renouvelables soit plus importante qu'au niveau mondial. Parmi ces sources d'énergie, le photovoltaïque est moins représenté que l'éolien, et ce, à cause de plusieurs facteurs, et c'est principalement le besoin d'espace qui limite l'implantation d'installation photovoltaïque de grande capacité. Étant donné qu'en Belgique la majeure partie de l'espace libre se trouve sur des terres agricoles, c'est principalement là que sont installées les centrales, au détriment de la production agricole.

Pour palier à ce problème, des chercheurs sont arrivés à la création d'un nouveau domaine, l'agrivoltaïsme. Cette discipline née dans les années 80 et développée durant les années 2000 propose une nouvelle approche de mutualisation des espaces en permettant à la fois la production électrique et la production agricole.

Deux grands types de structures, basses et hautes, ont alors fait leur apparition, certaines permettant de cultiver les terres, d'autres de créer de l'ombre pour le bétail. C'est dans cette idée qu'est apparue l'idée des barrières agrivoltaïques, où les panneaux sont placés à la verticale. L'inconvénient de cette disposition est que les panneaux agissent comme de grandes voiles, transmettant ainsi énormément d'efforts à la structure, ce qui n'est pas idéal.

Afin de diminuer les efforts, une solution a été proposée, laissant les panneaux osciller librement comme du linge sur un fil séchant au vent. Afin de proposer une solution encore plus écologique et économique, l'acier des structures est remplacé par du bois brut.

Pour s'assurer de la pertinence d'un tel système, une étude de vent, basée sur les mesures de l'IRM au cours des dernières années, a permis de déduire plusieurs données. Premièrement, les vitesses de vent en Belgique sont en moyenne relativement faibles, en revanche, des rafales de presque $160[km/h]$ peuvent apparaître avec une période de retour de 20 ans. Suite à cela, une brève étude de la structure avec des panneaux fixes a été effectuée, permettant ainsi d'obtenir une base pour la suite de ce rapport.

Un état de l'art dresse le portrait de l'ensemble de la littérature portant sur le sujet, des structures existantes ou encore des bases nécessaires à déterminer les efforts de vent s'appliquant sur une structure. Ceci se fait au moyen de textes normatifs comme les Eurocodes, mais également de documents propres au domaine de l'aérodynamique ou de la mécanique des fluides.

L'étude du schéma statique et des équilibres des efforts agissant sur la structure ont permis de déterminer la relation entre les efforts de vent et les contraintes agissant dans la structure. Les différents critères de dimensionnement ont également été déterminés, fournissant ainsi les bases pour un dimensionnement.

Les efforts générés par la vitesse du vent ont ensuite été définis. Ces efforts peuvent ensuite être calculés en fonction de l'angle d'attaque du panneau et de la vitesse du vent agissant sur ce dernier. Les efforts de vents dépendent également du coefficient de force normal, défini par la suite. Une relation a pu être établie au moyen d'un algorithme, permettant ainsi d'établir la relation entre l'angle du panneau et le vent qui agit sur ce dernier.

Afin de pouvoir étudier le comportement des panneaux oscillants, il est important de définir comment les efforts s'appliquent sur la structure. Pour ce faire, la modélisation du centre de pression peut être effectuée à l'aide de deux modèles. Le premier, le modèle de Holmes, fournit un modèle indépendant des dimensions du panneau. Son évolution en dépend que de l'angle du panneau et le modèle paraît assez cohérent. Le modèle de Richards, basé sur des essais en soufflerie, est quant à lui relativement identique à celui de Holmes, bien qu'il propose également une variation sur l'axe horizontal. Cependant, le modèle dépend fortement des dimensions de l'objet sur lequel les efforts s'appliquent, fournissant ainsi des résultats parfois contre-intuitifs. Finalement, c'est le modèle de Holmes qui est retenu pour modéliser le centre de pression des efforts de vent. Ce choix est notamment justifié par sa simplicité d'utilisation et son indépendance par rapport aux dimensions.

Le coefficient de force normal, indispensable pour déterminer les efforts liés au vent, est discuté au travers d'une section entière. Cette partie du mémoire propose de passer en revue toute une série de modèles provenant des Eurocodes et de la littérature. Si certains sont basés sur des modélisations théoriques, d'autres se basent sur des résultats expérimentaux. Il en ressort que les résultats fournis par les modèles de l'Eurocode sont assez peu précis. Au final, deux modèles seront retenus, celui de Newton et celui de Hoerner, basés respectivement sur une modélisation théorique et expérimentale.

Les différents modèles ainsi que les efforts générés par ces derniers sont ensuite détaillés. Cette analyse permet de conclure plusieurs points assez importants. Premièrement, peu importe le modèle utilisé, les réactions horizontales atteignent un palier maximal identique avant de diminuer fortement. Ceci amène donc à la conclusion que peu importe le modèle utilisé pour déterminer ces efforts, le dimensionnement sera le même. Deuxièmement, les efforts verticaux vont quant à eux causer une compression maximale correspondant au poids du panneau qui va ensuite s'alléger et causer de la traction. Cette traction, qui pourrait causer l'arrachement du sol de la structure, sera en réalité compensée par le poids de cette dernière.

Une fois ces comparaisons effectuées, une étude en soufflerie s'avère indispensable pour déterminer la précision ou non des modèles. Pour cela, un modèle réduit ayant les mêmes proportions qu'un panneau photovoltaïque classique a été réalisé. Permettant ainsi d'analyser le comportement du système pour des vitesses allant jusqu'à 55.8 [km/h]. Cet essai a permis de comparer les résultats des mesures avec les modèles proposés plus tôt, montrant ainsi que le modèle de Hoerner s'avère correspondre aux résultats expérimentaux.

Une brève section discute ensuite de la pertinence de la prise en compte ou non des efforts de vents agissant sur la structure portante. Il en ressort que si ces derniers sont pris en compte, la structure pourrait subir des efforts et donc des contraintes jusqu'à trois fois plus importantes. Il paraît donc

essentiel de les prendre en compte dans le dimensionnement.

Le dimensionnement d'un module doté de deux panneaux permet d'obtenir une idée des performances du système. En effet, le dimensionnement démontre la différence marquante qui a lieu au niveau des efforts générés. À l'aide du système de panneaux oscillants, les efforts diminuent par rapport à un système de panneau rigide. En conséquence directe de cette diminution d'efforts, le diamètre des sections de bois et donc la quantité de matière utilisée diminue à hauteur de 500%! Prouvant ainsi l'utilité d'un tel système. La prise en compte des efforts agissant sur la structure ne change pas fondamentalement le dimensionnement, mais les contraintes générées sont néanmoins importantes, le dimensionnement confirmant ceci.

Une fois ce dimensionnement effectué, c'est un prototype à taille réel qui a pu être conçu. Les différents aspects de la conception ont été parcourus et étudiés tels que les assemblages, les systèmes de fixations et le système complet d'acquisition. Ce dernier permet de récupérer l'ensemble des données pertinentes du prototype parmi lesquelles on compte les efforts transmis du panneau à la structure, l'angle des panneaux, la vitesse ou encore la direction du vent. Ces données sont ensuite enregistrées dans un système d'acquisition.

L'installation du prototype s'est quant à elle faite sur un site appartenant à l'UCLouvain. Bien que l'installation n'ait pas présenté de problème majeur, différents points sont à prendre en compte et font donc l'objet d'une discussion.

Après quelques mois, l'ensemble des données produites par le prototype ont pu être analysées, permettant ainsi de déduire une série d'informations utiles à la compréhension de ces structures. Après avoir confirmé que le prototype répondait bien aux stimulations du vent avec peu de délais, l'ensemble des données ont été analysées. Permettant dans un premier temps de comprendre le comportement du vent, mais aussi d'analyser les tendances. Ensuite, c'est la relation entre l'angle du panneau et la vitesse du vent qui a été étudiée, permettant ainsi de déduire la tendance entre ces deux paramètres essentiels. L'analyse des efforts transmis à la structure a également permis de mieux comprendre son comportement, mais c'est la synthèse de l'ensemble de ces résultats qui s'avère être la plus pertinente. En effet, l'analyse montre que les efforts verticaux, mais aussi la relation entre l'angle du panneau et la vitesse du vent, collent presque parfaitement avec le modèle de Hoerner, réconfortant à nouveau l'idée que ce modèle est, dans le cas étudié, le plus précis. Les efforts verticaux quant à eux ne sont pas assez pertinents pour tirer des conclusions, mais il apparaît que ces derniers pourraient finalement être plus faibles que prévu. Une analyse portant sur des plages de vitesses plus importantes permettrait de mieux cerner ce comportement. L'analyse de la structure n'a démontré aucun défaut de conception majeur jusqu'à présent, ce qui encourage l'idée que ce système est pertinent et fiable.

Enfin, il en ressort que le modèle de Hoerner s'avère être le plus proche de la réalité. Cependant, pour que celui soit encore plus précis, une légère modification lui est apportée. C'est un modèle de Hoerner modifié qui est recommandé comme étant le modèle à utiliser pour représenter le coefficient normal de pression dans le cadre d'un dimensionnement de barrières agrivoltaïque à panneau oscillants. Et ce peu importe le type de structure portante utilisée.

L'ensemble de ce travail pourrait être prolongé sur plusieurs aspects. Tout d'abord, l'étude en soufflerie est assez sommaire, une installation plus proche de la réalité avec, par exemple, un module complet pourrait s'avérer pertinente. Une telle étude menée sur un modèle instrumenté permettrait

de définir les efforts transmis à la structure et d'obtenir ainsi un modèle réellement adapté à ce type de systèmes. Ensuite, l'analyse du prototype pourrait se faire sur une plus longue période, les vents n'ayant jamais dépassé les $60[km/h]$, l'étude des données est assez limitée. Une étude poussée de la production électrique du système pourrait également être intéressante. Notamment pour découvrir l'impact de l'inclinaison des panneaux sur la production électrique, permettant ainsi de déterminer la rentabilité du système.

À titre personnel, je suis satisfait de ce mémoire. Il a permis de prouver l'efficacité du système des panneaux oscillants. L'utilisation de bois brut pour la réalisation des structures est pour moi un véritable avantage de ce projet, permettant de diminuer l'empreinte écologique tout en diminuant le coût pour l'exploitant. Je pense sincèrement que ces structures ont un véritable avenir et pourraient d'ici quelques années commencer à apparaître dans le paysage Belge. La construction du prototype a pour moi été l'élément clé de ce mémoire, permettant de prouver que ces structures ne sont pas l'idée d'un chercheur fou, mais bien une potentielle source d'énergie verte de demain.

Bibliographie

- Anderson, J. D. (2016). *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw-Hill Education, 6 edition.
- Basirat, S. and Nicholas, S. (2022). The facts about steelmaking – steelmakers seeking green steel. Fact Sheet, Institute for Energy Economics and Financial Analysis (IEEFA).
- Bureau de Normalisation (NBN) (2022). NBN EN 1997-1 ANB :2022 – Eurocode 7 : Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales - Annexe nationale. Norme belge officielle. Annexe nationale à la norme EN 1997-1 :2004 + A1 :2013.
- Campana, P. E., Stridh, B., Amaducci, S., and Colauzzi, M. (2021). Optimization of vertically mounted agrivoltaic systems. *Journal of Cleaner Production*, 325 :129091.
- Dardenne, B. and Latteur, P. (2024). Structural optimisation of free-swinging agrivoltaic fences. Document de recherche, UCLouvain. Auteur correspondant : Benjamin Dardenne.
- de Liedekerke de Pailhe, X. and Dardenne, B. (2023). Conception et optimisation de structures agrivoltaïques via modélisation paramétrique : câbles et grumes, allier légèreté et simplicité. Mémoire de master, École polytechnique de Louvain, Université catholique de Louvain. Consulté en mai 2025.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., and Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use : Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10) :2725–2732.
- Goetzberger, A. and Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1) :55–69.
- Hansen, J. B. (1961). The ultimate resistance of piles against transversal forces. *Geoteknisk Institut, Bulletin*, 12 :5–9.
- Hayibo, K. S. and Pearce, J. M. (2023). Vertical free-swinging photovoltaic racking energy modeling : A novel approach to agrivoltaics. *Renewable Energy*, 218 :119343.
- Holmes, J. D., Letchford, C. W., and Lin, N. (2006). Investigations of plate-type windborne debris—Part II : Computed trajectories. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 94(1) :21–39.
- Institut Royal Météorologique de Belgique (2025). Site officiel de l'irm. Consulté le 20 mai 2025.
- Latteur, P. (2024). Lgciv2043 : Structures en bois – partie 1 : Le matériau bois. Support de cours, UCLouvain.
- Liu, T. (2021). Evolutionary understanding of airfoil lift. *Advances in Aerodynamics*, 3(1) :37.
- Liu, T., Wang, S., and He, G. (2017). Explicit role of viscosity in generating lift. *AIAA Journal*, 55(11) :3990–3994.

- Masna, S., Morse, S. M., Hayibo, K. S., and Pearce, J. M. (2023). The potential for fencing to be used as low-cost solar photovoltaic racking. *Solar Energy*, 253 :30–46.
- Monhonval, M. (2024). Le vent selon en 1991-1-4 et anb. Notes de cours. Cours donné le 5 novembre 2024.
- Nagashima, A. (2005). Sunlight power generation system. Japanese patent application opened by the Japan Patent Office.
- NBN (2005). *EN 1991-1-4 : Eurocode 1 — Actions sur les structures — Partie 1-4 : Actions générales — Actions du vent*. Comité Européen de Normalisation (CEN). Version nationale : NBN EN 1991-1-4 ANB :2010 (Belgique).
- Rattez, H. (2023a). Construction of embedded retaining walls. Lecture notes. LGCIV2071 Geotechnics, Université catholique de Louvain.
- Rattez, H. (2023b). Geotechnics (lgciv2071), academic year 2023–2024. Course taught by Hadrien Rattez.
- Richards, P. J., Williams, N., Laing, B., McCarty, M., and Pond, M. (2008). Numerical calculation of the three-dimensional motion of wind-borne debris. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10) :2188–2202. 4th International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2006).
- Service des données et études statistiques (SDES) (2024). International – Chiffres clés de l'énergie, Édition 2024. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie/11-international>. Consulté le 18 août 2025.
- Shen, X., Wu, Y., Yuan, Q., He, J., Zhou, C., and Shen, J. (2024). Characteristic study of a typical satellite solar panel under mechanical vibrations. *Micromachines*, 15(8) :996.
- Toledo, C. and Scognamiglio, A. (2021). Agrivoltaic systems design and assessment : A critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (three-dimensional agrivoltaic patterns). *Sustainability*, 13(12) :6871.
- UCLouvain (2024). Lgciv 2033 – steel and composite steel-concrete structures : Chapter 1 – material properties & steel production (part 1). Course material, Université catholique de Louvain.
- Vandewetering, N., Hayibo, K. S., and Pearce, J. M. (2023). Open-source vertical swinging wood-based solar photovoltaic racking systems. *Designs*, 7(2) :34.

Annexe A

Types de structures agrivoltaïques

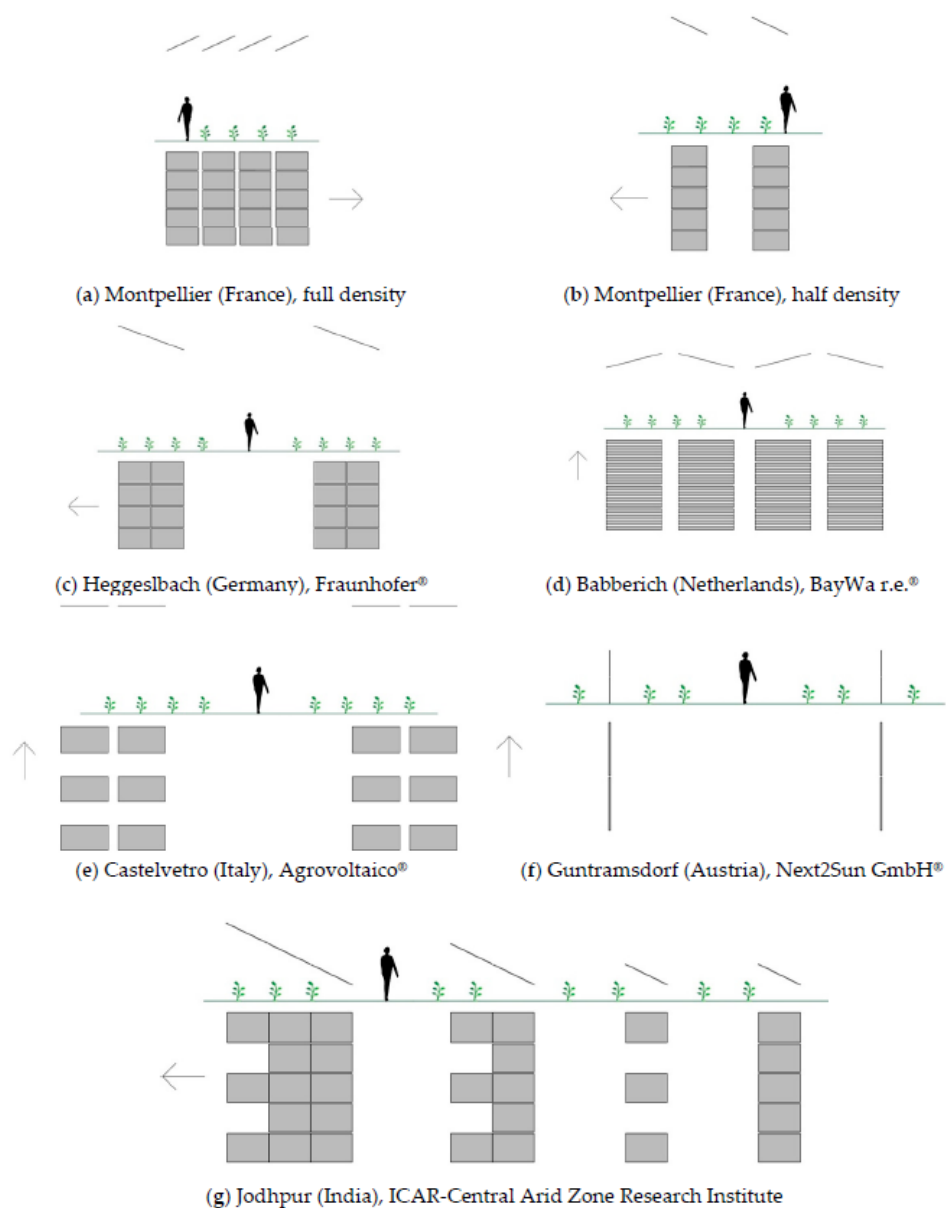


FIGURE A.1 – Types de structures agrivoltaïques présentées par l'article "Agrivoltaic Systems Design and Assessment : A Critical Review, and a Descriptive Model towards a Sustainable Landscape Vision (Three-Dimensional Agrivoltaic Patterns)". ©Carlos Toledo & Alessandra Scognamiglio

Annexe B

Plan d'assemblage

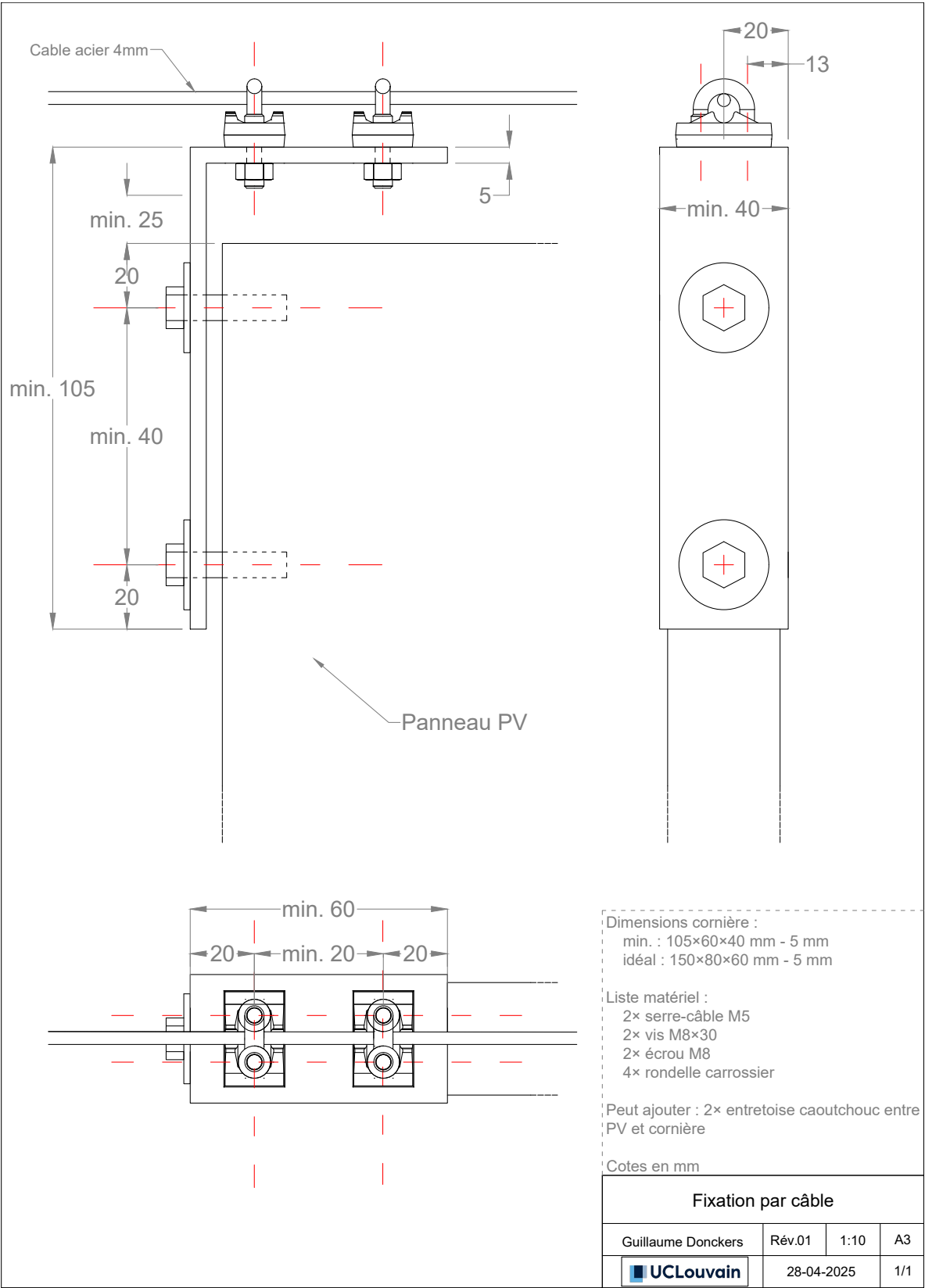
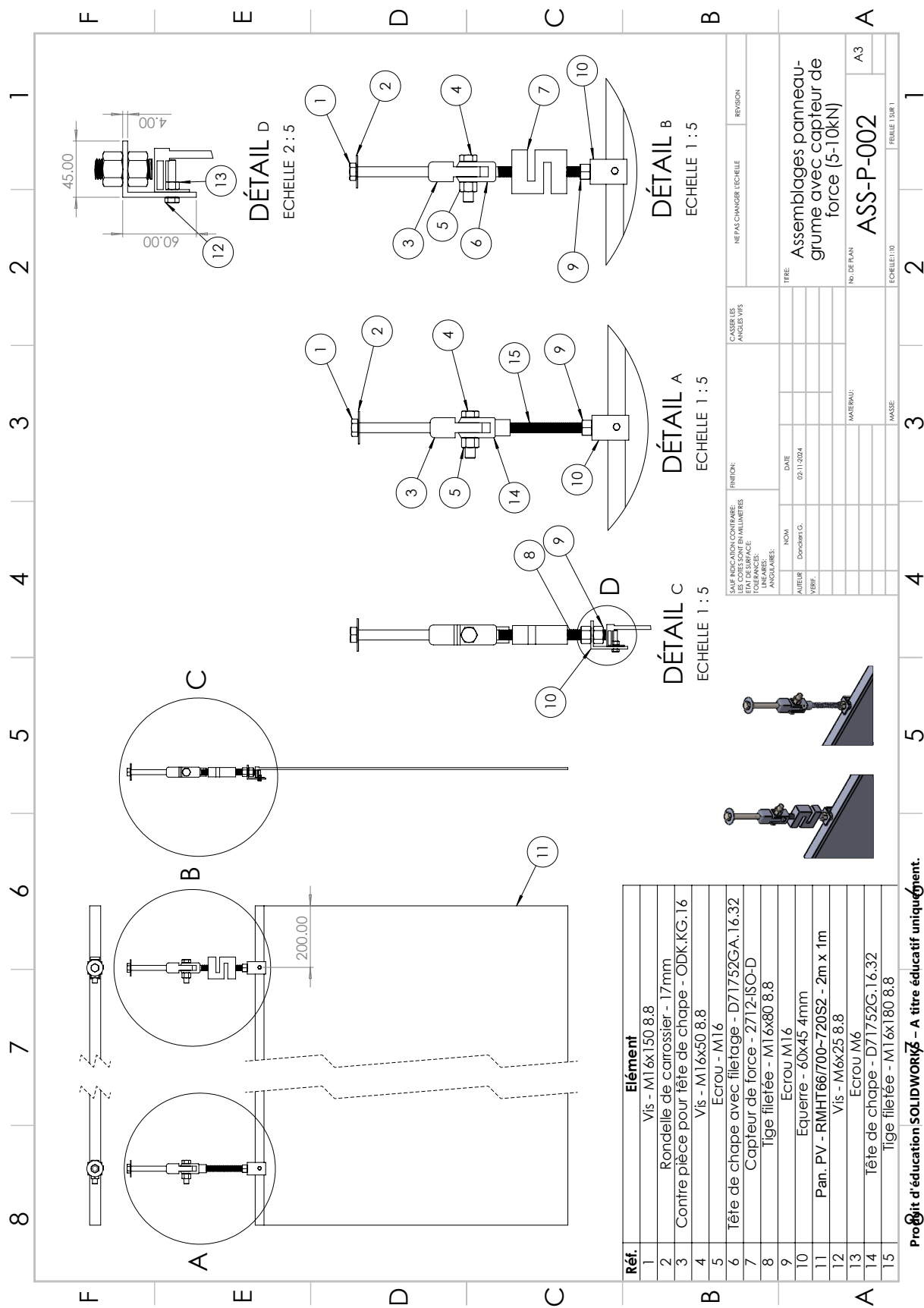


FIGURE B.1 – Plan d'assemblage à câble



Annexe C

Étude de rentabilité du système

1 Étude de rentabilité

Cette étude de rentabilité se base uniquement sur une analyse théorique. Pour cela, les données de vents et d'ensoleillement fournies par l'IRM seront utilisées accompagnées du comportement théorique des panneaux sur base du modèle de Newton.

1.1 Production électrique

Afin de déterminer la production électrique moyenne, nous devons dans un premier temps évaluer l'angle moyen du panneau ainsi que sa capacité maximale de production pour cet angle. Une fois l'angle moyen déterminé, nous pouvons lier la fonction de distribution de la vitesse moyenne du vent à la courbe angle-vitesse du modèle de Newton. La distribution statistique de l'angle du panneau se trouve sur la figure C.1 :

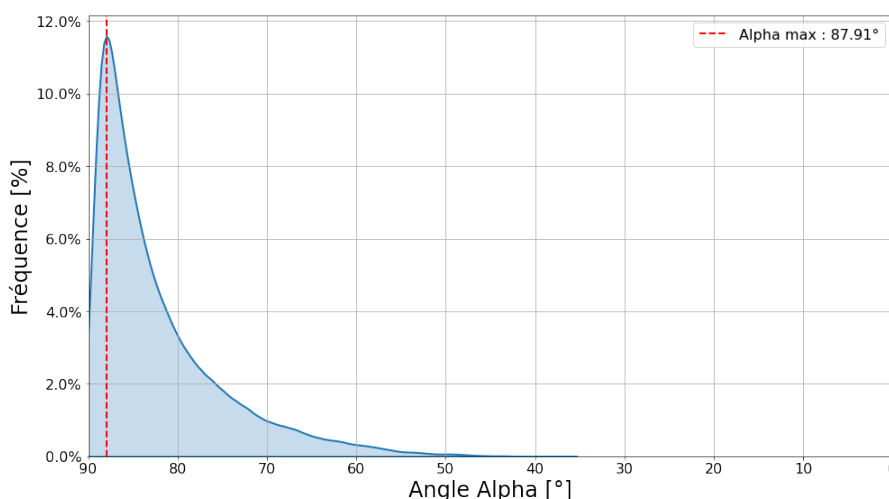


FIGURE C.1 – Distribution statistique des angles d'un panneau photovoltaïque.

Ensuite, la capacité de production pour un panneau bifacial, dont la face avant est exposée plein sud, est décrite par la figure C.2¹ qui décrit à gauche la capacité de production en fonction de l'angle et à droite la capacité de production en fonction de la vitesse du vent en lien avec le modèle de Newton.

1. <https://www.monkitsolaire.fr/blog/inclinaison-panneau-solaire>

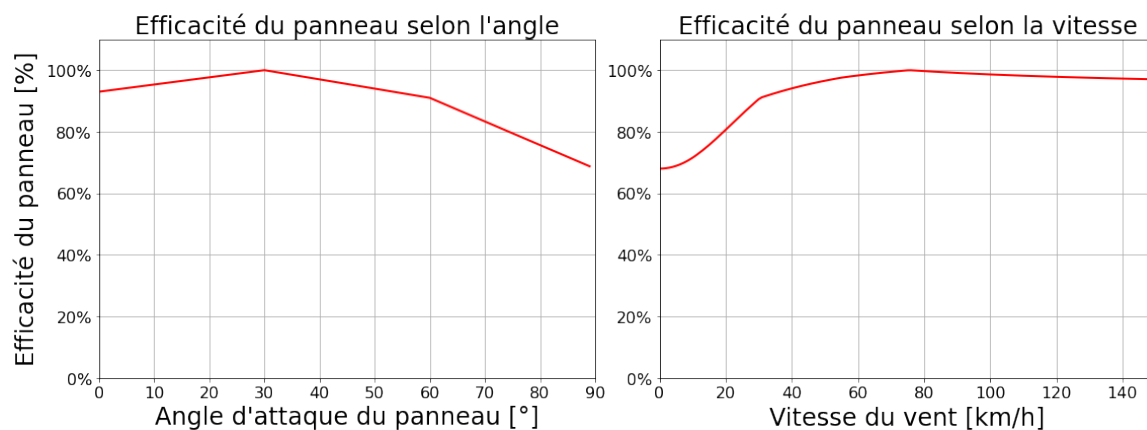


FIGURE C.2 – Efficacité du panneau selon son angle et la vitesse du vent.

Sachant que le modèle de panneau utilisé dans le cas du prototype installé dans le cadre de ce mémoire a une capacité maximale de 700 [W], nous obtenons, en liant l'angle et la capacité de production, une capacité maximale moyenne de 487 [W].

Sachant que le rayonnement moyen en Belgique est de $118.44 \text{ [W/m}^2\text{]}$ toutes saisons confondues et ce en prenant en compte les périodes de faible production ou encore la nuit. Le panneau ayant une surface de $3.12 \text{ [m}^2\text{]}$, ce dernier pourrait produire théoriquement une puissance maximale de 369.53 [W] en moyenne. En prenant en compte l'angle moyen du panneau et donc l'efficacité de ce dernier, nous arrivons à une production moyenne de 257 [Wh] par panneau. La figure C.3 indique la distribution statistique par panneau en Belgique :

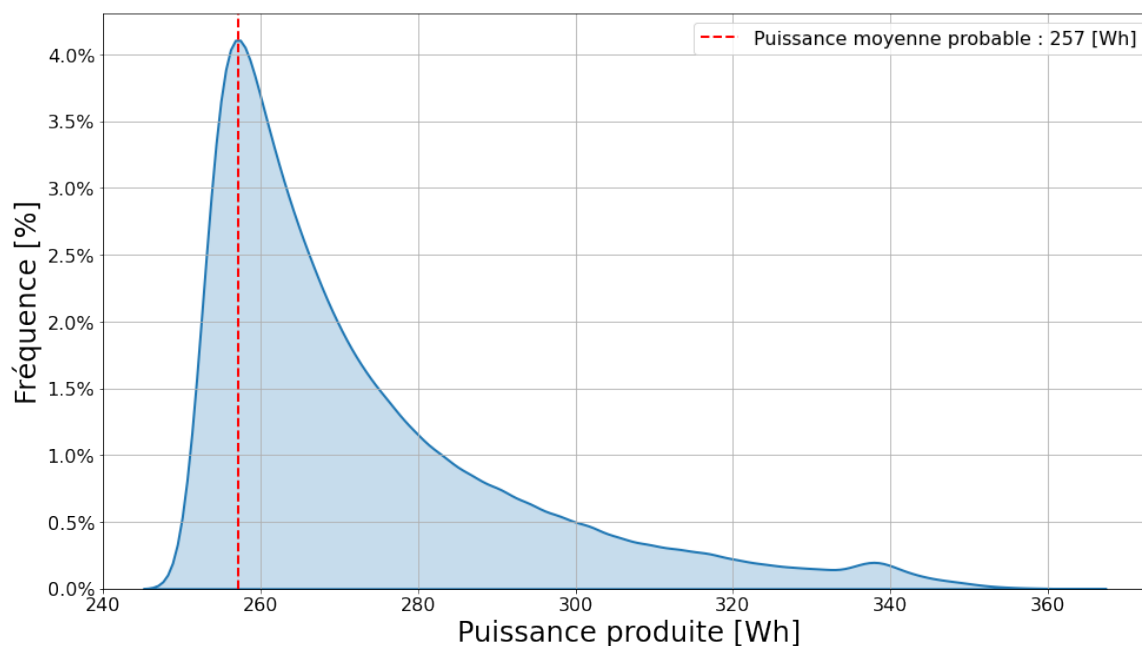


FIGURE C.3 – Distribution statistique de la puissance produite par un panneau en Belgique.

1.2 Rentabilité

Maintenant que nous connaissons la production électrique moyenne d'un panneau photovoltaïque oscillant, nous pouvons déterminer la rentabilité de celui-ci. Pour cela, nous utiliserons le prix du kilowattheure en mai 2025, à savoir environ 0.105 €. Un panneau photovoltaïque produira en moyenne

2251.32[kWh] au cours d'une année. Cependant, la fiche technique des panneaux utilisée indique que seulement 22.5% de cette électricité peut réellement être exploitée par le réseau. Cette valeur est assez classique étant donné que la moyenne se trouve aux alentours de 20%. Nous pouvons dès lors estimer que la production d'électricité annuelle d'un panneau sera aux alentours de 506.79[kWh], ce qui équivaut à 53.21 € par an.

Cependant, les panneaux, la structure, mais aussi l'installation électrique ont un coût non négligeable qui permet de déterminer la rentabilité d'une telle installation. Nous pouvons compter que l'ensemble du matériel électrique nécessaire à renvoyer le courant dans le réseau (onduleur, coffret électrique, ...) coûte en moyenne entre 800 € et 1000 €. Chaque panneau coûte environ 120 € et nous pouvons estimer que la structure portante en bois ne coûtera pas plus de 50 € par panneau. En imaginant une structure de 7 portiques supportant chacun 2 panneaux, nous pouvons estimer un coût de structure d'environ 3200 €. En considérant l'ensemble de ces paramètres, la structure sera rentabilisée après quatre ans et trois mois. Si l'on considère une durée de vie de 20 ans et un prix d'électricité stable, la barrière de 14 panneaux pourrait produire au cours de sa vie 141 901.01 [kWh] et, après déduction de l'investissement initial, générer plus de 11 700.00 € de bénéfice.

Annexe D

Étude dynamique du système

En ce qui concerne l'étude dynamique, le type de mécanisme utilisé au sein de la structure peut être considéré comme un pendule. Sachant que le panneau est placé à l'horizontale et que le centre de masse se situe au centre du panneau, nous pouvons considérer que le pendule a une longueur de $L = \frac{1.3}{2}$ à laquelle il faut rajouter la hauteur des fixations (maximum 10 cm). Nous pouvons donc considérer $L = 0.75[m]$. La masse d'un panneau est de $m_{pan} = 37.8[kg]$.

Le système étudié peut être représenté sous la forme d'un pendule soumis à la gravité. Pour un tel pendule, nous avons les paramètres $\omega_n = \sqrt{\frac{g}{L}}$ et $T = 2\pi\omega_n$ qui donnent respectivement $\omega_n = 6.617[rad/s]$ et $T = 1.73[s]$. Dans un premier temps, définissons l'équation d'un pendule libre :

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{L} \sin(\theta) = 0 \quad (D.1)$$

Cette équation donne le comportement du pendule sans prendre en compte l'amortissement de ce dernier. Or, ce n'est pas un cas très réaliste car peu importe le système étudié, un amortissement aura toujours lieu. Dans le cas des deux systèmes étudiés au travers de ce mémoire, le frottement métal-métal de la rotule ainsi que la résistance à la torsion du câble sont deux paramètres qui fournissent un amortissement. Dans le cas du système "à câbles", nous pouvons utiliser un coefficient d'amortissement = 2%.

Pour prendre en compte l'amortissement, nous devons utiliser l'équation D.2

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2 \sin(\theta) = 0 \quad (D.2)$$

Nous pouvons également nous demander quel sera l'angle initial (θ_0) à appliquer au panneau pour en réaliser l'analyse. Pour cela, nous utiliserons l'angle correspondant à une rafale maximale observable. Sur base de la vitesse de vent moyenne en Belgique qui est de $29.16[km/h]$, nous pouvons considérer que les rafales moyennes maximales ne dépasseront pas $87.48[km/h]$ si l'on considère un coefficient de rafale de 3 (ce qui est assez élevé). En considérant cela, nous obtenons un angle de $\alpha = 27.48^\circ$.

Sachant que le repère de θ et de α sont différents, nous avons $\theta = 62.52^\circ$. Si nous utilisons ceci et que nous résolvons l'équation afin d'obtenir le déplacement, nous obtenons pour une rafale à $87.5[km/h]$ la figure D.1 :

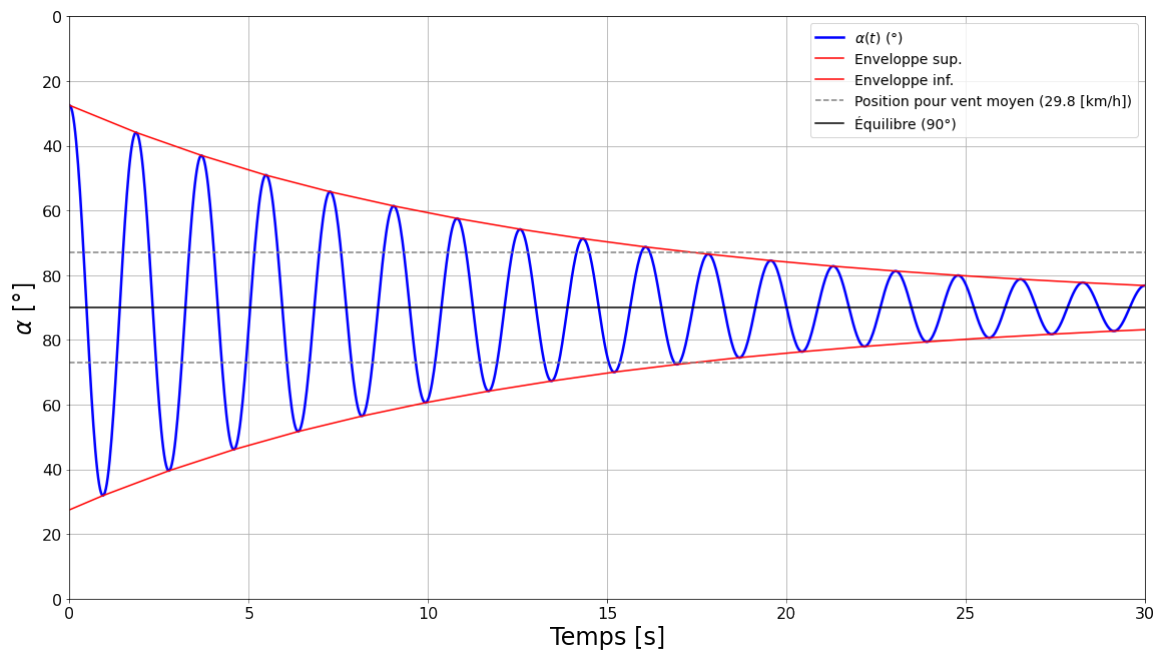


FIGURE D.1 – Comportement dynamique de la structure.

On remarque ici que lors d'une rafale, si cette dernière cesse d'un coup, la structure mettra plus de 15[s] à osciller avant d'atteindre l'angle dans lequel serait le panneau au repos. Au vu des périodes d'oscillation assez courtes, on pourrait se demander quel serait l'impact des oscillations sur la structure et plus précisément sur le mécanisme qui permet de rotuler l'ensemble.

Ces oscillations pourraient principalement poser un problème sur la structure câblée qui, grâce à sa souplesse, va absorber les vibrations. Ceci risque d'abimer prématurément le câble et causer éventuellement une rupture sur le long terme.

Par ailleurs, ces vibrations, si elles sont transmises à la structure, pourraient être transmises au travers des colonnes. Ce qui pourrait causer un enfoncement par vibrations des colonnes dans le sol en liquéfiant ce dernier, ce qui pourrait réduire la résistance du sol au niveau du contact sol-colonne ([Rattez, 2023a](#)).

Annexe E

Notice sur l'utilisation de l'intelligence artificielle

Afin d'obtenir une visualisation optimale des données, l'outil d'intelligence artificielle ChatGPT a été utilisé pour générer certains codes pythons. Ces derniers n'ont servi qu'à générer des graphiques. L'outil de correction orthographique LanguageTool a également été utilisé ponctuellement pour la correction orthographique ou grammaticale.

En aucun cas, ChatGPT ou toute autre forme d'intelligence artificielle n'a été utilisé pour générer du contenu.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

École polytechnique de Louvain

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