

Modélisation numérique d'écoulement et de transport au sein de centrales agrivoltaïques d'inter-rang

Auteur : Dartevelle, Joran

Promoteur(s) : Lebeau, Frédéric

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/20418>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'ÉCOULEMENT ET DE TRANSPORT AU SEIN DE CENTRALES AGRIVOLTAÏQUES D'INTER-RANG

JORAN DARTEVELLE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

Copyright : Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de Gembloux Agro-Bio Tech.

Responsabilité : Le présent document n'engage que son auteur.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE D'ÉCOULEMENT ET DE TRANSPORT AU SEIN DE CENTRALES AGRIVOLTAÏQUES D'INTER-RANG

JORAN DARTEVELLE

TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT

ANNÉE ACADÉMIQUE 2023-2024

Remerciements

Je remercie, en premier lieu, le professeur Frédéric Lebeau pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce travail de fin d'études au sein de son laboratoire et de me permettre de présenter une partie de mes résultats lors de la conférence *AgriVoltaics2024* à Denver. Un tout grand merci à Nicolas De Cock pour les précieuses remarques et les nombreux conseils qu'il m'a donnés et qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Je tiens à remercier toute l'équipe du GR pour les bons moments passés pendant ce quadrimestre et pour les échanges intéressants qu'on a pu avoir.

Je veux particulièrement remercier Roxane Bruhwyler, Arnaud Bouvry et Benjamin Dardenne pour notre participation, et victoire, au concours de design d'une ferme agrivoltaïque associé à la conférence. Merci à vous et hâte de fêter ça !

Merci à Neo, un formidable co-tfiste, mais également à Aubin. Merci à vous deux pour tous les travaux et projets que nous avons pu faire ensemble depuis le début de nos études.

Je souhaiterais remercier mes cokotteurs de l'église pour ces deux années de folies et de rigolades. Merci à Emilie pour son soutien sans faille depuis, maintenant, trois ans et demi dans tout ce que j'ai pu entreprendre. Merci également à mes parents et à mon frère pour m'avoir soutenu tout au long de ces études et pour les conseils et relectures !

Résumé

Ce mémoire présente une étude approfondie sur la modélisation numérique des écoulements d'air et des transports au sein des centrales agrivoltaïques en inter-rangées. L'agrivoltaïsme, une méthode combinant agriculture et production d'énergie photovoltaïque, nécessite une compréhension approfondie des interactions entre les panneaux solaires et microclimat des cultures. Ce manuscrit se concentre sur la simulation des flux d'air à l'aide de la mécanique des fluides numérique (CFD) pour étudier ces impacts.

Ce travail de fin d'études utilise le logiciel OpenFoam pour développer des modèles numériques détaillés qui simulent diverses configurations de centrales agrivoltaïques dans l'objectif d'estimer la possibilité d'utiliser ce logiciel plus largement dans la modélisation du microclimat en agrivoltaïsme. Ces modèles permettent l'analyse des forces aérodynamiques, des effets de contraction inertielle et du transport de la vapeur d'eau.

Les principaux résultats indiquent qu'OpenFoam possède les ressources nécessaires pour modéliser et analyser les écoulements au sein de centrales agrivoltaïques en inter-rangs. De plus, ce manuscrit montre que les modifications de l'écoulement faites par la présence des panneaux photovoltaïques font globalement diminuer l'évapotranspiration mais présentent certains patterns.

Cette recherche fait progresser la compréhension de l'interaction entre centrale agrivoltaïque, écoulement de l'air et microclimat et offre des lignes directrices pratiques pour concevoir des systèmes agrivoltaïques plus efficaces et résilients. Les travaux futurs devraient mettre en place des expérimentations pour retrouver les patterns observés dans cette étude.

Abstract

This thesis presents an in-depth study of the numerical modeling of air flows and transport within inter-row agrivoltaic power plants. Agrivoltaics, a promising solution combining agriculture and photovoltaic energy production, requires a thorough understanding of the microclimatic interactions between solar panels and crops. This manuscript focuses on airflow simulation using Computational Fluid Dynamics (CFD) to study these impacts.

This thesis uses OpenFoam software to develop detailed numerical models that simulate various configurations of agrivoltaic power plants, with the aim of assessing the possibility of using this software more widely in agrivoltaic microclimate modelling. These models enable the analysis of aerodynamic forces, inertial contraction effects and water vapour transport.

The main results indicate that OpenFoam has the necessary resources to model and analyze flows within inter-row agrivoltaic power plants. In addition, this manuscript shows that flow modifications caused by the presence of photovoltaic panels exhibit certain patterns.

This research advances our understanding of the interaction between agrivoltaic power plants, air flows and microclimate, and offers practical guidelines for designing more efficient and resilient agrivoltaic systems. Future work should set up experiments to recover the patterns observed in this study.

Table des matières

1	Préambule	7
2	Introduction	9
2.1	Définition et développement de l'agrivoltaïsme	9
2.2	Coût et optimisation des centrales agrivoltaïques	9
2.3	Microclimat et agrivoltaïsme	11
2.4	Mécanique des fluides numérique	13
2.5	Objectifs	14
3	Matériels et méthodes	15
3.1	Sites d'expérimentation	15
3.1.1	Valpuiseaux	15
3.1.2	Dorinne	15
3.2	Méthodes numériques	16
3.2.1	Matériels et logiciel de calcul	16
3.2.2	Modèle numérique	16
3.2.3	Modèles géométriques et maillages	19
3.2.4	Conditions limites et initiales	20
3.2.5	Modèles de cultures	22
3.2.6	Algorithme et schéma de résolution numérique	22
3.2.7	Post-traitement - Forces aérodynamiques	23
3.2.8	Post-traitement - Contraction inertielle	23
3.2.9	Post-traitement - Transport de l'eau	24
3.2.10	Validation	25
4	Résultats	26
4.1	Maillage	26
4.1.1	Modèle d'une centrale à 6 rangées	26
4.1.2	Modèles d'un panneau incliné	27
4.2	Forces aérodynamiques	27
4.2.1	Forces sur une centrale de 6 rangées	27
4.2.2	Forces sur un panneau incliné	29
4.3	Contraction inertielle	30
4.4	Transport de l'eau	33
4.4.1	Dorinne	33
4.4.2	Vitesse d'entrée	33
5	Discussion	36
5.1	Réalisme des modèles et performance des méthodes	36
5.2	Forces aérodynamiques	37
5.3	Contraction inertielle	37
5.4	Transport de la vapeur d'eau	38
6	Conclusion	41

7	Annexes	49
7.1	Conditions initiales	49
7.2	Paramètres de canopée et coefficients de porosité	50
7.3	A Study of 3D Turbulent Wind Flow at the Centre of Vertical Agrivoltaics in Full-Grown Wheat Condition	51
7.3.1	Introduction	51
7.3.2	Material and methods	52
7.3.3	Results and discussion	53
7.3.4	Conclusion	53
7.3.5	References	56
7.4	Maillages	57
7.5	Forces et inclinaison	58
7.6	Contraction inertielle	59
7.7	Transport de la vapeur d'eau	62
7.7.1	Les différentes variables de l'écoulement	62
7.7.2	Effet de la hauteur sur la somme des flux	64

Table des figures

1.1	Exemple d'une centrale agrivoltaïque d'inter-rang (Crédit photo : Next2Sun)	7
2.1	Exemple de d'installations agrivoltaïques	10
2.2	Modèle général des forces aérodynamiques agissant sur un panneau incliné.	11
3.1	Coupe longitudinale de la centrale de Valpuiseaux de 111 kWh.	15
3.2	Schéma du modèle géométrique de la centrale agrivoltaïque verticale à 6 rangées. H_p : Hauteur des panneaux, H_{cl} : Hauteur de dégagement, H : Hauteur totale de la centrale, l : largeur des panneaux, P : Distance entre deux rangées de panneaux.	19
3.3	Schéma du modèle géométrique du panneau incliné. H_{cl} : Hauteur de dégagement, H : Hauteur totale de la centrale, α : angle d'inclinaison du panneau. Le point rouge représente l'axe de rotation du panneau.	19
3.4	Géométrie : les différentes formes des panneaux	20
3.5	Exemple de conditions limites de l'entrée du domaine.	21
3.6	Logigramme de l'algorithme SIMPLE de résolution numérique du modèle (Alonzo-García et al., 2016)	22
3.7	Schéma de la géométrie d'une contraction inertielle.	23
3.8	Schéma d'un volume de contrôle et du bilan de masse de la vapeur d'eau.	24
4.1	Effet de la résolution spatiale sur les forces de trainée d'un centrale composée de 6 panneaux 2D	26
4.2	Comparaison entre les 3 précisions du maillage pour le modèle de centrale à 6 rangées : Différence sur l'effet de contraction inertielle sous le premier panneau	27
4.3	Effet de la résolution spatiale sur les forces de trainées appliquées à un panneau incliné	27
4.4	Influence de la vitesse de l'air à l'entrée du domaine sur les forces aérodynamiques	28
4.5	Influence de la vitesse de l'air à l'entrée du domaine sur les coefficients des forces aérodynamiques	28
4.6	Influence de la hauteur de dégagement sur les forces aérodynamiques subies par le premier panneau.	29
4.7	Forces de trainée et de portance en fonction de l'angle d'inclinaison du panneau	29
4.8	Coefficients des forces de trainée et de portance en fonction de l'angle d'inclinaison du panneau	30
4.9	Exemple de l'effet de contraction inertielle observé sous le premier panneau pour un cas dont la vitesse d'entrée à 2m de hauteur est de 5 ms^{-1} .	31
4.10	Impact de la forme des panneaux sur la contraction en aval de la première rangée	32
4.11	Paramètres de la contraction inertielle en fonction de la hauteur de dégagement.	32
4.12	Effet du stade de culture sur la contraction observée sous le premier panneau.	33
4.13	Résultats de calibration sur la prairie de Dorinne.	34
4.14	Comparaison entre les données d'évapotranspiration mesurée à Dorinne par covariance des tourbillons et l'évapotranspiration de cette prairie modélisée sous agri-PV vertical	34
4.15	Transect de l'évapotranspiration normalisée par la moyenne du transect de la prairie de Dorinne sous Agri-PV.	35
4.16	Évolution l'évapotranspiration en prairie et sous Agri-PV en fonction de la vitesse d'entrée à 2 m de hauteur.	35
7.1	Données expérimentales du démonstrateur agrivoltaïque de Valpuiseaux pour l'énergie cinétique turbulente k (KTE)	49
7.2	Données expérimentales du démonstrateur agrivoltaïque de Valpuiseaux pour la dissipation des turbulences ϵ	50
7.3	Paramètres de <i>Darcy</i> et de <i>Forchheimer</i> pour l'équation des milieux poreux en fonction de la densité de surface des plantes - cas d'une culture de blé (Hosoi and Omasa, 2009a)	50
7.4	Paramètres de <i>Darcy</i> et de <i>Forchheimer</i> pour l'équation des milieux poreux en fonction de la densité de surface des plantes - cas d'une prairie non pâturée (Wohlfahrt et al., 2001)	51

7.5	Paramètres de <i>Darcy</i> et de <i>Forchheimer</i> pour l'équation des milieux poreux en fonction de la densité de surface des plantes - cas d'une prairie pâturée (Wohlfahrt et al., 2001)	51
7.6	Schematic diagram of the Valpuseaux agrivoltaic demonstrator and position of the 3D sonic anemometer within the demonstrator. The red cross indicates the position of the anemometer. P is the pitch distance (10 m). H_p is the panel height (2.087 m). H_cl is the clearance height (0.817 m). l is the row width (variable from 3 cm to 10 cm).	52
7.7	Comparison between the friction speed calculated with the original data set and the data set transformed at 1 Hz	53
7.8	Wind roses inside reference area and vertical agrivoltaics demonstrator and change in mean wind speed $\frac{\bar{v}_{H,dem}}{\bar{v}_{H,ref}}$ and friction velocity ($\frac{u_{dem}^*}{u_{ref}^*}$) as a function of reference wind direction.	54
7.9	Average of the ratios between sweeps and ejections $\frac{S_4}{S_2}$ for the reference anemometer and within the demonstrator as a function of the reference wind direction.	55
7.10	Comparaison entre les 3 précisions du maillage pour le modèle de centrale à 6 rangées : Différence sur le champ des vitesses	57
7.11	Séparation de l'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison.	58
7.12	Paramètres de la contraction inertielle en fonction de la vitesse d'entrée à 2 m de hauteur.	59
7.13	Exemples de champs des vitesses modélisées en Agri-PV pour 5 stades phénologiques de la culture avec une vitesse d'entrée à 2 m de 5 m s ⁻¹	59
7.14	Écoulement en amont du premier panneau : cas d'une hauteur de dégagement de 0.4 m	60
7.15	Écoulement en amont du premier panneau : cas d'une hauteur de dégagement de 1.5 m	61
7.16	Présentation des champs des différentes variables de l'écoulement - part.1	62
7.17	Présentation des champs des différentes variables de l'écoulement - part.2	63
7.18	Évolution de la somme des flux de vapeur d'eau en fonction de la hauteur du volume de contrôle.	64

Liste des tableaux

3.1	Constantes du modèle de turbulence $k - \omega SST$	17
3.2	Conditions initiales des simulations de ce TFE.	20
3.3	Coefficients des fonctions murs	22
4.1	Ordre de grandeur du temps de calcul pour en fonction du nombre de cellules	26
4.2	Résultat de la comparaison entre les vitesses à la contraction et le modèle de Venturi pour des vitesses allant de 1 à 20 m s^{-1}	31

Table des abréviations

CFD	Mécanique des fluides numérique
LCOE	Coût actualisé de l'énergie
Agri-PV	Agrivoltaïsme
ENR	Énergies renouvelables
ET	Évapotranspiration
PV	Photovoltaïque
RANS	Équations de Navier-Stokes moyennées par Reynolds
LES	Simulation des grands tourbillons
SST	Transport en régime permanent
DES	Simulation des tourbillons détachés
DNS	Simulation numérique directe

Chapitre 1

Préambule

Les besoins croissants et les enjeux liés à l'agriculture et à l'énergie convergent vers un point critique où, d'un côté, la production alimentaire subit des aléas climatiques et météorologiques de plus en plus fréquents et extrêmes et, de l'autre côté, un secteur de l'énergie qui sollicite les terres agricoles pour sa transition vers des sources renouvelables d'énergies nécessitent plus d'espace. L'agrivoltaïsme est identifié par certains comme une solution à cette pression, en combinant production agricole et production d'électricité sur un même espace, en vantant les mérites des structures PV dans la mitigation des aléas climatiques et météorologiques. En outre, l'agrivoltaïsme d'inter-rang (1.1) semble permettre, selon les industriels, une diminution de l'érosion des sols, de l'évapotranspiration et donc une réduction de la consommation d'eau. Généralement, il n'est pas possible de cultiver directement en dessous des rangées de panneaux. Donc, généralement des bandes enherbées ou fleuries d'une largeur de l'ordre du mètre sont installées à ces endroits pour améliorer l'état de la biodiversité de la parcelle.



FIGURE 1.1 – Exemple d'une centrale agrivoltaïque d'inter-rang (Crédit photo : Next2Sun)

C'est dans ce contexte que le laboratoire DEAL de l'axe BioDynE à Gembloux Agro-Bio Tech étudie divers aspects de cette technologie comme les interactions avec les plantes, la mitigation des aléas ou encore la modélisation de telles structures ainsi que leurs analyses de cycle vie. Un travail conséquent a déjà été réalisé à travers, par exemple, la création d'un logiciel opensource, *PASE 1.0*, pour la modélisation des cultures sous des structures agrivoltaïques et l'étude des interactions entre le rayonnement et les panneaux photovoltaïques. Néanmoins, l'étude de l'impact des structures sur le vent et la manière dont ces modifications vont changer l'évapotranspiration n'en est qu'à son balbutiement.

Ce travail de fin d'étude s'inscrit dans la continuité de la recherche du laboratoire afin d'y développer cet aspect lié à l'étude de l'écoulement du vent. Une première partie, présentée dans l'annexe 7.3, a porté sur l'analyse de données provenant d'anémomètres soniques 3D placés au centre d'un démonstrateur et en zone témoin. La deuxième partie est présentée dans ce manuscrit. Elle consiste en l'étude des écoulements dans les parcelles agrivoltaïques d'inter-rang à l'aide d'outils issus de la mécanique des fluides numérique. Cette discipline, à laquelle j'ai dû me confronter au cours de ce travail, n'est pas facile d'accès car elle mélange la compréhension physique avec de la complexité mathématique et algorithmique. Ce manuscrit peut, à certains égards, être difficile à lire. J'ai, néanmoins, essayé de faire le meilleur compromis entre vulgarisation et profondeur de l'analyse scientifique.

Dans ce TFE, après avoir retracé dans les grandes lignes l'état de la recherche liée à l'agrivoltaïsme en évoquant quelques définitions, son coût et ses liens avec le microclimat dans une première partie (chapitre 2), je définirai les objectifs de mon travail. Ensuite, j'aborderai, dans le chapitre 3, les matériels et méthodes qui m'ont permis de répondre aux objectifs. J'explicitai, notamment, les équations et les traitements utilisés. Le chapitre 4 consistera en une présentation des résultats obtenus au cours du quadrimestre en terme de qualité des modèles et approfondissement de la compréhension du comportement des écoulements au sein des géométries complexes des centrales agrivoltaïques. Le chapitre 5 discutera et développera les résultats présentés dans la partie précédente. Je terminerai ce manuscrit par une conclusion du travail et quelques perspectives pour le travail futur. Une dernière partie est composée des annexes de ce travail.

Chapitre 2

Introduction

2.1 Définition et développement de l’agrivoltaïsme

L’Agrivoltaïsme (Agri-PV) consiste dans la combinaison, sur un même espace, d’une production agricole et d’une production d’électricité à l’aide de modules photovoltaïques de telle sorte que ces derniers fournissent directement, et sans dégradation importante de la production agricole, un service d’adaptation au changement climatique, de protection contre les aléas, d’amélioration du bien-être animal ou un service agronomique précis (ADEME et al., 2021a). Ces auteurs ajoutent également que les projets agrivoltaïques doivent assurer une vocation agricole, garantir la pérennité du projet agricole et maîtriser leurs impacts sur l’environnement. L’agrivoltaïsme d’inter-rang consiste en l’alternance de rangées agricoles et de rangées photovoltaïques (PV) verticales ou non. Les rangées PV sont généralement séparées d’une dizaine de mètres.

Dans la perspective de développement des énergies renouvelables (ENR), l’Union Européenne a pour objectif de largement déployer cette technique sur les terres agricoles d’ici 2050 pour atteindre les objectifs de décarbonation du secteur de l’énergie (Chatzipanagi et al., 2023). Par ailleurs, l’implémentation de ce type de centrale a connu une croissance globale importante ces dernières années avec 5MWc installés en 2012 et 2.8 GWc installés en 2020 (Gorjian et al., 2022).

Dans le même temps, un cadre légal commence à se former dans différents pays pour l’installation de projets de ce type. Ce cadre apporte notamment un point d’attention sur la compatibilité du projet avec l’agriculture pour le maintien durable de cette dernière (ADEME et al., 2021b). Plusieurs pays règlementent la baisse du rendement agricole et la justification de certaines synergies. Par exemple, la France demande un maintien du rendement à 90% par comparaison avec une zone témoin sans installation (Dec, 2024). La Wallonie, avec la mise à jour de la circulaire sur l’installation de projets photovoltaïques, est en faveur de projets pilotes qui ont comme objectif de démontrer la compatibilité et les synergies entre l’agriculture et photovoltaïsme (Service public de Wallonie, 2024). Une compréhension précise des effets des modules photovoltaïques sur une parcelle agricole et son environnement est donc primordiale.

2.2 Coût et optimisation des centrales agrivoltaïques

Un critère de réussite pour l’agrivoltaïsme est de produire de l’énergie peu chère. Le photovoltaïsme a vu, en 10 ans son LCOE¹ être divisé par 10 (IRENA, 2023) pour atteindre le plus bas parmi les différentes technologies du secteur de l’énergie aux USA en 2023, au même titre que l’éolien terrestre (Fernández, 2024). Vu les technologies partagées, l’agri-PV semble être une voie prometteuse et durable pour produire de l’énergie bas-carbone.

Néanmoins, dans l’objectif de diminuer les coûts d’installation des centrales et, in fine, celui de l’énergie, l’optimisation de la structure et de l’utilisation des matériaux est une question au cœur de la recherche scientifique et du développement industriel lié à ce moyen de production (Choi et al., 2022; de Liedekerke de Pailhe and Dardenne, 2023). Cette optimisation passe par une analyse des forces qui s’appliquent sur la structure. Dans ce cadre, le calcul précis des charges de vent sur les panneaux est donc un élément essentiel. Or, le secteur de l’agrivoltaïsme est composé de centrales très diverses et de toutes tailles telles que des ombrières PV dynamiques ou fixes, des centrales au sol, des centrales à modules bifaciaux ou des designs plus complexes comme les canopées agricoles ou les panneaux suspendus comme montrés sur la Figure 2.1 (Lee et al., 2023; TSE;

1. Le coût actualisé de l’énergie (LCOE) est un indicateur du coût de l’énergie produite par une installation sur l’ensemble de son cycle vie normalisé par sa production (Theis, 2021).

Hayibo and Pearce, 2023; Hayibo). Vu cette variabilité, les méthodes analytiques de calcul deviennent difficiles à appliquer, et la nécessité d'un outil permettant d'y parvenir est grandissante.



(a) Ombrière PV dynamique
(Crédit photo : SunAgri)



(b) Centrale au sol
(Crédit photo : Istock)



(c) Panneaux suspendus (Crédit photo : B. Dardenne & P. Lateur, UCL)



(d) Canopée PV agricole
(Crédit photo : TSE)



(e) Centrale à modules bifaciaux
(Crédit photo : Next2Sun)

FIGURE 2.1 – Exemple de d'installations agrivoltaïques

Une manière assez commune de caractériser les forces aérodynamiques, définies par l'équation 2.1 et la Figure 2.2, est de les normaliser par la pression dynamique et l'aire de l'objet (Gülçat, 2016; Anderson and Cadou, 2023) afin que cela corresponde uniquement à la forme de l'objet. Les résultats sont appelés coefficient de trainée C_D et coefficient de portance C_L . La NASA (anciennement NACA) a déjà répondu à une partie de la question des forces sur les panneaux. En effet, au cours du 20ème siècle, avec l'essor de l'aérodynamique moderne, ils ont effectué de nombreux tests sur différents profils dont des plaques inclinées (Wick, 1954). Le coefficient de trainée pour un profil rectangulaire faisant face à l'écoulement est compris entre 1.9 et 2 (Hoerner, 1965; Aziz et al., 2008).

$$\vec{F} = \iint_{\partial V} \vec{\tau} - p\vec{n} dS$$

$$q = \frac{1}{2} \rho |\vec{U}_\infty|^2 \quad (2.1)$$

$$C_D = \frac{F_D}{q \times S_R}$$

$$C_L = \frac{F_L}{q \times S_R} \quad (2.2)$$

$$(2.3)$$

Où :

- C_D et C_L sont respectivement, les coefficients de la force de trainée et de portance.
- q est la pression dynamique
- S_R est une surface de référence, généralement la surface frontale à l'écoulement ou la surface de l'objet.

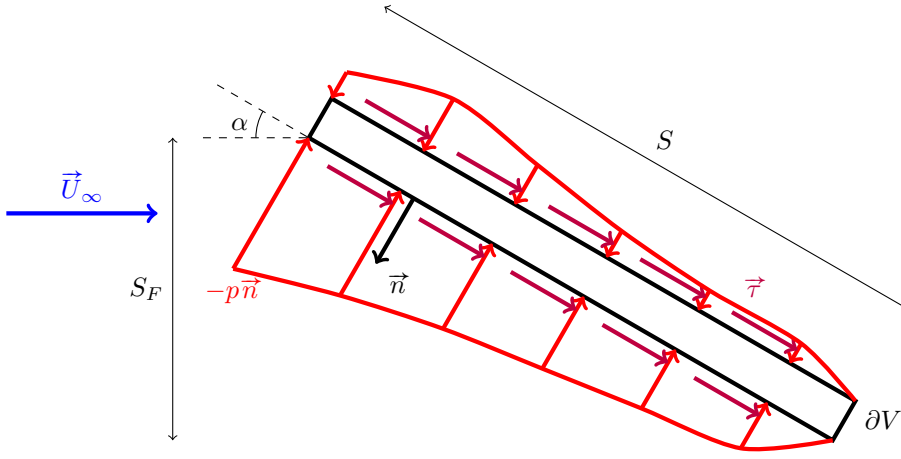


FIGURE 2.2 – Modèle général des forces aérodynamiques agissant sur un panneau incliné. α est l'angle d'attaque du panneau dans l'écoulement. ∂V est la surface englobant le volume du panneau. \vec{U}_∞ est le vecteur vitesse dans l'écoulement libre. p est la pression générée par l'écoulement. \vec{n} est le vecteur normal de la surface du panneau. $\vec{\tau}$ correspond au tenseur des contraintes de cisaillement à la surface du panneau.

Par la suite, plusieurs auteurs se sont intéressés à l'influence de la largeur du panneau, de sa position et de sa direction par rapport à l'écoulement sur sa prise au vent. Pieris et al. (2023) ont, par exemple, évalué l'effet de sol² sur les forces aérodynamiques pour différentes directions du vent sur un panneau incliné à 30°. Ils ont montré que pour des directions faisant face au panneau, la présence du sol avait tendance à augmenter la charge de vent par rapport à des conditions en écoulement libre alors que l'effet inverse est observé pour les directions opposées. Pieris et al. (2022) ont étudié cet effet pour trois angles d'inclinaison 10°, 30° et 60°. Ils ont montré que l'effet du sol était le plus important près de l'angle de décrochage³ avec des variations de charges de vent qui sont fonction du ratio d'aspect⁴ du panneau. Le mécanisme responsable de ces changements est la diminution de la force du tourbillon à l'extrémité du panneau engendrant, ainsi, une baisse de la circulation autour du panneau pour les angles proches du décrochage (Pieris et al., 2022; Zerihan, 2001). Pour les angles plus faibles, les variations sont causées par une aspiration sous le panneau plus importante par rapport à l'écoulement libre.

Enfin, une partie de la littérature concerne la modélisation de ces forces qui fait intervenir la mécanique des fluides numériques (CFD). Dans le cas du photovoltaïsme, plusieurs études ont déjà commencé à caractériser, à l'aide de modèles de CFD, les forces sur un panneau en fonction de sa géométrie. Jubayer and Hangan (2014) ont modélisé, en 3D avec un modèle moyenné, une centrale au sol avec des panneaux inclinés pour quatre directions de vent différentes. Ils ont remarqué que la force de trainée maximum survenait quand le vent arrivait de face et que la force de portance positive maximum survenait quand le vent arrivait de dos. Irtaza and Agarwal (2018) ont étudié l'impact de l'inclinaison du panneau sur les charges de vent pour divers angles d'attaque allant de -60° à 60°. Ils ont remarqué que les forces aérodynamiques étaient à leur maximum à 60°. Pour les centrales à panneaux suspendus (Figure 2.1), les angles d'attaque plus élevés (de -60 à -90°) sont également importants à caractériser pour trouver l'équilibre statique (Dardenne, 2024).

2.3 Microclimat et agrivoltaïsme

Le microclimat est défini comme l'ensemble des conditions climatiques mesurées dans une zone restreinte localisée près de la surface terrestre auxquelles cette dernière est exposée (Geiger et al., 1995). Les plantes sont couplées à leur microclimat donc un changement sur une variable de ce dernier induit une réaction sur les autres qui va résulter en un échange d'énergie, de masse ou de quantité de mouvement avec la plante (Coombs et al., 1985). Les panneaux photovoltaïques vont fortement modifier le microclimat des cultures. L'impact le plus évident reste la modification des échanges radiatifs en terme d'hétérogénéité et de quantité interceptée causée par les ombres des panneaux. Elles vont être très variables d'un design à l'autre comme le laisse présager la Figure 2.1 (Barron-Gafford et al., 2019, Dupraz et al. (2011); Elamri et al. (2018)). On retrouve dans la littérature une diminution du rayonnement allant de 20% à 60% (Barron-Gafford et al., 2019, Dupraz et al. (2011); Elamri et al. (2018)). Le rayonnement solaire étant la source d'énergie de la photosynthèse (Coombs et al., 1985), cet effet constitue la principale contrainte écophysologique de l'Agri-PV (Dupraz et al., 2011),

2. L'effet de sol ("Ground effect") est l'effet de la hauteur du panneau vis à vis du sol. Il est généralement caractérisé par le rapport de cette hauteur sur la longueur du panneau.

3. L'angle de décrochage correspond à l'angle à partir duquel l'écoulement se détache de la paroi.

4. Le ratio d'aspect correspond au ratio entre la longueur et la largeur du panneau

et doit être contrebalancé par des synergies positives entre l'installation et la culture (ADEME et al., 2021a). Dans ce cadre là, la compréhension de l'impact de l'agri-PV sur l'écoulement de l'air autour d'une parcelle est donc primordiale pour la prise en compte des synergies liées au microclimat lors du design de centrale. Cette variable est importante, en effet, à la fois, pour les échanges turbulents de masse, d'énergie et de quantité de mouvement qu'elle provoque et les déformations mécaniques qu'elle peut causer sur les cultures (Coombs et al., 1985).

L'évapotranspiration (ET), fortement influencée par le rayonnement et la température, présente une diminution dans la littérature agrivoltaïque allant de 10 à 30% mais avec de fortes variabilités (Marrou et al., 2013; Feistel et al., 2022). Des chercheurs ont étudié les flux d'eau à l'aide de lysimètres sous Agri-PV. Ils ont montré, en moyenne, une réduction de l'évapotranspiration mais avec une variabilité saisonnière importante qui présente une augmentation de l'ET en hiver sous le système Agri-PV causée par des températures plus importantes au sol (Feistel et al., 2022). L'impact du vent et des turbulences n'est jamais vraiment pris en compte dans l'analyse des flux d'eau dans les études expérimentales en Agri-PV à cause de la complexité de mesurer précisément les deux.

Plusieurs modèles d'évapotranspiration coexistent, ils fonctionnent généralement avec une analogie électrique et un équilibre énergétique pour décrire ce phénomène (Monteith, 1965; Shuttleworth and Wallace, 1985). L'équation 2.4 présente le modèle flux-gradient (Kaimal and Finnigan, 1994). La complexité des transferts est reprise dans les résistances et plus particulièrement, le transport par l'air est intégré en une résistance aérodynamique qui est décrite par l'équation 2.5 en condition atmosphérique neutre au sein de la couche limite de surface (Kaimal and Finnigan, 1994). Bruhwylér et al. (2022) a montré qu'avec le modèle de Penman-Monteith et en faisant l'hypothèse que tous les échanges sont verticaux, les flux d'eau diminuaient avec l'effet coupe-vent potentiel des modules photovoltaïques.

$$LE = \frac{s^* - s_{ref}}{r_{st} + r_a} \quad (2.4)$$

$$r_a = \frac{u(z)}{u_*^2} \quad (2.5)$$

Où LE est le flux de vapeur d'eau en $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$, s^* est la concentration en vapeur d'eau dans les stomates en kg m^{-3} , s_{ref} est la concentration en vapeur d'eau à la hauteur de référence en kg m^{-3} , r_{st} est la résistance stomatique au transfert en s m^{-1} , r_a est la résistance aérodynamique au transfert en s m^{-1} , z est la hauteur de référence en m, $u(z)$ et u^* sont respectivement la vitesse à la hauteur z et la vitesse de friction en m s^{-1} .

Peu d'études expérimentales retracent l'impact de l'Agri-PV sur l'écoulement du vent (ADEME et al., 2021a). Une étude de 2018 a récolté des données au centre d'une centrale photovoltaïque au sol avec des panneaux proches de l'horizontale (18°) faisant face au sud (Adeh et al., 2018). Ils observent une baisse de la vitesse moyenne proche du sol et une accélération au-dessus de la centrale avec tout au long du profil un changement significatif dans la direction du vent, notamment, anabatique causé par la faible pente des panneaux et leur température plus élevée. Par ailleurs ils n'ont pas observé de canyons de vent. Une autre étude a réalisé des mesures dans un démonstrateur d'ombrières PV fixes avec deux taux de recouvrement ⁵ différents (Barron-Gafford et al., 2019). Ils n'ont pas observé de changement significatif pour le vent entre les démonstrateurs et le champ ouvert. Enfin, un travail préliminaire réalisé en début de TFE, présente une analyse des données récoltées au centre d'un démonstrateur agrivoltaïque d'inter-rang vertical à Valpuiseaux à l'aide d'un anémomètre sonique 3D (Annexe 7.3). Les résultats de cette analyse montrent un effet de la structure Agri-PV qui est fonction de la direction du vent. Elle démontre également que des canyons de vent sont formés quand le vent est proche de la parallèle aux rangées. Ces deux études et cette analyse montrent une très grande variabilité de réponses qui sont parfois très contrastées. Les modèles résistifs sont donc probablement trop simples pour prendre en compte la complexité géométrique des installations agri-PV, surtout quand ces dernières sont des démonstrateurs de taille réduite.

Dans la littérature, de nombreux auteurs ont traité de la modélisation de l'évapotranspiration et de l'écoulement au sein des canopées agricoles à l'aide d'outils de la mécanique des fluides numérique (CFD). Parmi ceux-ci, certains ont utilisé des modèles moyennés (RANS) pour modéliser le microclimat et l'évapotranspiration de cultures sous serre agrivoltaïque ou non, dans des bâtiments ou en champs et zone ouverte (Fang et al., 2020; Jiao et al., 2020; Boulard et al., 2017; Fernández-Pacheco et al., 2022). D'autres auteurs, ont utilisé des modèles plus précis qui simulent les grands tourbillons (LES) pour étudier l'écoulement de l'air au sein et au-dessus de canopées afin de répondre à différentes questions comme l'interaction fluide-plantes (Dupont et al., 2010; Stoesser et al., 2009) et la validation de modèles (Watanabe et al., 2021). Les LES permettent d'étudier les structures

5. Le taux de recouvrement correspond à l'aire maximale des panneaux projetée au sol divisée par la surface de la parcelle.

turbulentes cohérentes et apporter une compréhension plus fine au couplage fluide-plantés et au transport dans l'air. Ils ont, toutefois, un coût très important en temps de calcul, contrairement aux modèles moyennés qui, malgré leur manque de précision, permettent déjà de répondre à des questions liées au microclimat.

Plusieurs équipes de chercheurs ont modélisé les températures des panneaux, de l'air ou du sol à l'aide de modèles de CFD (Johansson et al., 2022; Jubayer et al., 2016; Zainali et al., 2023). Johansson et al. (2022) et Zainali et al. (2023) sont de la même équipe de recherche et travaillent sur une centrale à modules bifaciaux verticaux. En utilisant SolidWork, ils ont pu obtenir un modèle qualitativement correct mais avec une erreur de 0 à 4°C sur la température des panneaux et de moins de 1°C sur la température du sol. On voit donc que la CFD est déjà capable de répondre à certains problèmes de modélisation de variable microclimatique en Agri-PV.

2.4 Mécanique des fluides numérique

La mécanique des fluides numérique est donc utilisée pour répondre à de nombreux problèmes en lien avec les sujets d'étude de ce travail. Différents modèles sont utilisés dans la littérature. Vu le matériel disponible en début de TFE et le temps disponible, ce travail s'est concentré sur les modèles moyennés qui utilisent donc les équations de Reynolds (Amiroudine and Battaglia, 2024). Ces équations proviennent du processus de décomposition de Reynolds en moyenne temporelle et fluctuations (éq. 2.6). En l'incluant dans les équations de Navier-Stokes, on obtient les équations de Reynolds (éq. 2.7 et 2.8) dans lesquelles un terme supplémentaire, nommé le tenseur de Reynolds apparaît : $\overline{u' \otimes u'}$. Ce tenseur symétrique reprend les turbulences et est composé de 6 inconnues supplémentaires. Il est nécessaire d'introduire des modèles de la turbulence permettant de calculer ce tenseur.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u} \otimes \bar{u}) = -\nabla \bar{p}^* + g + \nu \Delta \bar{u} - \nabla \cdot (\overline{u' \otimes u'}) \quad (2.8)$$

Où :

- ϕ est une variable ;
- La notation $\bar{}$ indique une moyenne temporelle ;
- La notation ' indique des fluctuations temporelles ;

D'ailleurs, contrairement aux modèles résolvant la turbulence partiellement ou complètement (LES, DNS, DES), les modèles de Reynolds ont du sens pour l'étude en deux dimensions de problèmes. En effet, la nature même des turbulences étant différente en deux dimensions par rapport à celle en trois dimensions, les modèles résolvant les turbulences n'ont que peu d'intérêt en cas de réduction d'une dimension (Ouellette, 2012).

Il existe plusieurs familles de modèles de la turbulence utilisables avec les équations de Reynolds. Comme indiqué plus haut, leur objectif est de calculer le tenseur de Reynolds. Les familles des modèles sont classées en fonction du nombre d'équations de transport qui les composent.

- Modèles à zero équation ;
- Modèles à une équation ;
- Modèles à 2/3 équations ;
- Modèles à 6 équations ;

Les modèles à zero et à une équation étant trop simples, ils ne permettent pas de modéliser une variété d'écoulement (Hami, 2021). Or, vu les géométries étudiées dans ce travail de fin d'étude, la présence de pressions adverses et de séparation de l'écoulement n'est, a priori pas négligeable. Les modèles à 6 équations sont les plus précis mais font intervenir 6 variables supplémentaires et augmentent, donc, le besoin en ressources informatiques. De plus, certains traitements proches des murs ne sont que très rudimentaires pour ce type de modèle (Hami, 2021).

Deux modèles à deux équations et leurs variants reviennent souvent dans la littérature (Johansson et al., 2022; Jubayer et al., 2016; Zainali et al., 2023; Fang et al., 2020; Jiao et al., 2020; Boulard et al., 2017; Fernández-Pacheco et al., 2022) : Les modèles $k - \omega$ et les modèles $k - \epsilon$. Le modèle $k - \epsilon$ est réputé pour sa stabilité dans la modélisation d'écoulements libres mais montre de moins bons résultats dans les régions des couches limites proches des murs contrairement au modèle $k - \omega$. Le modèle $k - \omega SST$, qui fait un mixte entre ces deux comportements, est réputé pour ses performances élevées en cas de séparation de flux et de pressions adverses (Menter and Esch, 2001). C'est le modèle à deux équations qui semble, a priori, le mieux convenir aux situations rencontrées en agrivoltaïsme. Pourtant, assez peu d'articles liés à l'Agri-PV n'abordent ce modèle, alors qu'il est plus largement utilisé dans le domaine du photovoltaïsme (Jubayer et al., 2016; Jubayer and Hangan, 2014; Shademan and Hangan, 2009; Karava et al., 2011). La plupart utilisent le modèle $k - \epsilon$ (Johansson et al., 2022;

Zainali et al., 2023).

Pour finir, la science a besoin de collaboration, de reproductivité, de transparence et de communication entre les chercheurs et avec le grand public (Lowndes et al., 2017). Dans ce cadre là, les outils libres et gratuits apportent énormément malgré le fait qu'ils soient généralement plus compliqués à utiliser. En mécanique des fluides numérique, de nombreux logiciels proposent des solutions de différents degrés de complexité à implémenter pour modéliser les écoulements (Ansys; Autodesk; MSC; Simulation, 2017). Mais la plupart sont payants et ne donnent pas accès à leur code. Dans les logiciels gratuits et opensource, OpenFoam est le plus complet et permet de modéliser une large gamme de problèmes différents (OpenFOAM, 2023).

2.5 Objectifs

Nous avons vu qu'une part de la littérature s'est intéressée à la modélisation des forces sur des panneaux mais que la modélisation des charges sur des panneaux à angles d'attaque importants n'ont été que peu étudiés. De plus, avec la diversification des types d'installation, il est pertinent de mettre au point un outil open source pour le calcul des forces aérodynamiques. D'autre part, les études sur la modélisation du microclimat en Agri-PV n'en sont qu'à leur commencement, surtout en ce qui concerne l'écoulement de l'air et l'évapotranspiration. Enfin, pour les mêmes raisons que les forces, il est également pertinent de former un outil pour modéliser précisément ces variables microclimatiques.

Ce TFE comporte, donc, deux objectifs principaux et deux objectifs secondaires. Le premier objectif principal consiste à évaluer l'intérêt du logiciel openFoam dans le cadre de la modélisation des interactions et effets des modules photovoltaïques sur les parcelles agrivoltaïques en inter-rang. Ce travail va surtout se concentrer sur la modélisation de l'écoulement de l'air et du transport de l'eau à travers des modèles moyennés en régime établi avec un modèle $k - \omega SST$. Le second objectif principal consiste à utiliser les modèles formés pour le premier objectif, afin d'étudier les charges de vent que les panneaux subissent dans quelques situations et modéliser les flux de vapeur d'eau sur des parcelles agrivoltaïques d'inter-rang.

Ce second objectif se décompose en plusieurs sous-objectifs. Un premier temps est consacré à l'étude des forces sur les panneaux en fonction de leur inclinaison, des conditions limites de l'entrée, et de leur position. Ensuite, certaines particularités de l'écoulement qui ont été décelées pendant ce TFE seront abordées et étudiées en fonction de différents paramètres comme les conditions limites de l'entrée, la présence d'une culture et la géométrie de la centrale. Enfin, le transport de l'eau sera abordé en essayant de le caractériser par une approche en volume de contrôle et sera étudié en négligeant les effets de température pour faire un focus sur le rôle de l'écoulement de l'air sur celle-ci

Les deux objectifs secondaires sont personnels et concernent mon projet personnel professionnel. En effet, j'ai eu l'opportunité de m'inscrire à un master supplémentaire en mécanique des fluides à l'Institut Von Kármán. Ce TFE a donc, également, comme objectif l'apprentissage de la mécanique des fluides numérique et de l'utilisation du logiciel OpenFoam.

Chapitre 3

Matériels et méthodes

3.1 Sites d'expérimentation

Les données utilisées dans ce travail proviennent de deux sources différentes. La première est un démonstrateur agrivoltaïque situé à Valpuiseaux où une série à long terme a été réalisée. La seconde source provient de la base de données ICOS récoltées sur le site de Dorinne. Ces données contiennent des mesures d'évapotranspiration et vont permettre d'évaluer les modèles de transport de la vapeur d'eau.

3.1.1 Valpuiseaux

Le site de Valpuiseaux est situé en France aux coordonnées géographiques 48.39N 2.30E. Ce démonstrateur de 111 kW h est déployé sur 5000 m². Il est constitué de 6 rangées de 48 panneaux. Un anémomètre a été placé au centre du démonstrateur et un autre, de référence, a été placé à 24 m au sud du démonstrateur. La figure 3.1 présente une coupe transversale de la centrale.

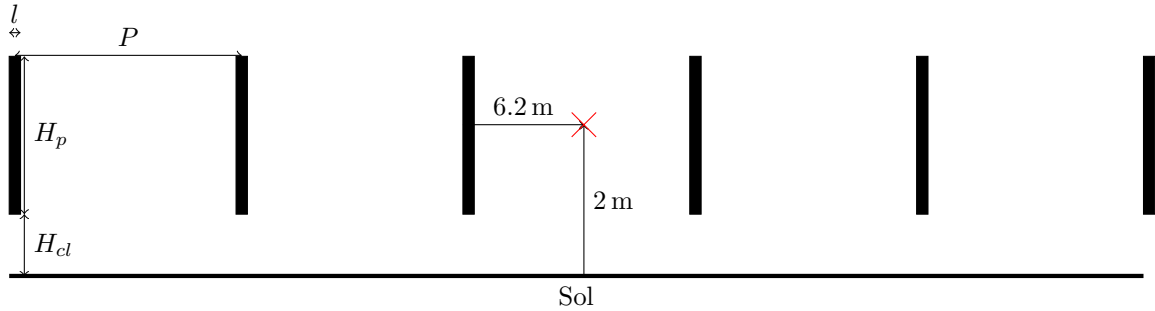


FIGURE 3.1 – Coupe longitudinale de la centrale de Valpuiseaux de 111 kWh. La croix rouge indique la position de l'anémomètre au sein du démonstrateur. H_p : Hauteur des panneaux (2.087 m), H_{cl} : Hauteur de dégagement (0.817 m), P : Distance entre deux rangées de panneaux (10 m), l : Épaisseur des panneaux (3 cm).

Les données anémométriques ont été récoltées du 24 mai au 7 juillet 2023 à l'aide de deux anémomètres DeltaOHM-HD2003 à une fréquence de 1 Hz¹.

3.1.2 Dorinne

La station de mesure de Dorinne, située en Belgique dans la région du Condroz, fait partie du réseau ICOS-écosystème. Cette station mesure les flux entre une prairie pâturée et l'atmosphère. Les données (Heinesch et al., 2024) contiennent des valeurs d'évapotranspiration mesurées par la méthode de covariance des tourbillons à deux mètres de hauteur qui vont permettre d'évaluer les modèles de transport de la vapeur d'eau mis en place dans ce travail.

1. L'impact des mesures à 1 Hz sur les grandeurs mesurées (vitesse moyenne, direction et vitesse de friction) ont été évaluée à l'aide d'un anémomètre 3D à 20 Hz sur un autre site agrivoltaïque (voir Annexe 7.3)

3.2 Méthodes numériques

3.2.1 Matériels et logiciel de calcul

Les simulations numériques ont été réalisées sur un ordinateur portable HP composé d'un CPU intel CORE i5 8ème génération et de 16 giga-octet de mémoire RAM et une tour composée d'un CPU intel CORE i7 12ème génération et de 128 giga-octet de mémoire RAM pour les cas nécessitant plus de puissance de calcul. Le logiciel OpenFoam 2312 a été utilisé via un sous-système Windows pour Linux avec une distribution Ubuntu. Les post-traitements ont été réalisés en partie via des commandes spécialisées d'OpenFoam, via python 3.9 sur l'environnement de développement Spyder et via paraView, un logiciel de visualisation et traitement compatible avec OpenFoam.

OpenFoam est un logiciel codé en C++, opensource et gratuit de mécanique des fluides numérique. Néanmoins, il n'est pas facile de prise en main. La génération des structures géométriques et des maillages peut être assez pénible et prendre beaucoup de temps. De plus, le logiciel ne comporte pas d'interface graphique et l'ensemble des actions se fait par des lignes de commande ou des modifications et ajouts de parties du code source et dictionnaire C++. Enfin, il n'est pas spécialisé sur la modélisation du microclimat.

3.2.2 Modèle numérique

Modèle de la turbulence - $k - \omega SST$

Le modèle de turbulence $k - \omega SST$ fait intervenir l'hypothèse de Boussinesq qui fait un lien entre le tenseur de Reynolds et la déformation du champs des vitesses moyennes à l'aide d'une variable fictive nommée la viscosité turbulente (Équation 3.1) qui est calculée à l'aide de k et ω . Ce modèle ajoute donc une équation de transport supplémentaire pour ces deux variables (Équations 3.2 et 3.3). Ce modèle, à l'aide de fonctions de mélange F_1 et F_2 (Équations 3.4 et 3.5) est capable de passer d'un comportement $k - \omega$ près des murs à un comportement $k - \epsilon$ loin des murs. Trois zones distinctes apparaissent donc avec ce modèle :

- Proche des murs : Comportement $k - \omega$;
- Zone de mélange : Zone de transition entre les deux comportements ;
- Loin des murs : Comportement $k - \epsilon$;

Le calcul des fonctions de mélange par rapport à la distance aux murs se fait avec une fonction de Poisson qui est compatible avec les algorithmes de résolution actuels.

$$\nu_t = a_1 \frac{k}{\max(a_1 \omega, F_2 S)} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(u k) = \tilde{P}_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot ((\nu + \sigma_k \nu_t) \nabla k) \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \nabla(u \omega) = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot ((\nu + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega) + 2 \times (1 - F_1) \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega \quad (3.3)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left[\min \left(\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega,2} k}{C D_{k\omega} y^2} \right) \right]^4 \right\} \quad (3.4)$$

$$F_2 = \tanh \left\{ \max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right)^2 \right\} \quad (3.5)$$

$$C D_{k\omega} = \max \left(2 \sigma_{\omega,2} \frac{1}{\omega} \nabla k \nabla \omega, 10^{-10} \right) \quad (3.6)$$

Où :

- k est l'énergie cinétique turbulente [$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$] ;
- ω est le taux de dissipation spécifique des turbulences [s^{-1}] et ϵ la dissipation des turbulences [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$] ;
- \tilde{P}_k est la production bornée d'énergie cinétique turbulente par le flux moyen [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$]. $\tilde{P}_k = \min(P_k, 10 \cdot \beta^* k \omega)$;
- P_k est la production d'énergie cinétique turbulente par le flux moyen [$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$]. $P_k = \nu_t \nabla u (\nabla u + \nabla u^T)$;
- S est la mesure invariante du taux de déformation [s^{-1}] ;
- F_1 et F_2 sont les fonctions de mélange ;
- $\alpha = \alpha_1 F_1 + (1 - F_1) \alpha_2$;
- $\beta = \beta_1 F_1 + (1 - F_1) \beta_2$;
- β^* , α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , $\sigma_{k,1}$, $\sigma_{k,2}$, $\sigma_{\omega,1}$ et $\sigma_{\omega,2}$ sont des constantes. Leurs valeurs respectives sont indiquées dans la table 3.1 ;

TABLE 3.1 – Constantes du modèle de turbulence $k - \omega SST$

β^*	α_1	α_2	β_1	β_2	$\sigma_{k,1}$	$\sigma_{k,2}$	$\sigma_{\omega,1}$	$\sigma_{\omega,2}$
0.09	$\frac{5}{9}$	0.44	$\frac{3}{40}$	0.0828	0.85	1	0.5	0.856

Modèle de canopée

Afin d'intégrer l'effet des canopées sur l'écoulement, une approche couramment utilisée est l'utilisation de matériau poreux. Il n'est pas possible de directement intégrer la géométrie de chacune des plantes, car il faudrait mailler trop finement et l'approche moyennée perdrait son sens (Fang et al., 2020; Jiao et al., 2020; Boulard et al., 2017; Fernández-Pacheco et al., 2022). Fang et al. (2020). Wilson and Shaw (1977) décrit la canopée comme une couche limite basse complexe pour les écoulements atmosphériques qui interagit avec son environnement selon quatre processus physiques :

- Un transfert de quantité de mouvement causé par la trainée aérodynamique des plantes ;
- Un transfert de l'énergie cinétique de l'écoulement moyen vers les turbulences derrière les obstacles ;
- Les grands tourbillons sont cassés en petits tourbillons ;
- Un transfert convectif de chaleur fournissant une contribution à la production d'énergie cinétique ;

Le premier processus peut directement être calculé par les équations de perte de charge des milieux poreux (Fang et al., 2020) tandis que les autres doivent être intégrés sous d'autres modèles (Sogachev and Panferov, 2006; Boulard et al., 2017).

Mécaniquement, un matériau poreux agit comme une barrière à l'écoulement et donc engendre une perte de charge lorsque fluide le traverse. Plusieurs lois permettent de modéliser cet écoulement : elles dérivent, pour la plupart de la loi de Darcy et elles peuvent être introduites dans les équations de Navier-Stokes pour la quantité de mouvement sous forme de termes puits. La loi de Darcy ne possédant qu'un terme visqueux et les canopées étant des milieux à forte perméabilité, elle se retrouve limitée. Dès lors, plusieurs auteurs ont proposé l'ajout d'un terme inertiel. Cette nouvelle équation porte le nom de Darcy-Forchheimer (Amiroudine and Battaglia, 2024).

$$S_m = -\left(\frac{\mu}{K} + \rho \frac{C_F}{\sqrt{K}} \|u\|\right)u \quad (3.7)$$

Où :

- S_m est un puits de quantité de mouvement ;
- K est la perméabilité intrinsèque du milieu en m^2 ;
- μ est la viscosité dynamique du fluide en $Pa s$;
- C_F est une constante sans unité qui, selon Ward (1964), vaut 0.55 pour un milieu poreux mais pourrait varier en fonction de la nature de ce milieu (Beavers et al., 1973; Nield and Bejan, 2013) ;
- $\frac{1}{K}$ est appelé le coefficient de *Darcy* et est noté D ;
- $\frac{C_F}{\sqrt{K}}$ est appelé le coefficient de *Forchheimer* et est noté F ;

Wilson and Shaw (1977) proposent un modèle d'écoulement au sein d'une canopée faisant intervenir des mesures de la structure de celle-ci comme la densité de la superficie des plantes et la coefficient de trainée aérodynamique. Ces modèles agissent comme des termes sources/puits dans les équations de Navier-Stokes. On peut ainsi intégrer les deuxième et troisième effet d'une canopée sur l'écoulement. Les équations, ci-dessous, présentent le modèle amélioré (Sogachev and Panferov, 2006; Boulard et al., 2017) :

$$\begin{aligned} S_m &= -(C_d PAD \|u\|)u \\ S_k &= C_d LAD u^3 - 4C_d LAD u k \\ S_\omega &= (\alpha - \beta) C_{can} \omega \\ C_{can} &= 12 \sqrt{C_\mu} C_d LAD \|u\| \end{aligned}$$

Où :

- S_k est le terme source d'énergie cinétique turbulente ;
- S_ω est le terme source de la dissipation spécifique des turbulences ;
- C_d est le coefficient de trainée de la canopée ;
- PAD est la densité de surface de feuille par unité de volume en m^{-1} ;
- C_μ est une constante empirique et vaut 0.09 ;
- α et β sont des constantes du modèle $k - \omega SST$ (Table 3.1) ;

Néanmoins, ce modèle ne prend pas en compte les contraintes visqueuses. Afin d'en tenir compte, une méthode consiste à le combiner avec le modèle de porosité de *Darcy-Forchheimer* qui permet, également, de trouver des

expressions pour les coefficients F et D fonction du PAD et de C_d (Fang et al., 2020) à l'aide de l'équation du puits de quantité de mouvement.

$$D = \left(\frac{PAD \times C_d}{C_F} \right)^2 \quad (3.8)$$

$$F = PAD \times C_d \quad (3.9)$$

Le logiciel OpenFoam permet l'ajout de termes sources/puits via l'utilisation d'un fichier appeler *fvOption* et de diverses fonctions permettant plusieurs degrés de liberté. Ces fonctions peuvent être appliquées à une seule partie des cellules du maillage grâce à des critères sur les coordonnées géométriques. L'équation de Darcy-Forchheimer est disponible sous forme d'une fonction de haut niveau qui nécessite comme entrée les coefficients de Darcy D et de Forchheimer F calculés à l'aide des équations 3.8 et 3.9. Le modèle de Wilson and Shaw (1977) est également déjà codé sous forme de fonctions dans openFoam avec comme entrée le PAD et le C_d .

Transport de l'eau

Afin d'étudier l'impact de structures agrivoltaïques sur l'évapotranspiration, il est nécessaire d'introduire une équation de transport de la vapeur d'eau dans l'air (Équation 3.10).

Il n'est pas possible d'ajouter directement une équation de transport dans un solveur d'OpenFoam, il a donc fallu modifier et recompiler le code source du solveur utilisé afin d'y implémenter ladite équation. Enfin, le modèle de transport ajouté est qualifié de *passif* car il fait l'hypothèse que la variable d'intérêt, ici l'eau, n'influence pas l'écoulement de l'air.

$$\frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \nabla(\bar{u}\bar{s}) = \nabla \cdot \left(\left(D_s + \frac{\nu_t}{Sc_t} \right) \nabla \bar{s} \right) + S_s \quad (3.10)$$

Où :

- s est la concentration en vapeur d'eau dans l'air (en kg m^{-3});
- D_s est la diffusivité moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air (en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);
- Sc_t est le nombre adimensionnel de Schmidt turbulent. Il fait le lien entre la diffusion turbulente de la quantité de mouvement (ν_t) et la diffusion turbulente de la vapeur d'eau;
- S_s est un terme source qui correspond à un ajout de vapeur d'eau dans le système (en $\text{kg m}^{-3} \text{s}$);

Le terme source peut être ajouté à l'aide de fonction comme indiqué dans le paragraphe précédent. Néanmoins, il n'existe pas de fonction de haut-niveau pour l'ajout d'un terme d'évapotranspiration. Deux options ont été envisagées dans ce TFE. La première consiste à saturer en vapeur d'eau la zone de la canopée. Cette action peut être réalisée en utilisant une contrainte sur s qui va bloquer sa valeur à un certain seuil dans la zone de la canopée. La seconde option utilise une approche résistive pour décrire l'effet des stomates et des pores du sol sur le transfert de la vapeur d'eau. La chambre sous-stomatique et les pores du sol étant considérés comme étant saturés en vapeur d'eau, il est possible d'utiliser une approche semi-implicite pour décrire le modèle résistif d'une plante.

$$\begin{aligned} S_s &= \frac{s^* - s}{r} \\ &= \frac{1}{r} s^* - \frac{1}{r} s \end{aligned}$$

Où :

- s^* est la concentration de vapeur d'eau à saturation en kg m^{-3} .
- r est une résistance au transfert causée par les stomates et les pores du sol. Pour la concordance des unités, elle est exprimée en s^{-1} .

Sur openFoam, une source semi-implicite est décrite selon deux coefficients.

$$S_s = a + b \times s \quad (3.11)$$

Avec :

- $a = \frac{1}{r} s^*$
- $b = -\frac{1}{r}$

3.2.3 Modèles géométriques et maillages

Deux modèles géométriques ont été utilisés dans le cadre de ce travail. Le premier est un modèle 2D d'une centrale agrivoltaïque verticale de 6 rangées de panneaux représentant le démonstrateur de Valpuiseaux. Le second est un modèle 2D d'un panneau incliné. Le premier modèle est utilisé dans le cadre des différents objectifs alors que le second modèle est utilisé pour le calcul des charges de vent sur les panneaux inclinés. Les figures 3.2 et 3.3 présentent les deux géométries 2D.

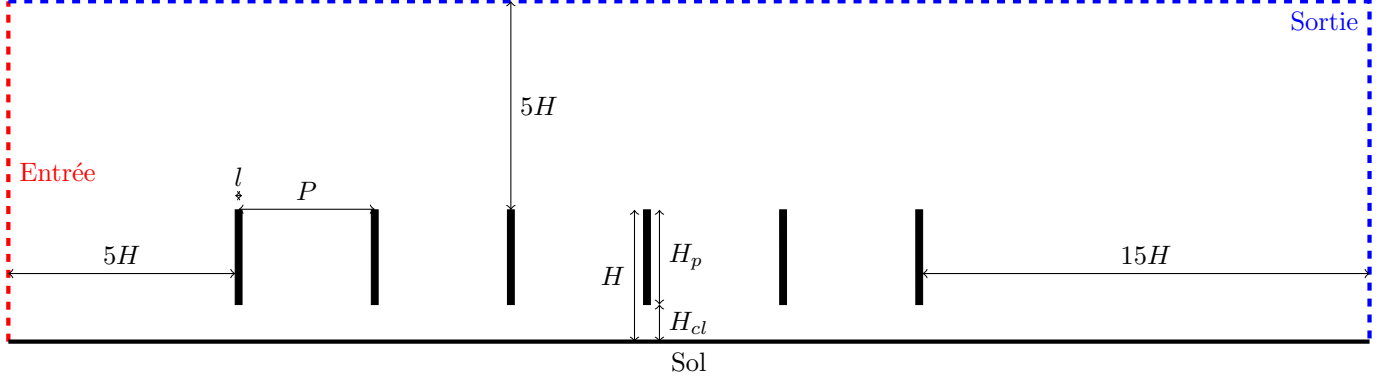


FIGURE 3.2 – Schéma du modèle géométrique de la centrale agrivoltaïque verticale à 6 rangées. H_p : Hauteur des panneaux, H_{cl} : Hauteur de dégagement, H : Hauteur totale de la centrale, l : largeur des panneaux, P : Distance entre deux rangées de panneaux.

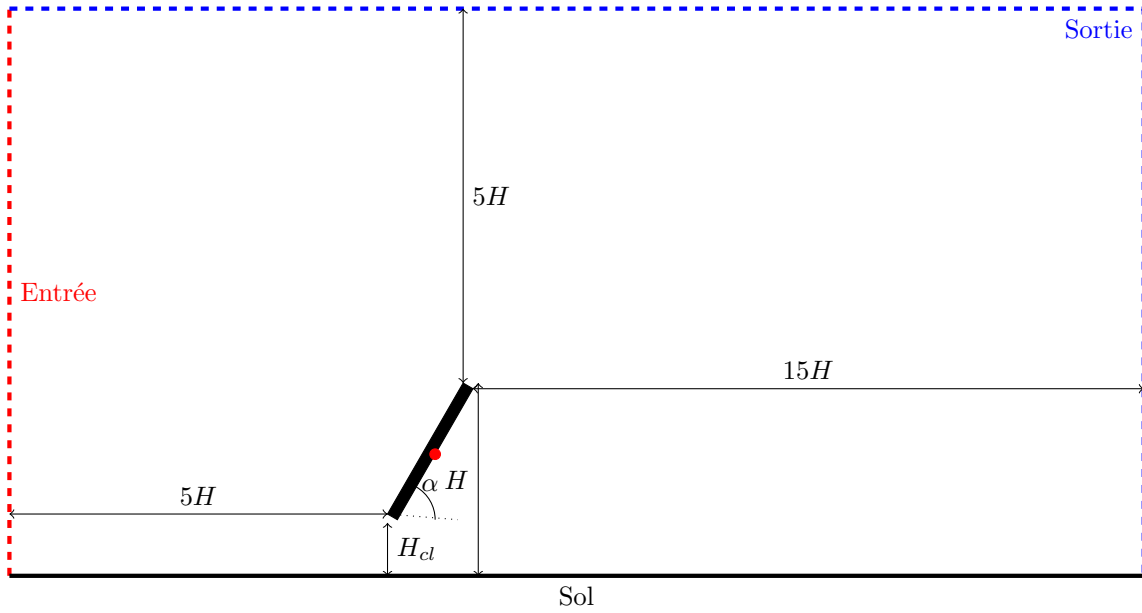


FIGURE 3.3 – Schéma du modèle géométrique du panneau incliné. H_{cl} : Hauteur de dégagement, H : Hauteur totale de la centrale, α : angle d'inclinaison du panneau. Le point rouge représente l'axe de rotation du panneau.

Les distances autour de la centrale ont été choisies selon Franke et al. (2007) et Jubayer et al. (2016). Néanmoins, une attention particulière a été apportée aux différentes simulations pour évaluer si la taille du domaine influence les résultats surtout pour les cas avec des vitesses élevées. Le cas échéant, la taille peut être augmentée. En outre, quatre formes pour le bas des panneaux ont été modélisées dans ce travail (Figure 3.4).

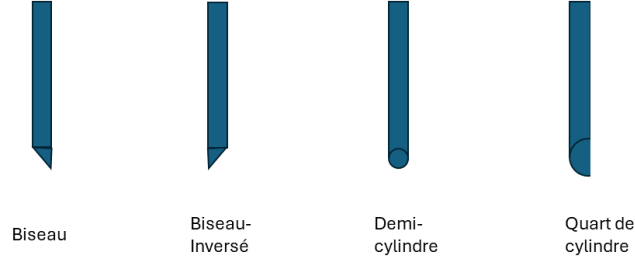


FIGURE 3.4 – Géométrie : les différentes formes des panneaux

Pour chacune des géométries, plusieurs maillages ont été testés afin d'évaluer l'impact de la précision des mailles sur les résultats. Pour la première géométrie 2D, trois précisions ont été testées : 20000, 80000, 320000 cellules. Pour la deuxième géométrie 2D, trois précisions ont également été testées : 5000, 20000, 80000. Les maillages ont été générés grâce à l'outil blockMesh d'OpenFoam.

3.2.4 Conditions limites et initiales

Étant donné l'hypothèse de stationnarité émise dans ce TFE, les conditions initiales n'ont pas une importance aussi grande que pour les simulations en régime transitoire. Néanmoins un choix adéquat permet de converger en moins d'itération vers la solution stationnaire. Le tableau 3.2 reprend les différentes conditions initiales. Le choix des valeurs s'est fait après l'étude des données expérimentales de Valpiseaux (Figures 7.1 et 7.2).

TABLE 3.2 – Conditions initiales des simulations de ce TFE.

	u	k	ω	p	s	ν_t
Valeur	variable ²	0.5	0.18	0 ³	variable	2.81

Les conditions aux limites sont, par contre, de grande importance car ce sont elles qui vont apporter la réalité physique de la scène à modéliser. Les domaines des modèles sont constitués de quatre limites : Le sol, l'entrée, la sortie et les panneaux. La figure 3.5 présente les conditions limites de l'entrée. Ces dernières sont basées sur les équations décrivant la couche limite atmosphérique de surface en condition neutre (Yang et al., 2009; Richards and Hoxey, 1993) :

$$u = \begin{pmatrix} \frac{u^*}{\kappa} \times \ln\left(\frac{z-d+z_0}{z_0}\right) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$k = \frac{u^{*2}}{\sqrt{C_\mu}} \quad (3.13)$$

$$\omega = \frac{u^*}{\kappa\sqrt{C_\mu}} \frac{1}{z-d+z_0} \quad (3.14)$$

Où :

- u^* est la vitesse de friction en m s^{-1} .
- κ est la constante adimensionnelle de *Von Kármán* qui vaut 0.41.
- z_0 est la longueur de rugosité en m. Elle caractérise l'effet de la rugosité de la surface sur le flux turbulent de quantité de mouvement.
- d est la hauteur de déplacement en m. Elle est non nulle lorsque le profil est surélevé par un obstacle. Ce paramètre est important pour des obstacles tels qu'une forêt ou une ville, donc il est maintenu à zéro dans le cadre de ce TFE (Emeis, 2013).
- z est la hauteur depuis le sol en m.
- C_μ est une constante empirique du modèle et vaut 0.09.

2. La condition initiale est fonction de la valeur du paramètre d'entrée

3. La pression est indiquée en pression cinématique relative : $p^* = \frac{p-p_{atm}}{\rho}$

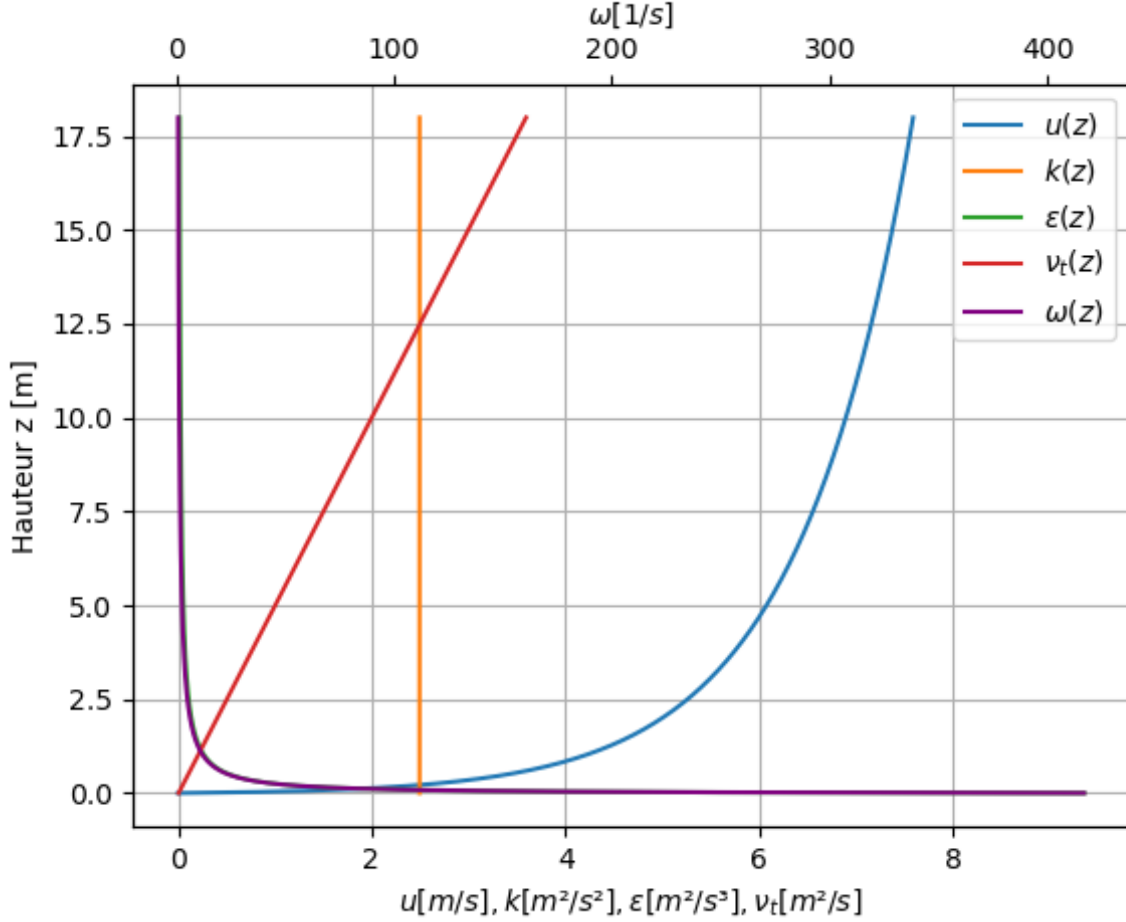


FIGURE 3.5 – Exemple de conditions limites de l'entrée du domaine.

Concernant la pression à l'entrée et l'ensemble des variables à la sortie, elles ont toutes la même condition limite qui est l'absence de gradient dans la direction normale aux parois du domaine (Yang et al., 2009). Pour le sol et les panneaux, une condition de non-glissement est d'application pour la vitesse et des fonctions murs ont été utilisées pour ω , k et ν_t . Les fonctions murs permettent une évolution non linéaire des variables au sein de la première rangée de cellules contre le mur (sol ou panneau). Cette technique permet de limiter le nombre de cellules nécessaire proche des murs qui causent de forts gradients. Ces équations empiriques reprennent des comportements habituels près des murs situés dans la couche limite atmosphérique (Parente et al., 2011; Hargreaves and Wright, 2007; Bredberg, 2000).

$$\omega_w = \frac{w\sqrt{k}}{C_\mu^{1/4}\kappa(y+y_0)} \quad (3.15)$$

$$\nu_{t_w} = \nu_w \left(\frac{y^+\kappa}{\ln\left(\max\left(\frac{y+z_0}{z_0}, 1+10^{-4}\right)\right)} - 1 \right) \quad (3.16)$$

$$k = \begin{cases} \max(k_{log}u_\tau^2, \zeta) & \text{pour } y^+ > y_{lam}^+ \\ \max(k_{vis}u_\tau^2, \zeta) & \text{pour } y^+ \leq y_{lam}^+ \end{cases} \quad (3.17)$$

Où :

- w : Poids adimensionnel des faces des cellules liées au mur ⁴.
- y^+ : Distance normalisée aux murs. $y^+ = \frac{u_\tau^* y}{\nu_w}$
- ν_w : Viscosité cinématique près du mur en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
- u_τ : Vitesse de friction près du mur en m s^{-1} . $u_\tau = C_\mu^{\frac{1}{4}}\sqrt{k}$

4. La variable ω étant calculée au centre des cellules, si plusieurs faces sont liées au mur, il faut augmenter le poids de cette cellule dans le calcul.

— k_{log} : Modèle de k dans la sous-couche inertielle.

$$k_{log} = \frac{\ln(y^+)C_k}{\kappa} + B_k$$

— k_{vis} : Modèle de k dans la sous-couche visqueuse.

$$k_{log} = \frac{2400C_f}{C_{eps2}^2}$$

Avec $C_f = \frac{1}{(y^+ + C)^2} + \frac{2y^+}{C^3} - \frac{1}{C^2}$

- ζ : Nombre petit pour éviter les erreurs numériques quand l'énergie cinétique turbulente est faible.
- C , C_{eps2} , B_k , C_k sont des coefficients des modèles présentés dans la table 3.3.

TABLE 3.3 – Coefficients des fonctions murs

C	C_{eps2}	B_k	C_k
11	1.9	8.366	-0.416

3.2.5 Modèles de cultures

Comme cela a été vu dans le paragraphe 3.2.2, sur les modèles d'écoulement dans les canopées, il est nécessaire d'introduire des valeurs pour le PAD et le C_d . Pour cela, trois jeux de données ont été utilisés pour le PAD . Le premier est une culture de froment où la distribution du PAD sur la hauteur de la culture a été estimée avec un LiDAR à 4 stades de croissance (Hosoi and Omasa, 2009b) : Tallage, Élongation, Floraison et Maturation. Les deuxième et troisième jeux de données représentent respectivement une prairie peu travaillée et une prairie pâturée (Wohlfahrt et al., 2001). Le deuxième jeu va permettre de modéliser les bandes enherbées sous les panneaux alors que le dernier jeu de données servira à initialiser le modèle de la prairie de Dorinne. Vu la difficulté de mesurer le coefficient de trainée sur des plantes, il a été maintenu constant à une valeur de 1.03. Les différentes valeurs des coefficients F et D du modèle de porosité sont présentées dans l'Annexe 7.2 avec les paramètres de canopée cités ci-dessus.

3.2.6 Algorithme et schéma de résolution numérique

Le solveur d'OpenFoam utilisé dans ce TFE est simpleFoam. Il est capable de modéliser des écoulements stationnaires, incompressibles laminaires ou turbulents (OpenFOAM, 2023). Comme son nom l'indique, il utilise l'algorithme SIMPLE pour résoudre numériquement les équations du modèle. Cette méthode semi-implicite couple les solutions pour le champs des pressions et le champs des vitesses. Ce solveur, par sa nature stationnaire, fonctionne avec des itérations atemporelles jusqu'à converger vers une solution. Le logigramme 3.6 ci-dessous présente dans les grandes lignes le fonctionnement de cet algorithme :

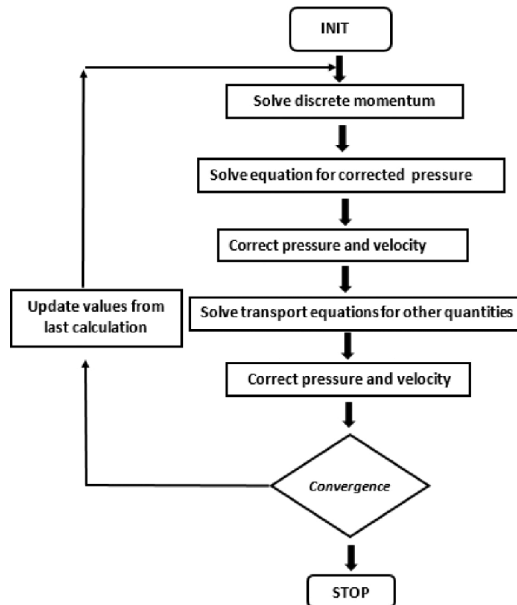


FIGURE 3.6 – Logigramme de l'algorithme SIMPLE de résolution numérique du modèle (Alonzo-García et al., 2016)

3.2.7 Post-traitement - Forces aérodynamiques

Comme indiqué dans l'équation 2.1, le calcul des forces sur les panneaux se fait en intégrant les efforts de pression et de cisaillement. Dans un premier temps, ces manipulations se sont faites a posteriori en utilisant python mais par la suite, des fonctions de haut-niveau disponibles sur openFoam (*forces* et *forceCoeffs*) ont été utilisées pour calculer ces forces après vérification de l'égalité entre les deux approches. Cette deuxième approche permet d'éviter une manipulation supplémentaire de fichiers volumineux.

3.2.8 Post-traitement - Contraction inertielle

Lors des premières simulations de ce travail, un phénomène de contraction du flux sous le premier panneau a été observé. Afin d'étudier au mieux ce phénomène, il a été résumé en 4 paramètres :

- H_{in} La hauteur d'entrée en m
- C_r Le coefficient de contraction. $C_r = \frac{H_c}{H_{cl}}$
- La vitesse moyenne à la section de contraction \vec{U}_{max} en m s^{-1} .
- La distance normalisée entre le premier panneau et la section de contraction maximum d . La normalisation se fait par rapport à H_{cl} .

La hauteur d'entrée H_{in} , le ratio de contraction C_r , la vitesse moyenne à la section de contraction \vec{U}_{max} et la distance entre le premier panneau et la section de contraction maximum d . Ces paramètres sont présentés sur la Figure 3.7.

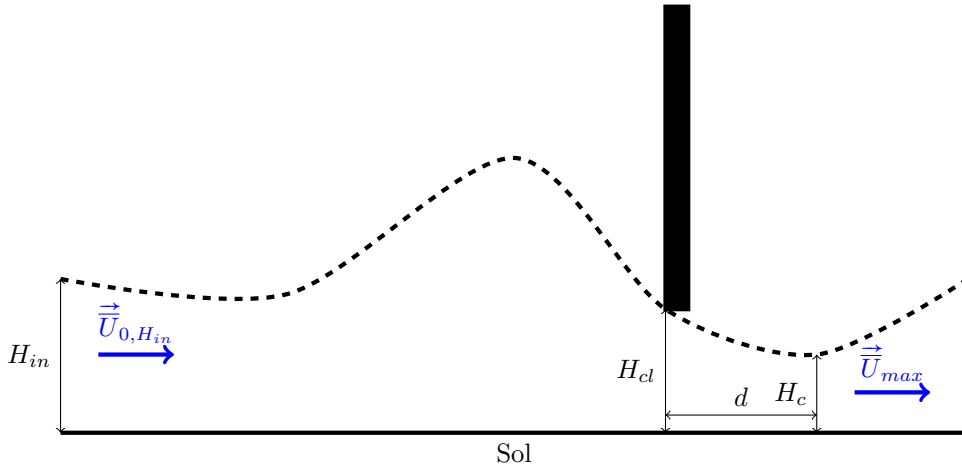


FIGURE 3.7 – Schéma de la géométrie d'une contraction inertielle. Le rectangle noir représente le premier panneau photovoltaïque. La ligne pointillée correspond au tracé de la particule la plus haute qui passe sous le premier panneau. H_{in} correspond à la hauteur à l'entrée de l'écoulement qui passe sous le premier panneau. H_{cl} correspond à la hauteur de dégagement sous les panneaux. H_c correspond à la hauteur de la contraction maximum. d correspond à la distance entre la section de dégagement et la section de la contraction maximum. $\vec{U}_{0,H_{in}}$ est la moyenne des vitesses sur la section d'entrée de hauteur H_{in} . \vec{U}_{max} est la moyenne des vitesses sur la section de la contraction maximum.

En condition stationnaire, la trajectoire ("tracé") de la particule la plus haute correspond à une ligne de courant. Il est donc possible de la retrouver en résolvant l'équation différentielle ordinaire (Équation 3.18) à partir du point inférieur gauche du panneau à l'aide de la fonction *solve_ivp* de la librairie *scipy* sur python. La solution de cette différentielle permet de retrouver les hauteurs et positions des sections d'intérêt (entrée et contraction maximum) ainsi que de calculer le ratio de contraction.

$$\frac{dx}{u_x(x, y, z)} = \frac{dy}{u_y(x, y, z)} \quad (3.18)$$

Afin d'évaluer la pertinence de la méthode, le principe de conservation de la quantité de mouvement peut être utilisé entre les sections d'entrée et de contraction maximum (Équation 3.19). Celui-ci met une égalité entre le flux de masse d'entrée et de sortie. Étant donné que le profil des vitesses de la section d'entrée est connu, cette équation ne demande que 2 paramètres : la hauteur d'entrée et le coefficient de contraction.

$$\begin{aligned} H_{in} \times \bar{U}_{0,H_{in}} &= C_r \times H_{cl} \times \bar{U}_{max} \\ \bar{U}_{max} &= \frac{\int_0^{H_{in}} u_{in}(z) dz}{H_{cl}} \end{aligned} \quad (3.19)$$

3.2.9 Post-traitement - Transport de l'eau

Le terme source de l'équation de transport peut directement être calculé à l'aide de l'Équation 3.11 sur l'ensemble des cellules comprenant la canopée de plantes. Étant donné que la concentration en vapeur d'eau est une variable intensive, la moyenne nécessite une pondération par le volume des cellules. Afin d'étudier l'impact de structures agrivoltaïques sur le transport de cette variable, ce travail explore une approche en volume de contrôle inspirée de De Roo and Mauder (2018). La figure présente ledit volume.

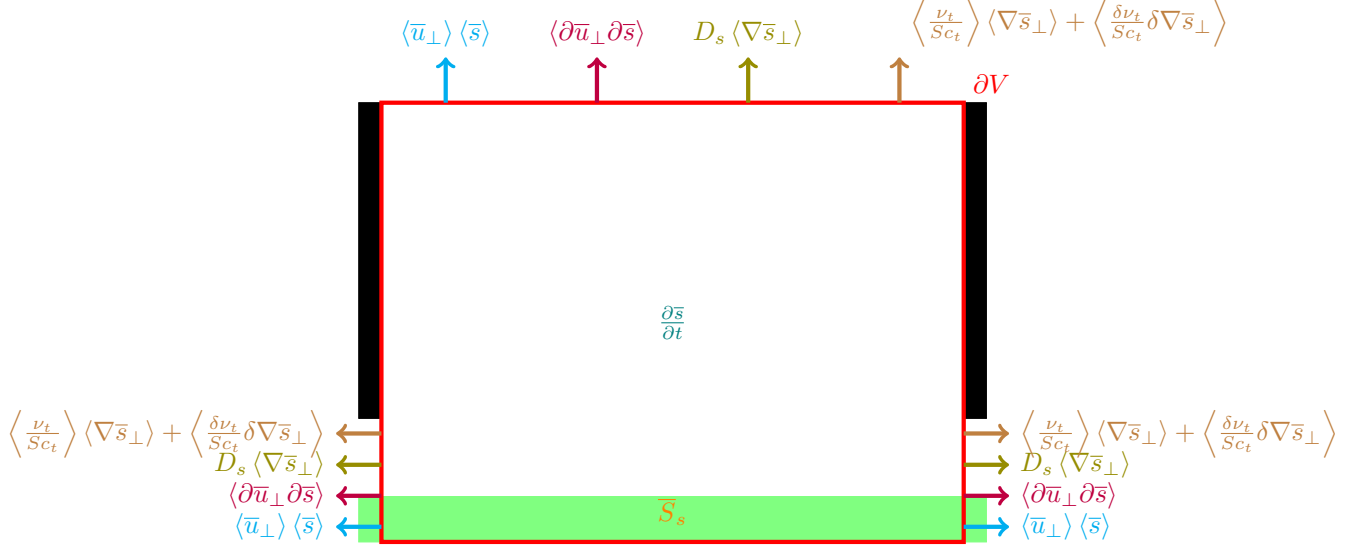


FIGURE 3.8 – Schéma d'un volume de contrôle et du bilan de masse de la vapeur d'eau. Rectangles noirs : Panneaux photovoltaïques, Rectangle vert : canopée des plantes, ∂V : Contour du volume de contrôle V , \bar{S}_s : Source de vapeur d'eau, $\frac{\partial \bar{s}}{\partial t}$: Variation du stock de vapeur d'eau dans le volume de contrôle V , $\langle \bar{u}_\perp \rangle \langle \bar{s} \rangle$: Transport par advection, $\langle \partial \bar{u}_\perp \partial \bar{s} \rangle$: Transport par dispersion, $D_s \langle \nabla \bar{s}_\perp \rangle$: Transport par diffusion, $\langle \frac{\nu_t}{Sc_t} \rangle \langle \nabla \bar{s}_\perp \rangle + \langle \frac{\delta \nu_t}{Sc_t} \delta \nabla \bar{s}_\perp \rangle$: Transport par turbulence.

La canopée de plantes correspond à la zone du terme source qui peut être séparé en différents flux en utilisant la méthodologie suivante ;

En reprenant l'équation de transport et en l'appliquant à de la vapeur d'eau transportée par l'air, on peut la développer sur un volume de contrôle V pour faire un bilan de masse.

En utilisant une décomposition analogue à celle de Reynolds mais pour une variable spatiale, on a :

$$\bar{\phi} = \langle \bar{\phi} \rangle + \delta \phi \quad (3.20)$$

Où :

- ϕ est une variable quelconque.
- La notation $\langle \rangle$ indique une moyenne spatiale
- La notation δ indique des fluctuations spatiales.

En intégrant l'équation 3.10 et en appliquant le théorème de Green-Ostrogradski ⁵, on obtient :

$$\iiint_V \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} dV + \oint_{\partial V} \bar{u} \bar{s} \cdot dS = \oint_{\partial V} D_s \nabla \bar{s} \cdot dS + \oint_{\partial V} \frac{\nu_t}{Sc_t} \nabla \bar{s} \cdot dS + \iiint_V \bar{S}_s dV$$

En incluant l'équation 3.20 dans l'équation précédente et en utilisant un volume de contrôle parallélépipédique

⁵. Le théorème de Green-Ostrogradski met une égalité entre l'intégrale sur un volume V de la divergence d'un champ vectoriel et l'intégrale du flux de ce champ sur le contour de ce volume ∂V .

$$\iiint_V \nabla \cdot F dV = \oint_{\partial V} F \cdot dS$$

de n faces⁶, on a :

$$\begin{aligned} \langle \bar{S}_s \rangle V = & \left\langle \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} \right\rangle V + \sum_i^n \partial V_i \langle \bar{u}_\perp \rangle_i \langle \bar{s} \rangle_i + \sum_i^n \partial V_i \langle \delta \bar{u}_\perp \delta \bar{s} \rangle_i + D_s \sum_i \partial V_i \langle \nabla \bar{s} \rangle_i \\ & + \sum_i^n \partial V_i \left\langle \frac{\nu_t}{Sc_t} \right\rangle_i \langle \nabla \bar{s} \rangle_i + \sum_i^n \partial V_i \left\langle \frac{\delta \nu_t}{Sc_t} \delta \nabla \bar{s}_\perp \right\rangle_i \end{aligned} \quad (3.21)$$

3.2.10 Validation

La validation des modèles est divisée en deux parties. Une première s'intéresse aux coefficients des forces aérodynamiques obtenus dans ce travail pour les comparer avec la littérature expérimentale très dense sur ce sujet. La seconde partie compare les résultats des méthodes développées en utilisant les données ICOS de Dorinne. Un modèle de résistance stomatique a été ajusté sur les données de Dorinne pour l'année 2023 en condition neutre atmosphérique et sans stress hydrique. Le modèle de résistance stomatique utilisé est uniquement dépendant du rayonnement photosynthétiquement actif (Équation 3.22) en mettant comme hypothèse que le jeu de données sélectionné ne dépend pas des autres paramètres pouvant faire varier cette résistance (Stress hydrique, stade phénologique, température, etc.) (Aiken and Klocke, 2012; Bacci et al., 2011).

$$r_{st} = \frac{1}{a + b \times PAR + c \times PAR^2} \quad (3.22)$$

Où

- PAR est le rayonnement photosynthétiquement actif $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
- r_{st} la résistance stomatique en s^{-1}
- a , b , et c sont des paramètres à calibrer.

Les résultats obtenus pourront être comparés au modèle théorique de l'évapotranspiration. En combinant, les Équations 2.4 , 2.5 et 3.13, on a :

$$LE = \frac{s^* - s_{ref}}{r_{st} \times u + \frac{\ln\left(\frac{z+z_0-d}{z_0}\right)^2}{\kappa^2}} u \quad (3.23)$$

Cette équation n'est donc valide qu'au sein de la couche limite de surface pour des flux turbulents selon la verticale (Kaimal and Finnigan, 1994).

Cette deuxième partie n'est donc pas une validation car il est nécessaire de calibrer une résistance stomatique. Néanmoins, cette procédure va permettre d'évaluer le réalisme des résultats des modèles développés.

6. 4 faces en 2D et 6 en 3D

Chapitre 4

Résultats

4.1 Maillage

Dans l'objectif d'estimer l'impact du maillage sur les résultats, plusieurs simulations avec différentes précisions ont été réalisées. L'Annexe 7.4 présente également des figures qui comparent ces précisions. Le choix du maillage final repose sur deux critères : la précision et le temps de calcul.

4.1.1 Modèle d'une centrale à 6 rangées

La Figure 4.1 présente cette analyse pour les forces de trainée sur le modèle de la centrale à 6 rangées. On remarque des changements relatifs de forces assez faibles pour les rangées 1 et 6 contrairement aux autres rangées. En effet, ces deux rangées sont les plus influencées par l'écoulement extérieur à la centrale et ce dernier n'est que peu modifié par la précision du maillage (Annexe 7.4), alors que les autres dépendent surtout des cellules d'écoulement qui se forment au sein de la centrale et dont les positions, tailles et nombres sont très affectés par la résolution spatiale. Le tableau 4.1 indique le temps de calcul approximatif de ces trois maillages sur le ordinateur portable. La première rangée étant la plus critique et le maillage n'ayant que peu d'effet sur les forces aérodynamiques appliquées à celle-ci, les trois résolutions de maillage conviennent pour ce calcul.

Néanmoins, la Figure 4.2 montre que pour les paramètres liés au phénomène de contraction inertielle, la résolution du maillage a un effet plus important. Finalement, le maillage n°2 ("Normal") a été sélectionné comme compromis entre la précision et le temps de calcul.

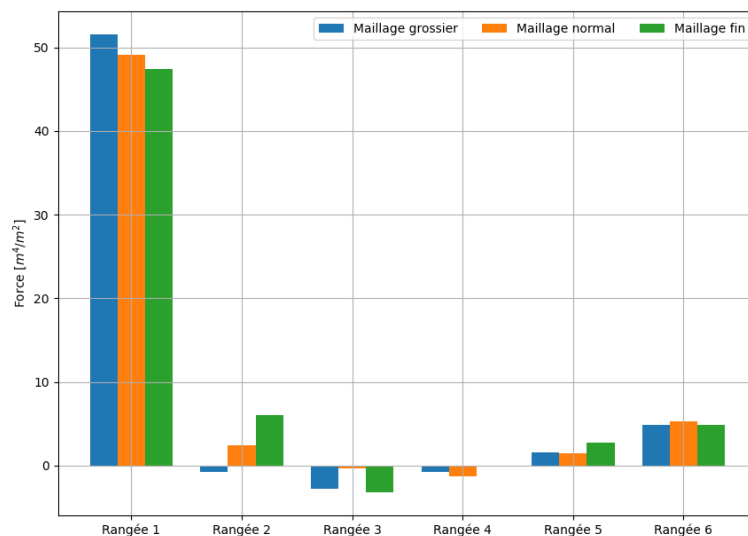


FIGURE 4.1 – Effet de la résolution spatiale sur les forces de trainée d'une centrale composée de 6 panneaux 2D

TABLE 4.1 – Ordre de grandeur du temps de calcul pour en fonction du nombre de cellules

5000 cellules	20000 cellules	80000 cellules	320000 cellules
<1 minutes	1 - 5 minutes	10 - 30 minutes	1 à 3 heures

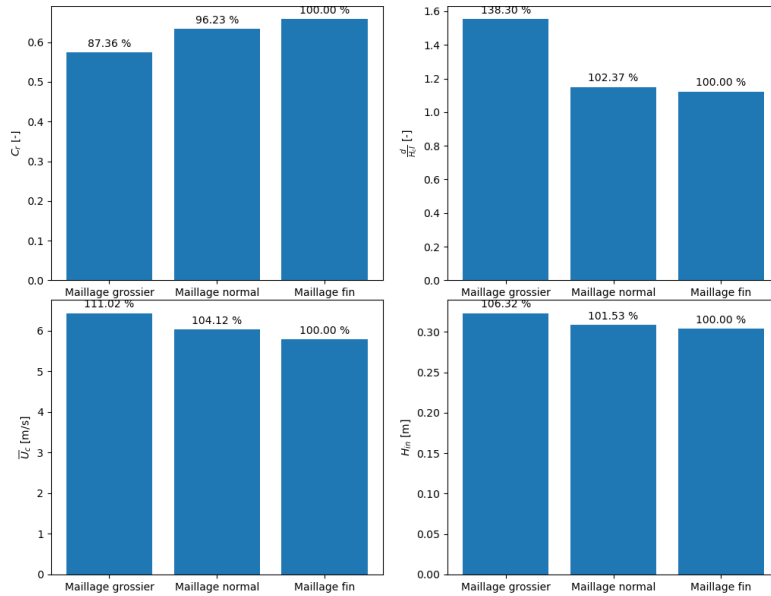


FIGURE 4.2 – Comparaison entre les 3 précisions du maillage pour le modèle de centrale à 6 rangées : Différence sur l'effet de contraction inertielle sous le premier panneau. Maillage grossier : 20000 cellules, Maillage normal : 80000 cellules, Maillage fin : 320000 cellules. C_r : Coefficient de contraction, $\frac{d}{H_c l}$: Distance normalisée par la hauteur de dégagement entre le panneau et la section de contraction maximum. \bar{U}_c : Vitesse moyenne de la section de contraction maximum. H_{in} : Hauteur d'entrée.

4.1.2 Modèles d'un panneau incliné

Comme pour le modèle de centrale à 6 rangées de panneaux, le maillage a peu d'effets sur les forces aérodynamiques subies par un panneau incliné à 50° . Le choix du maillage s'est, donc, porté sur le moins dense des trois.

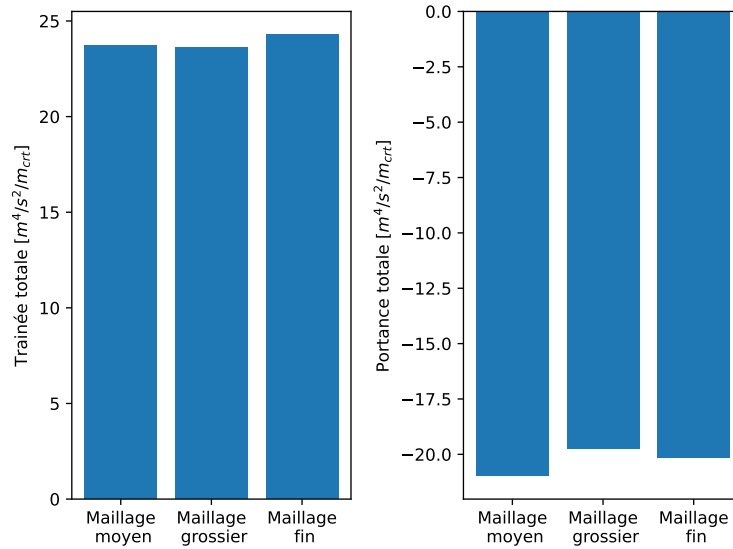


FIGURE 4.3 – Effet de la résolution spatiale sur les forces de trainée appliquées à un panneau incliné

4.2 Forces aérodynamiques

4.2.1 Forces sur une centrale de 6 rangées

La Figure 4.4 présente les forces aérodynamiques subies par les 6 rangées en fonction de la vitesse à 2 mètres du profil d'entrée. Comme expliqué précédemment, la rangée n°1 subit les charges les plus importantes. Par ailleurs, les forces de portance sont faibles par rapport à la trainée (il est important de noter la différence d'échelle sur la Figure 4.4). En outre, les charges suivent une croissance importante et non linéaire avec la

vitesse. La Figure 4.5 permet, d'ailleurs, de montrer que cette croissance est quadratique car les coefficients des forces aérodynamiques, calculés avec les équations 2.2 et 2.3, sont constants pour des vitesses allant de 3 à 20 m s^{-1} .

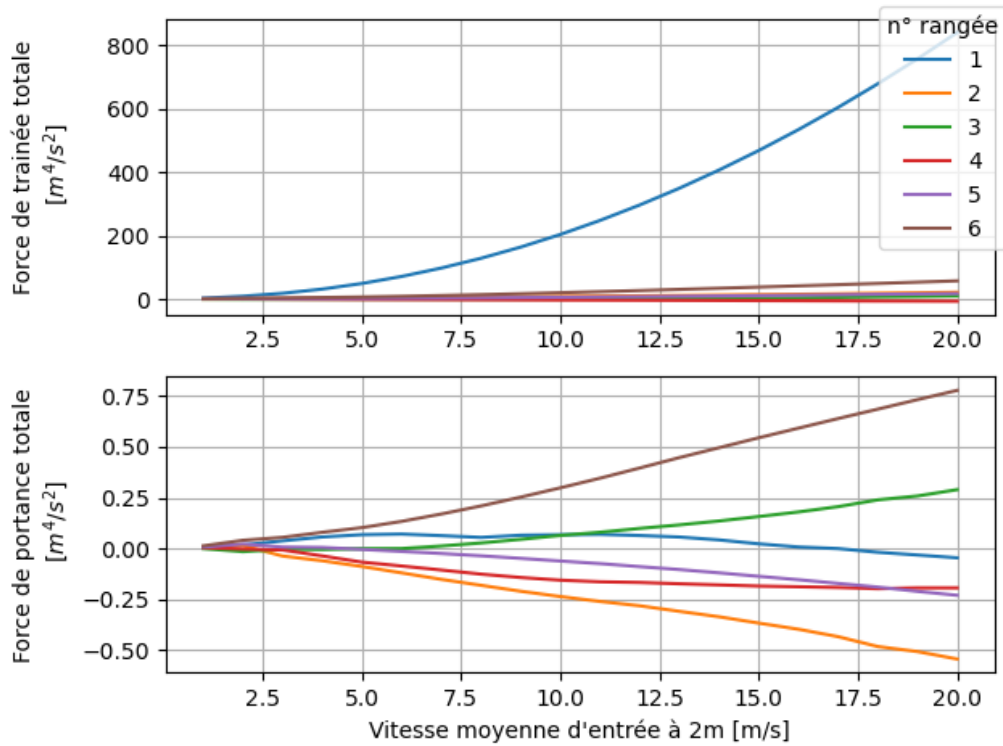


FIGURE 4.4 – Influence de la vitesse de l'air à l'entrée du domaine sur les forces aérodynamiques

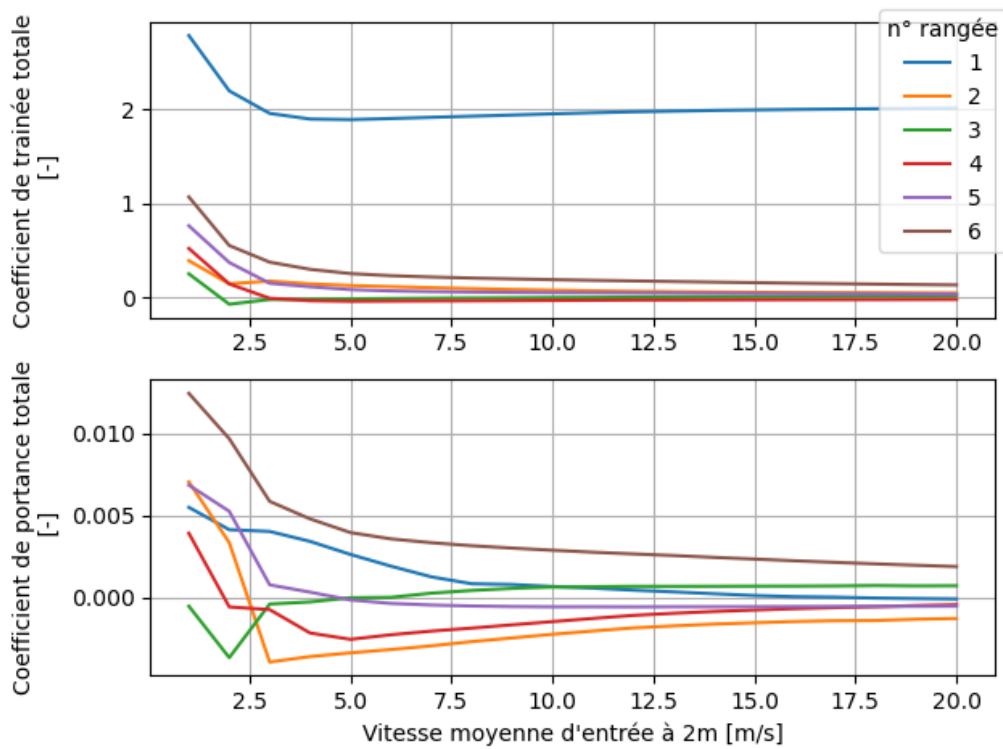


FIGURE 4.5 – Influence de la vitesse de l'air à l'entrée du domaine sur les coefficients forces aérodynamiques

La hauteur de dégagement joue également sur les forces subies par les panneaux. Sur la figure 4.6, il est important de noter la double échelle verticale car les forces de trainée sont bien plus importantes que les forces

de portance. On remarque que les forces de trainée augmentent avec cette hauteur alors que les forces de trainée, même si très faibles, diminuent en intensité.

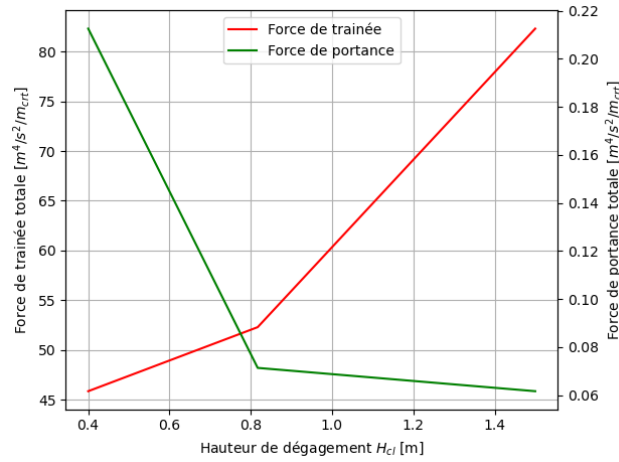


FIGURE 4.6 – Influence de la hauteur de dégagement sur les forces aérodynamiques subies par le premier panneau.

4.2.2 Forces sur un panneau incliné

Les forces subies par un panneau en fonction de son inclinaison et de la vitesse à deux mètres de hauteur sont présentées sur la figure 4.7. La force de trainée atteint un maximum quand le panneau est proche de la verticale alors que la portance atteint, en amplitude, un maximum aux angles 50° avec une force dirigée vers le sol et à 140° avec une force dirigée vers le haut. La comparaison avec la figure 4.8, qui présente les coefficients de ces forces, permet de conclure que l'effet de la vitesse sur les charges de vent est également quadratique car ces coefficients aérodynamiques sont similaires pour les deux vitesses testées. En outre, la variation des forces est en partie causée par le changement de la surface frontale mais pas uniquement, comme le montre la figure de l'annexe 7.5 où la surface frontale a été utilisée comme surface de référence.

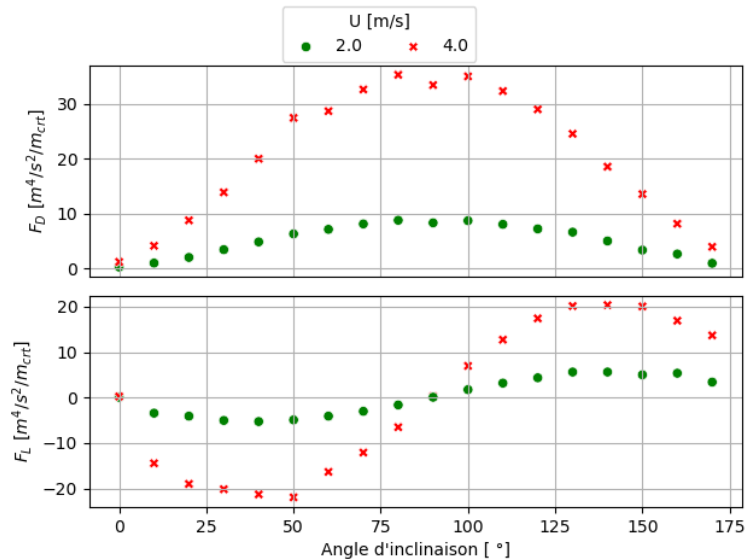


FIGURE 4.7 – Force de trainée et de portance en fonction de l'angle d'inclinaison du panneau.

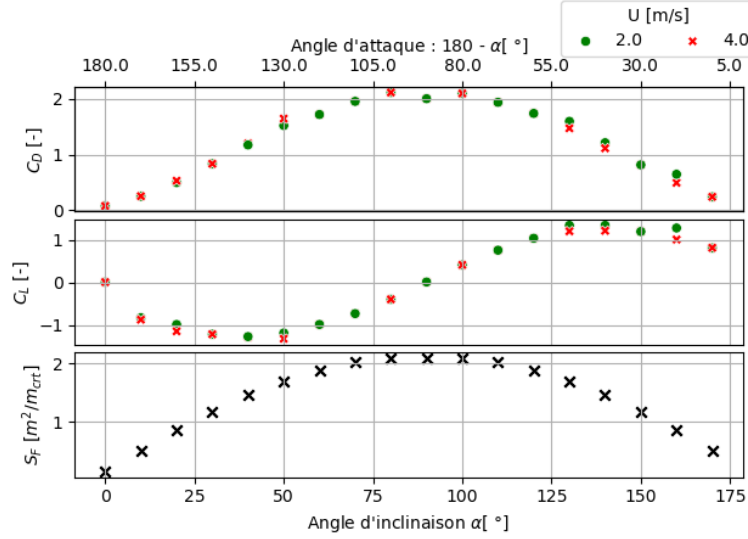


FIGURE 4.8 – Coefficients des forces de trainée et de portance en fonction de l’angle d’inclinaison du panneau. La surface de référence utilisée pour normaliser les forces est la surface du panneau. C_D correspond au coefficient de trainée. C_F correspond au coefficient de portance. S_F correspond à la surface frontale. α correspond à l’angle d’inclinaison décrit sur la Figure 3.3.

4.3 Contraction inertielle

La contraction inertielle engendre une accélération du flux en aval du premier panneau où des vitesses importantes sont rencontrées (Figure 4.9 - a). Cette réduction de section produit, en plus, une baisse de la pression qui va être en partie effacée quand le flux décélère. Les figures 4.9 c) à g) montre l’évolution des profils des pressions et des vitesses sous le tracé de la particule la plus haute. On observe, au début, un front large et marqué de vitesses qui s’amenuise plus en aval de l’écoulement.

Aucune influence de la vitesse n’a été observée sur cette contraction lors de ce travail (Annexe 7.6) sauf pour les vitesses très faibles où H_{in} et $C - r$ varient très légèrement, ce qui diminue la contraction. Néanmoins, la comparaison des résultats avec l’Équation 3.19, qui représente l’effet Venturi, montre que les deux jeux de vitesses sont similaires (Table 4.2). En outre, cela montre les caractéristiques de contraction d’un panneau à bord rectangulaire et, notamment, que le coefficient de contraction est de l’ordre de 0.72.

De même, les formes testées ont aussi une influence négligeable sur la contraction observée (Figure 4.10) avec des effets sur les paramètres qui se contrebalancent. Par exemple, le biseau inversé engendre une contraction moins forte (un C_r plus important). Mais la section d’entrée étant plus grande, la quantité de masse qui passe est plus importante également. Cela se traduit, au final, par une vitesse moyenne à la contraction assez proche de celle des autres formes.

On peut, par contre, observer, sur la Figure 4.11, un effet de la hauteur de dégagement sur cette contraction. En effet, en normalisant H_{in} par H_{cl} , cette dernière fait diminuer le quotient. On remarque également une variation de $\frac{d}{H_{cl}}$, ce qui indique donc un changement non proportionnel à H_{cl} de la localisation de la contraction. La vitesse moyenne à la contraction augmente avec la hauteur de dégagement car le profil des vitesses à l’entrée est non uniforme. Sur cette figure, elle a été normalisée par la vitesse moyenne de la section d’entrée.

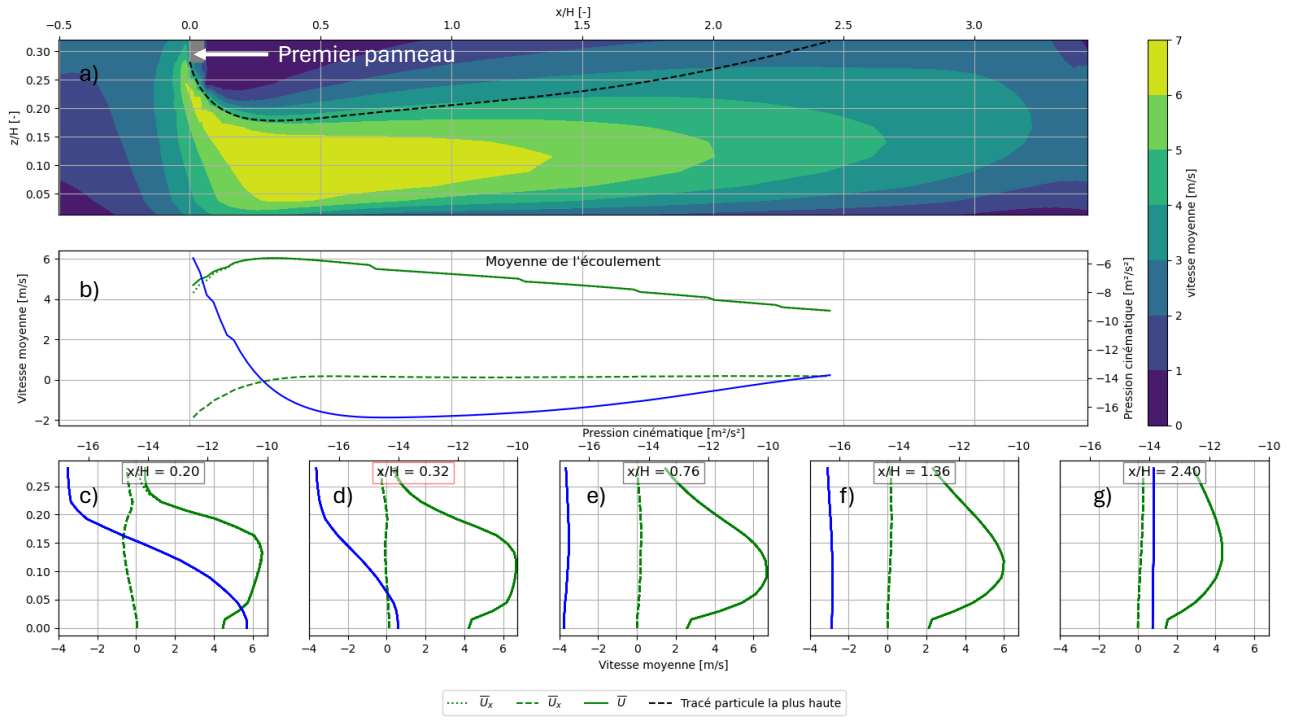


FIGURE 4.9 – Exemple de l’effet de contraction inertielle observé sous le premier panneau. La courbe noire en pointillés représente le tracé de la particule la plus haute qui passe sous le premier panneau pour un cas dont la vitesse d’entrée à 2m de hauteur est de 5 m s^{-1} . Les courbes bleues représentent la pression, les courbes vertes pleines représentent l’amplitude de la vitesse, les courbes vertes en traits représentent la vitesse horizontale, les courbes vertes en pointillés représentent la vitesse verticale. (a) Champs de l’amplitude des vitesses, (b) Vitesses et pressions moyennes sous le tracé de la ligne de courant la plus haute. (c) - (e) : profils des vitesses et pressions de différentes sections sous le tracé de la particule la plus haute. Le graphique (d), en rouge, correspond à la section de la vitesse maximum.

TABLE 4.2 – Résultat de la comparaison entre les vitesses à la contraction et le modèle de Venturi pour des vitesses allant de 1 à 20 m s^{-1}

r^2	$RMSE[m/s]$
0.999	0.064

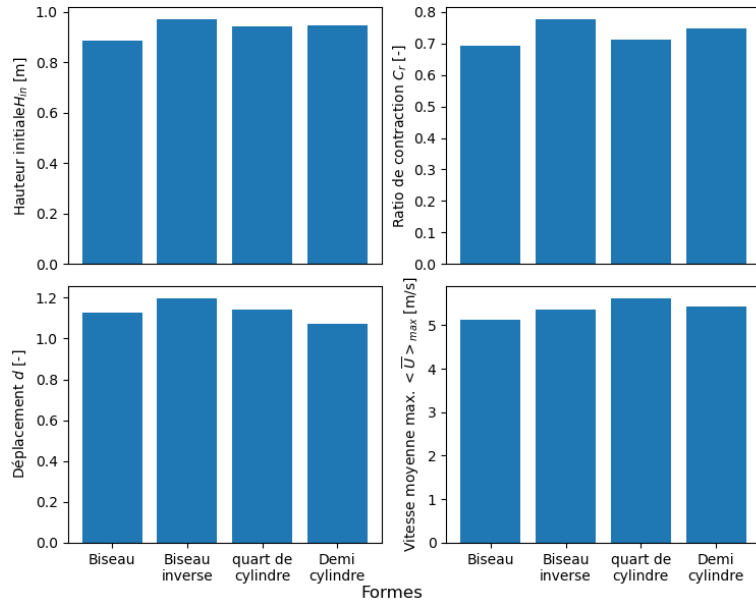


FIGURE 4.10 – Impact de la forme des panneaux sur la contraction en aval de la première rangée pour une vitesse d’entrée à 2 m de hauteur de 5 ms^{-1} . C_r est le ratio de contraction. $\frac{d}{H_{cl}}$ est la distance normalisée par la hauteur de dégagement entre le panneau et la section de contraction maximum. \bar{U}_c correspond à la vitesse moyenne de la section de contraction maximum. H_{in} est la hauteur d’entrée.

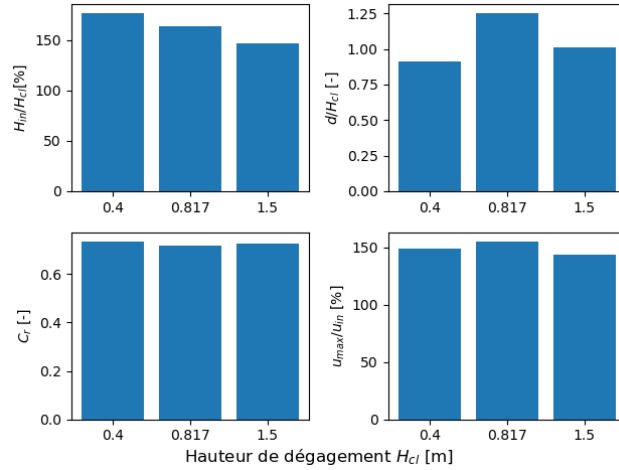


FIGURE 4.11 – Paramètres de la contraction inertielle en fonction de la hauteur de dégagement. La vitesse d’entrée à 2 m est de 5 ms^{-1} . C_r est le ratio de contraction. $\frac{d}{H_{cl}}$ est la distance normalisée par la hauteur de dégagement entre le panneau et la section de contraction maximum. \bar{U}_c correspond à la vitesse moyenne de la section de contraction maximum. H_{in} est la hauteur d’entrée. u_{in} est la vitesse moyenne de la section d’entrée (H_{in}).

En ajoutant une canopée de plantes, on observe (Figure 4.12) une variation importante de la contraction surtout en terme de ratio de contraction et de position de la section (d) avec le stade de développement des plantes. L’annexe 7.6 présente le champ global des vitesses pour les différents stades de culture du blé.

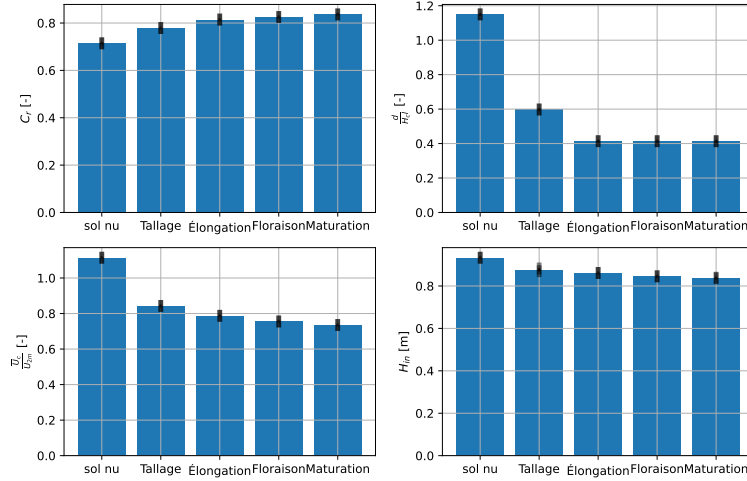


FIGURE 4.12 – Effet du stade de culture sur la contraction observée sous le premier panneau. C_r est le ratio de contraction. $\frac{d}{H_{cl}}$ est la distance normalisée par la hauteur de dégagement entre le panneau et la section de contraction maximum. \bar{U}_c correspond à la vitesse moyenne de la section de contraction maximum. H_{in} est la hauteur d'entrée. U_{2m} est la vitesse d'entrée à 2 m. Les barres noires représentent l'intervalle de confiance (95%) autour de la moyenne pour 4 vitesses d'entrée testées (3, 5, 10, 15 ms^{-1}).

4.4 Transport de l'eau

Le domaine de modélisation pour les cas de référence sans panneaux est similaire à ceux avec panneaux en termes de dimensions. La seule différence est l'absence de panneaux.

4.4.1 Dorinne

Une résistance fonction du rayonnement photosynthétiquement actif a été calibrée sur les données issues de la station de ICOS de Dorinne : $r_{st} = \frac{1}{3.72 \times 10^{-4} \times PAR - 1.01 \times 10^{-7} \times PAR^2 + 9.80 \times 10^{-3}}$. Les résultats de calibration obtenus sont repris sur la figure 4.13 et, pour comparaison, la figure 4.14 compare la prairie de Dorinne avec une prairie similaire sous agri-PV vertical. On voit que les panneaux, en ne modélisant que l'effet sur le vent, ont tendance à diminuer le flux d'évapotranspiration surtout quand ce dernier est plus important. Enfin, la figure 4.15 montre la répartition du flux d'évapotranspiration de la prairie de Dorinne sous Agri-PV tout au long du domaine. On remarque un flux non-uniforme mais avec une structure répétée à chaque rangée de panneaux avec un pic d'évapotranspiration à chaque panneau. La figure montre aussi un flux plus faible entre les rangées n°2 et n°3.

4.4.2 Vitesse d'entrée

L'augmentation de la vitesse d'entrée engendre un flux de vapeur d'eau plus important (Figure 4.16). Le lien entre les deux est non linéaire pour les vitesses testées. Les différentes courbes présentent les résultats de l'Équation 3.23 en fonction de deux paramètres z_0 et r_{st} . La courbe verte correspond à la fonction ajustée sur les résultats des simulations de la prairie sans les panneaux, la courbe rouge est celle ajustée sur les résultats des simulations de la prairie avec panneaux et la courbe bleue est un entre-deux où z_0 a été ajusté en maintenant r_{st} à la valeur de la courbe verte.

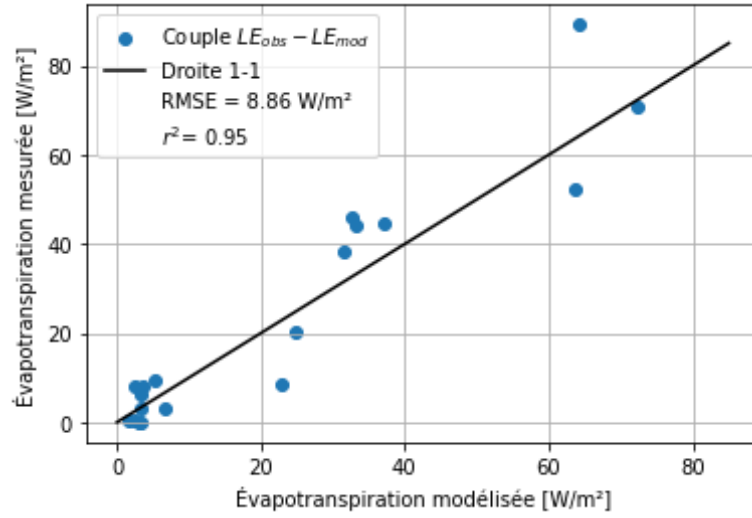


FIGURE 4.13 – Résultats de calibration sur la prairie de Dorinne. LE_{mes} : Flux d'évapotranspiration mesuré par covariance des turbulences. LE_{mod} : Flux d'évapotranspiration modélisé par CFD. $RMSE$: Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne. r^2 : Coefficient de corrélation.

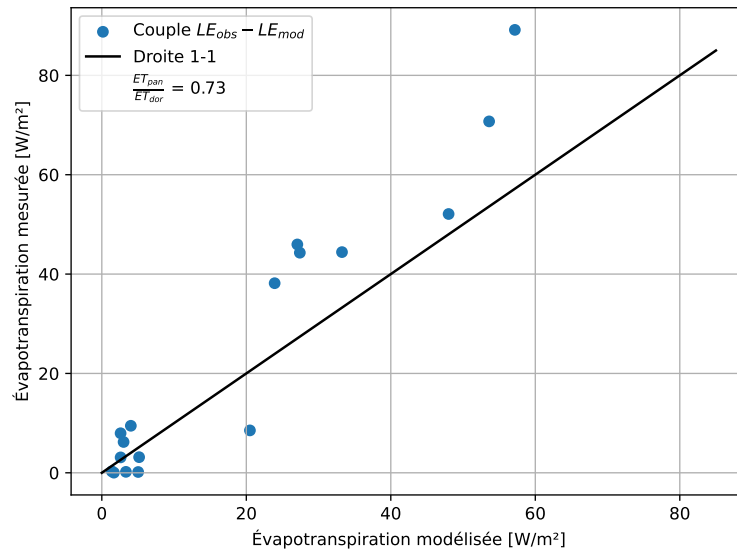


FIGURE 4.14 – Comparaison entre les données d'évapotranspiration mesurée à Dorinne par covariance des tourbillons et l'évapotranspiration de cette prairie modélisée sous agri-PV vertical.

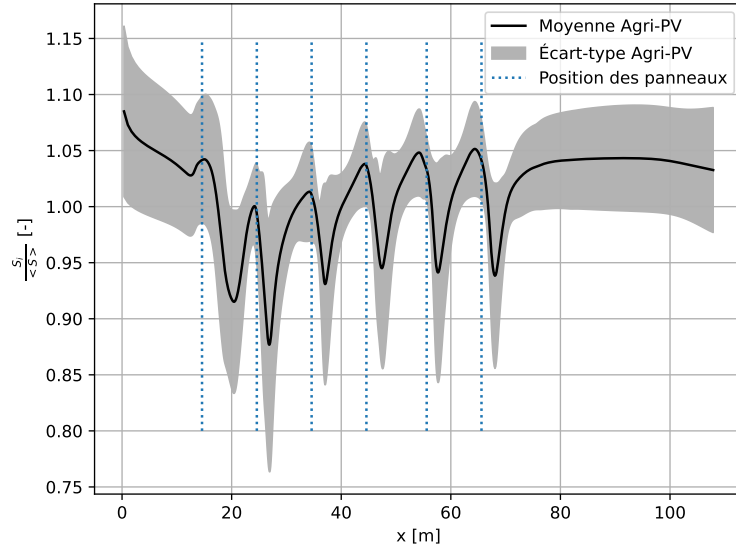


FIGURE 4.15 – Transect de l'évapotranspiration normalisée par la moyenne du transect de la prairie de Dorinne sous Agri-PV. La courbe noire présente la moyenne des transects normalisé par la moyenne du transect pour le jeu de données de Dorinne. La zone grisée représente l'écart-type autour du transect moyen. Les lignes bleues en pointillés indiquent la localisation des panneaux. S_i correspond à la densité de flux $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$. $\langle S_i \rangle$ correspond à la moyenne de la densité de flux.

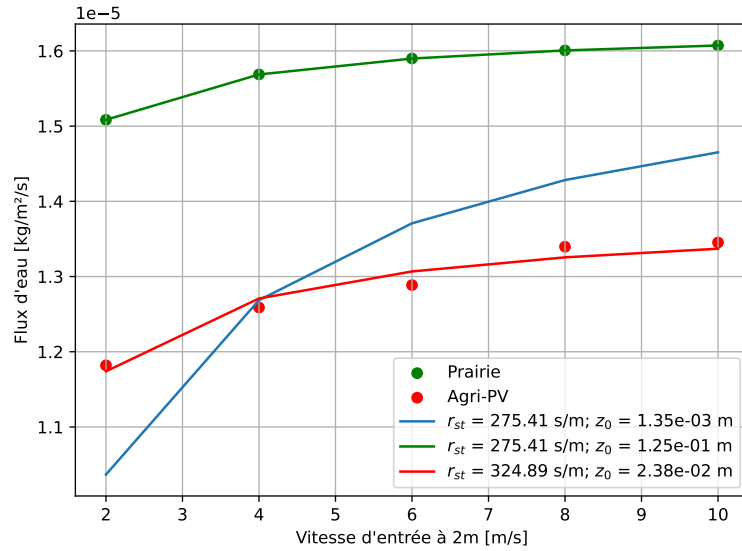


FIGURE 4.16 – Évolution l'évapotranspiration en prairie et sous Agri-PV en fonction de la vitesse d'entrée à 2m de hauteur. Prairie : prairie pâturée, Agri-PV : Agrivoltisme (même schéma de canopée que la prairie). Les points indiquent les résultats des simulations. Les courbes correspondent à l'équation 3.23 pour plusieurs couples de paramètres r_{st} et z_0 . Pour l'ensemble des simulation s^* est égal à 0.0148 kg m^{-3} et s_{ref} à 0.0103 kg m^{-3} .

Chapitre 5

Discussion

5.1 Réalisme des modèles et performance des méthodes

Nous avons vu, dans les résultats, que les forces aérodynamiques subies par les panneaux sont une fonction quadratique de la vitesse d'entrée. Cette observation est cohérente avec la théorie de l'aérodynamisme. En effet, comme le montrent les équations 2.2 et 2.3, les forces dépendent de la pression cinématique du fluide qui est elle-même, à un facteur près, le carré du module de la vitesse. De plus, les coefficients obtenus correspondent également à la littérature. Comme cela a été expliqué dans l'introduction, le coefficient de traînée d'une plaque plate faisant face à l'écoulement vaut 2 (Hoerner, 1965; Aziz et al., 2008).

Concernant les panneaux inclinés, la NASA (Wick, 1954), parmi d'autres (Fage et al., 1997; Shademan and Hangan, 2009), a réalisé de nombreux tests et modèles sur des plaques inclinées pour l'installation de panneaux photovoltaïques. Les courbes obtenues dans ce travail sont consistantes avec ces essais dont les résultats ont la même allure avec des valeurs maximum et minimum similaires qui surviennent aux mêmes angles. La courbe C_L , fortement influencée par la séparation de l'écoulement, voit sa valeur chuter soudainement entre les angles d'attaque de 10° et 20° pour remonter tout aussi vite. Ce TFE n'a pas exploré cette gamme d'angles, mais on peut néanmoins voir l'apparition de cette fameuse séparation de l'écoulement pour les angles d'inclinaison supérieurs à 10° et inférieurs à 170° (Figure de l'annexe 7.5). Enfin, les légères différences (de l'ordre de 10^{-1}) dans les valeurs des coefficients aérodynamiques entre les tests de la NASA et ce travail sont probablement causées par le profil non uniforme des vitesses utilisé à l'entrée dans ce travail et la présence du sol à proximité du panneau.

Par ailleurs, avec l'effet de contraction sous le premier panneau, nous voyons que l'accélération observée est cohérente avec l'effet Venturi et la loi de conservation de la masse (Équation 3.19). En effet, les valeurs de vitesses à la contraction calculées à l'aide de ces lois sont extrêmement proches des valeurs obtenues par modélisation. De plus, l'évolution de la pression moyenne de l'écoulement sous le tracé de la particule la plus haute rappelle également l'effet Venturi avec une chute de la pression causée par l'accélération et une augmentation des pressions quand le fluide décélère. Dans notre cas, la pression ne revient pas à son état initial et le minimum ne se situe pas au niveau de la contraction maximale car il y a probablement une perte de charge locale causée par l'interaction avec le panneau et le sol.

Enfin, concernant le transport de la vapeur d'eau, on voit, en comparant la Figure 4.13 avec l'annexe 7.7.1, que les résultats sont très dépendants de la résistance stomatique. Or, la modélisation de cette structure n'étant pas le cœur de ce travail, il n'a pas été possible de valider les résultats obtenus. Certains tests ont été réalisés sur d'autres prairies disponibles dans la base de données d'ICOS pour valider les modèles de transport. Mais, le modèle utilisé pour la résistance stomatique est trop simple et ne permet pas de prendre en compte les différences entre prairies, ce qui n'a donc pas mené à des résultats pertinents. Néanmoins, la performance, en calibration, sur les données issues de la station ICOS de Dorinne, montre que le modèle est capable de fournir des valeurs d'évapotranspiration cohérentes. En outre, nous avons vu que ce flux augmente avec la vitesse pour les simulations sans panneaux en suivant l'Équation 2.4 qui est applicable dans de telles conditions¹ (Kaimal and Finnigan, 1994; Shuttleworth and Wallace, 1985; Monteith, 1965). D'ailleurs, l'équation 3.23 montre clairement que cette relation correspond à la multiplication entre une droite et une fonction inverse.

1. présence d'une couche limite de surface stable

5.2 Forces aérodynamiques

On a pu voir, dans les résultats du modèle de centrale à 6 rangées, que le premier panneau subissait la majeure partie de la charge de vent et faisait office de bouclier vis à vis des autres centrales. Ce résultat, assez logique, fait écho à certains articles scientifiques (Choi et al., 2022; Shademan and Hangan, 2009). Shademan and Hangan (2009) ont observé, dans les résultats de leurs simulations, une réduction de deux tiers du coefficient de trainée à partir de la deuxième rangée pour un modèle démonstrateur à 3 rangées inclinées à 30° . Choi et al. (2022) ont, eux, conduit une expérimentation sur des centrales PV flottantes composées de panneaux inclinés à 15° répartis sur 6 rangées. Ils ont également observé un effet brise-vent généré par la première rangée avec une réduction des coefficients allant de 75 à 90%. Ces résultats sont à mettre en perspective avec la géométrie globale des centrales étudiées et en particulier avec l'écartement entre les panneaux comme le montrent Shademan and Hangan (2009). L'effet bouclier obtenu dans ce travail est important (aux alentours de 90% de réduction du C_D) toutefois, par rapport à la littérature, les panneaux sont verticaux et la première rangée subit donc des efforts plus importants. Enfin, le modèle de turbulence utilisé ($k - \omega SST$), bien que plus performant en cas de séparation par rapport aux autres modèles de la même famille, utilise tout de même l'hypothèse de Boussinesq concernant la turbulence. Or, cette dernière engendre une condition isotrope de la turbulence, ce qui n'est pas forcément le cas dans des conditions de forte séparation de l'écoulement. Cela va engendrer une sous estimation du tenseur de Reynolds (Johnson et al., 1994). Et, in fine, une surestimation de la séparation de l'écoulement, (Menter et al., 2003) qui peut donc amener à une surestimation de l'effet bouclier. Nous voyons donc qu'il est possible d'optimiser la conception des structures Agri-PV, en diminuant la quantité de matériaux des structures portantes qui ne sont pas aux bords des centrales, afin d'amoinrir les coûts de production de l'Agri-PV et d'obtenir une énergie, in fine, moins chère.

L'effet de la hauteur de dégagement sur les forces aérodynamiques observé dans ce travail peut être expliqué par deux facteurs (Figure 4.6). Le premier est le profil des vitesses qui est non-uniforme. Cela induit que plus le panneau est placé haut, plus l'écoulement qui lui fait face est rapide et plus les forces de trainées sont importantes. Ensuite, la présence du sol contraint d'avantage l'écoulement et va avoir une influence sur l'écoulement sous le premier panneau (Figure 4.11). Pour les faibles hauteurs de dégagement, la hauteur d'entrée H_{in} va être, proportionnellement, plus importante que pour les hauteurs supérieures ce qui va engendrer une accélération accrue et donc une chute des pressions d'autant plus grande sous le premier panneau et en aval. Ce phénomène d'aspiration correspond à l'effet sol, détaillé dans l'introduction (Pieris et al., 2023, 2022; Zerihan, 2001).

Dans l'aérodynamisme classique, le théorème utilisé pour analyser les forces sur des profils est celui de Kutta-Joukowski (K-J)² qui explique les forces de portance par la circulation de la vitesse autour de ceux-ci (Anderson and Cadou, 2023). Deux méthodes ont été essayées pour calculer la circulation autour des panneaux inclinés mais aucune des deux n'a eu de résultats pertinents. La première calculait directement la circulation d'un cercle autour du profil alors que la seconde passait par l'intégrale de la vorticité sur la surface délimitée par ce cercle. Le problème des deux méthodes est que la valeur calculée dépendait du rayon du cercle. En effet, le théorème K-J n'est valable que pour des écoulements incompressibles et non-visqueux, et la circulation, dans ces conditions est effectivement constante peu importe la taille du cercle utilisée (Anderson and Cadou, 2023). Or, dans le cas présent, le panneau et les conditions limites contraignent probablement trop l'écoulement pour se rapprocher des conditions d'application du théorème. Néanmoins, quand le panneau est proche de l'horizontale et donc qu'il n'engendre pas de séparation de l'écoulement, ce théorème peut être utilisé avec le modèle de la plaque mince afin d'obtenir une équation pour le coefficient de portance (Liu, 2021) : $C_L = 2\pi\alpha$ où alpha est l'angle d'attaque. Pour les angles d'inclinaison de 10° et de 170° , cela donne respectivement 1.09 et -1.09. Ces valeurs sont assez proches de ce qui a été obtenu sur la Figure 4.8. Les différences peuvent provenir de l'effet sol détaillé dans le paragraphe précédent.

5.3 Contraction inertielle

Les phénomènes de contraction sont surtout étudiés pour des orifices, des tuyaux fins ou des vaisseaux sanguins et pas vraiment pour des structures aussi grandes que celles présentées dans mon travail (Dayev and

2. Le théorème de Kutta-Joukowski explique la force de portance par la circulation d'un écoulement autour d'un profil.

$$L = \rho U_\infty \Gamma$$

La circulation est une mesure globale de la rotation. Le théorème de Stokes permet de faire le lien entre cette mesure et son homologue local : la vorticité

$$\Gamma = \oint_c \mathbf{u} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S (\nabla \times \mathbf{u}) \cdot d\mathbf{s}$$

Kairakbaev, 2019; DeGroff et al., 1998). Nous avons vu que le coefficient de contraction pour un panneau à bord rectangulaire est de l'ordre de 0.72. Ce résultat concorde avec la littérature. En effet, DeGroff et al. (1998) propose un modèle analytique de ce phénomène pour des orifices dont la géométrie ressemble à celle du bas d'un panneau qu'il a validé avec des données. Ces dernières sont comprises entre 0.7 et 0.75, alors que son modèle propose un coefficient de 0.8. Dayev and Kairakbaev (2019) ont, également, étudié des orifices sanguins, possédant des géométries proportionnellement proches de celles rencontrées dans ce travail, à l'aide de modèles numériques. Ils ont trouvés des valeurs allant de 0.6 à 0.9 en fonction du nombre de Reynolds et de la nature turbulente ou laminaire des modèles utilisés.

Quelques articles liés à l'étude de structures surélevées dites "brise-vent" (haies, barrières artificielles) montrent également la présence de l'effet Venturi sans le caractériser comme cela est fait dans mon travail (He and Shao, 2024; Wang et al., 2024; McClure et al., 2017). He and Shao (2024) ont montré un ratio d'augmentation de la vitesse en dessous de la structure brise-vent allant de 1.2 à 1.4 en fonction de la porosité. Wang et al. (2024) ont montré, à l'aide de modèles LES, une augmentation d'environ 1.25. McClure et al. (2017) ont réalisé des expérimentations sur des modèles réduits possédant une porosité de 50% dans un tunnel de vent. Ils ont montré une accélération légèrement supérieure à 1 pour une hauteur de dégagement de 10% de la hauteur du modèle réduit. Ces valeurs sont légèrement en dessous de ce qui est observé dans mon travail (1.5). Ces différences peuvent être expliquées par le caractère poreux des barrières modélisées dans ces études. D'ailleurs, cette augmentation locale de la vitesse relative au panneau est probablement inférieure à 1.5 car les structures Agri-PV ont aussi une certaine porosité (espace inter-panneaux, espace entre les poteaux et les panneaux, etc.).

Un effet surprenant observé dans ce travail est l'ordre de grandeur de H_{in} qui, alors qu'on aurait pu penser le contraire a priori, ne correspond pas à $H_{cl} + \frac{H_p}{2}$ mais est inférieur (0.93 pour panneau à bord rectangulaire). Cet effet est probablement causé par le profil des vitesses non uniforme à l'entrée et par la présence du sol. En effet, les Figures 7.14 et 7.15 de l'annexe 7.6 nous montrent que la pression adverse en bas de profil provoque une remontée de l'écoulement devant le premier panneau, où la pression est très importante, vers l'écoulement libre, où la pression est plus faible. Les sections qui suivent H_{in} vont, donc, voir leur taille augmenter jusqu'à la moitié de la hauteur du premier panneau. L'air se trouvant au dessus va être expulsé par le haut en accélérant lui-même et en entraînant les couches au-dessus. L'air se trouvant sous la moitié panneau va être entraîné vers le bas. La Figure 4.11 vient conforter cette remarque en montrant l'influence de la hauteur de dégagement sur l'écoulement sous le premier panneau. Une hauteur de dégagement plus importante va augmenter les pressions devant le panneau car l'écoulement qui lui fait face est plus rapide à cause du profil de vitesse, ce qui va engendrer un appel vers le haut plus important et donc un H_{in} proportionnellement plus faible (Figure 7.14 et 7.15). La hauteur de dégagement modifie, également, la localisation de la section de contraction maximum. L'effet est non linéaire et engendre une section plus proche du premier panneau quand la hauteur de dégagement est la plus faible ou la plus importante des trois hauteurs testées. La valeur de 0.5 est assez classique comme distance normalisée à l'orifice (Shashi Menon, 2015). Elle est assez loin des valeurs proposées dans ce travail, mais elle convient pour des systèmes d'orifice dans des tuyaux dont le fluide et la géométrie en question sont très différents des cas étudiés ici. Enfin, l'écoulement sous le premier panneau, et particulièrement à cette distance dépendent fortement de la précision des mailles, il est donc possible que le maillage choisi ait encore une influence non négligeable sur cette valeur.

Les plantes agissent comme une barrière à l'écoulement et vont fortement modifier l'écoulement en aval du premier panneau en terme de vitesse et de localisation de la contraction maximum. En effet, les plantes vont prendre une partie de la quantité de mouvement du fluide en générant un blocage (Wilson and Shaw, 1977). Il en résulte qu'une quantité plus faible de masse va passer (H_{in} diminue). Dans le même temps, la partie du flux qui continue de passer en dessous du premier panneau va monter au dessus des plantes (diminution de d/H_{cl}) et ainsi diminuer la contraction (C_r se rapproche de 1). Ce qui va d'autant plus réduire la vitesse à la contraction.

Les considérations apportées dans cette section portent à réfléchir sur la taille des démonstrateurs Agri-PV et les mesures réalisées au sein de ceux-ci. En effet, un flux d'air important est développé en aval du premier panneau surtout quand le sol est nu. Ce dernier pourrait avoir des conséquences agronomiques hypothétiques telles qu'une érosion accrue du sol à cet endroit, ainsi qu'une évapotranspiration plus importante ou des dégâts mécaniques sur les jeunes plants. In fine, cela pourrait engendrer, par exemple, des retards de levée et de croissance.

5.4 Transport de la vapeur d'eau

On a vu que l'agrivoltaïsme avait tendance à diminuer l'évapotranspiration (d'un facteur 0.7) sur l'exemple de la prairie de Dorinne en ne prenant que les effets aérodynamiques en compte. Nous remarquons que pour

ajuster correctement le modèle flux-gradient aux résultats des simulations, il a été nécessaire d'augmenter la résistance stomatique et de diminuer la longueur de rugosité. L'augmentation de la résistance stomatique peut être expliquée par le fait que la centrale agit comme une résistance supplémentaire (de l'ordre de 50 s m^{-1}) au transfert qui ne dépend pas des conditions turbulentes de l'atmosphère. La diminution de la longueur de rugosité est plus délicate à interpréter. En effet, elle est sensée augmenter avec la rugosité de la surface et avec la turbulence. Mais, comme le modèle correspond à un démonstrateur de petite taille, la couche limite atmosphérique de surface n'a probablement pas l'espace pour se développer. Il n'est donc que peu pertinent de considérer l'Équation 2.5 comme modèle pour la résistance atmosphérique. Pour preuve, même la courbe qui convient le mieux aux résultats des simulations pour l'agri-PV ne parvient pas à complètement les retrouver. C'est, sans doute, causé par la présence de flux verticaux non pris en compte par l'équation.

Néanmoins, l'effet sur l'évapotranspiration n'est pas uniforme. Le transect semble assez peu variable pour les conditions de la prairie de Dorinne et peut être expliqué à l'aide des cartes des champs des vitesses et de la concentration en vapeur d'eau (Annexe 7.7.1). On voit, en effet, que les zones sous les panneaux qui ont un flux de vapeur d'eau plus important, correspondent aux endroits où la concentration en vapeur d'eau est plus faible. Cela a du sens vu l'équation d'évapotranspiration introduite en 3.11. Pour comprendre le patron de concentration observé, il faut s'intéresser au champ des vitesses, et plus particulièrement, aux lignes de courant qui en dérivent. En effet, sous chacun des panneaux, on voit un courant qui vient balayer l'air humide et en apporter du sec qui vient d'une hauteur plus haute. Il en résulte donc un flux d'eau préférentiel à ces endroits. Les endroits où le flux est faible correspondent à des zones humides. Ces zones sont alimentées, pour chacune des inter-rangées, par deux cellules tournant en sens inverse. Elles viennent rassembler la vapeur d'eau dans la partie gauche des inter-rangées car la cellule de droite est plus grande. Seule l'inter-rangée n°1 s'écarte de ce récit. En effet, c'est le flux d'air qui vient de la zone de contraction discutée dans la partie précédente qui, vu sa célérité, va balayer la prairie jusque dans la partie droite de l'inter-rangée. Cela va se traduire en un minimum d'évapotranspiration du côté droit pour la première inter-rangée. Pour les inter-rangées suivantes, la différence de taille des cellules est causée par le flux d'air qui passe au dessus de la centrale et qui va de gauche vers la droite. Ce flux va entraîner, par contraintes visqueuses et turbulentes, l'air au sein de la centrale et le faire tourner dans le sens horaire. Et, le flux qui passe en dessous des panneaux va entraîner l'air dans l'autre sens.

Les discussions étayées dans le paragraphe précédent sont basées sur des simulations d'une prairie sous Agri-PV, et ne sont donc pas forcément valables pour d'autre type de canopées. Les simulations de l'évapotranspiration sur d'autres types n'ont pas pu être réalisées par manque de temps. Néanmoins, les simulations utilisées pour décrire la contraction inertielle peuvent être utilisées pour extrapoler les résultats d'évapotranspiration. Dans le cas d'un sol nu, on voit que le flux qui passe sous le premier panneau ne remonte pas avant le deuxième panneau. Il y aura donc, sans doute, un flux de vapeur d'eau très important en dessous du premier panneau et qui va progressivement diminuer jusqu'à la moitié de la deuxième inter-rangée où on rencontre le patron identifié dans la première inter-rangée des simulations d'Agri-PV sur prairie. Les inter-rangées trois et quatre correspondent à des systèmes mono-cellules causés par l'absence d'écoulement important passant sous les panneaux les bordant qui viendrait casser ces cellules en deux. Ces cellules vont probablement balayer le centre des inter-rangées où l'évapotranspiration sera plus importante tandis qu'un stock plus important d'eau se développera à proximité des panneaux entraînant, ainsi, une diminution du flux de chaleur latente. Les deux dernières inter-rangées ressemblent fortement à celles de la prairie. Un exercice similaire peut être réalisé sur les simulations avec les canopées mixtes de froment et de zone tampon. On remarque que tous les patrons ont été décrits précédemment sauf celui de la première inter-rangée qui se complexifie avec la croissance du froment et qui laisse supposer deux zones de stockage de la vapeur d'eau pour les stades phénologiques les plus avancés.

L'approche en contrôle de volume n'a pas pu être implémentée correctement en python. En effet, la comparaison avec le terme source montre une différence importante entre les deux. De plus, l'annexe 7.7.2 est composée de quelques graphiques qui présentent une analyse de sensibilité en fonction de la hauteur du volume de contrôle et la somme des flux varie en fonction de cette hauteur alors que cela ne devrait pas être le cas pour les hauteurs considérées dans cette analyse. L'erreur vient, probablement, du passage de champs volumiques vers des champs surfaciques et d'une mauvaise gestion du maillage non-uniforme présent dans ce travail. Toutefois, l'équation développée dans le chapitre *Matériel et méthodes* semble être une voie intéressante pour étudier le devenir et le transport de la vapeur d'eau. En effet, cette dernière permet de diviser le flux en composantes horizontales et verticales et en moyen de transport. Notamment, elle pourrait permettre d'étudier les flux préférentiels générés par les panneaux ainsi que le flux turbulent vertical pour essayer de comprendre comment la structure agrivoltaïque affecte la résistance aérodynamique de l'air au transfert de vapeur d'eau. Pour y parvenir, un travail futur devra être réalisé pour implémenter ce calcul directement sur OpenFoam. En effet, il pourrait être envisageable de directement intégrer le calcul dans les simulations à l'aide des fonctions de haut-niveau disponible sur ce logiciel telles que *surfaceInterpolate* pour interpoler les champs volumiques afin de générer des champs surfacique, *areaNormalAverage* et *areaAverage* pour calculer les moyennes des différents

scalaires et vecteurs en tenant compte de la non-uniformité des cellules.

Une étude de 2020 s'est intéressée à l'évapotranspiration d'une centrale photovoltaïque à panneaux inclinés montés sur des toits végétalisés au moyen de lysimètres (Jahanfar et al., 2020). Ils ont montré des réductions de l'ET journalière sous les panneaux allant de 30% jusqu'à 70% en fonction des mois de l'année en intégrant, dans leur analyse, aussi bien l'ombrage que l'effet coupe-vent des panneaux, en montrant que la réduction de la vitesse du vent diminue le flux de vapeur d'eau. Néanmoins, les auteurs travaillant sur l'effet coupe vent de haies et autres structures associées ne sont pas aussi catégoriques sur la réduction de l'évapotranspiration. Selon Wang et al. (2001), l'effet des structures brise-vent sur l'écoulement va être très dépendant de la porosité de ceux-ci et de leur géométrie. De fait, les conclusions tirées précédemment n'ont donc qu'une gamme de validité assez faible. Et, les conséquences en terme d'évapotranspiration peuvent donc être très différentes en fonction de la géométrie de la centrale. Par exemple, Brenner et al. (1995) ont trouvé que l'évapotranspiration augmentait derrière des haies coupe-vent dans le Sahel à cause de deux effets. Premièrement, une hausse des températures au sol a été remarquée pendant l'expérimentation, augmentant la concentration de vapeur d'eau dans les cavités stomatiques. Comme cela a été expliqué dans l'introduction, des observations similaires, sous Agri-PV, ont été faites en hiver (Feistel et al., 2022). Deuxièmement, la surface foliaire des plantes derrière la haie coupe-vent a augmenté induisant, ainsi, une diminution de la résistance stomatique. Dans son article de revue, Cleugh (1998) présente une distribution spatiale hypothétique du changement en concentration d'un scalaire derrière une haie brise-vent qui est différent de ce qu'on peut observer derrière le dernier panneau de la centrale. Cette distribution montre un pic dans la concentration juste en aval de la haie avec ensuite une diminution par la suite. Ces écarts peuvent être expliqués par la présence d'un écoulement préférentiel sous les panneaux alors que la présence d'une barrière poreuse va diminuer cet écoulement préférentiel (cf. section précédente) et potentiellement engendrer un système mono-cellule qui va accumuler le scalaire proche du brise-vent.

Chapitre 6

Conclusion

Nous avons vu que les modèles développés dans ce travail de fin d'études avaient des comportements, sur des cas bien étudiés, proches des lois physiques fondamentales qui régissent les écoulements et les phénomènes de transport. En outre, ces modèles sont capables de fournir l'évapotranspiration d'une prairie pâturée avec une précision acceptable.

Ce TFE montre qu'OpenFoam possède une série de fonctionnalités pour modéliser des écoulements complexes. En effet, on a pu voir au cours des différents chapitres, les performances de ce logiciel pour la modélisation du microclimat sous Agri-PV :

- Ce logiciel comporte des modèles de turbulence variés permettant d'adopter une approche moyennée moins coûteuse en temps de calcul et finesse du maillage ;
- OpenFoam permet la modification des équations de transport via l'ajout de termes sources/puits, mais aussi par la recompilation du code source des solveurs. Il est notamment possible d'ajouter des équations de transport passif et d'utiliser une analogie résistive pour ajouter un flux de scalaire.
- OpenFoam possède de nombreux éléments de pré- et post-traitement pour la parallélisation, le maillage, les calculs de forces, de moyenne, etc.

Il reste, néanmoins, un travail de modélisation conséquent à réaliser. Trois points sont importants.

Le premier est l'ajout des autres variables microclimatiques telles que la température et le rayonnement à travers une équation de transport pour l'énergie interne pour pouvoir modéliser les flux dans des conditions atmosphériques non-neutres. OpenFoam possède, d'ailleurs, plusieurs solveurs permettant d'intégrer ces aspects comme *buoyantBoussinesqSimpleFoam* qui permet de rester dans une approche incompressible grâce à l'approximation de Boussinesq. L'introduction de ces variables pourrait permettre, notamment, d'étudier le refroidissement de l'air par l'évapotranspiration et l'impact que cela a sur le rendement des panneaux photovoltaïques.

Le deuxième point est une meilleure caractérisation de la résistance stomatique afin de calibrer et valider le modèle sur un panel de lieux différents et de la faire varier en fonction de la localisation des panneaux. Pour cela, une option pourrait être de coupler le modèle de CFD avec un modèle de sol et de la plante afin de former un continuum sol-plante-atmosphère.

Le troisième point concerne la modélisation des turbulences et la 3D. Pour comprendre l'effet de la direction du vent sur l'écoulement autour des centrales d'inter-rang, il est nécessaire d'utiliser des géométries 3D. De plus, comme cela a été notifié dans l'introduction, la nature des turbulences en 2D est différente de celle en 3D. Donc, pour étudier plus finement les processus de transport et de couplage fluide-structure en Agri-PV, nous pensons qu'il est nécessaire de passer par des modèles 3D transitoires et plus précis (URANS, LES, DES). Ces modèles de la turbulence sont déjà implémentés sur openFoam.

Ces éléments nous permettent de conclure qu'OpenFoam est un logiciel pertinent pour la modélisation du microclimat en Agri-PV et qui possède de nombreux atouts pour une telle fonction malgré le fait qu'il ne soit pas trivial à utiliser.

Ce TFE permet également de conseiller les installateurs de centrales Agri-PV en montrant une réduction des forces aérodynamiques au sein de la centrale et donc un besoin moindre en matériaux pour la structure portante. De plus, ce travail a montré la présence d'écoulements assez forts sous le premier panneau qui pourraient perturber la croissance des plantes et in fine, amener à des conclusions erronées sur l'impact global des centrales agrivoltaïques sur le rendement lors d'essais agronomiques et de comparaison avec des zones témoins.

Un dernier apport de ce TFE est qu'il a montré la forte hétérogénéité qu'il pouvait y avoir sur un démonstrateur agrivoltaïque en termes d'évaporation et d'écoulements. Un pattern d'évapotranspiration a été identifié avec des

flux plus importants à proximité des panneaux. Ces éléments peuvent servir de base pour mettre au point des expérimentations. Par exemple, des lysimètres peuvent être placés aux endroits caractéristiques du pattern pour appuyer et valider les conclusions de ce TFE. On peut également réaliser des mesures précises et spatialisées de l'écoulement avec vélocimétrie par image de particules ou des mesures laser dans un tunnel de vent. Ces mesures permettraient d'étudier l'écoulement sous le premier panneau, les charges statiques et dynamiques de vent subies par la centrale ainsi que la génération et dissipation des turbulences au sein de la centrale.

En résumé, les trois apports de ce TFE sont : la confirmation qu'OpenFoam peut être utilisé pour modéliser le microclimat et les écoulements au sein de parcelles agrivoltaïques d'inter-rang, la fourniture de certains conseils pour les chercheurs et les installateurs de centrales agrivoltaïques d'inter-rang et la démonstration que les centrales Agri-PV verticales modifient les échanges de vapeur d'eau et ont tendance à les diminuer. Cela ouvre une série d'opportunités d'études futures comme l'amélioration du modèle, sa validation et son utilisation pour préparer des expérimentations.

Bibliographie

- TSE, expert en développement photovoltaïque et agrivoltaïque. <https://www.tse.energy/>.
- Décret n° 2024-318 du 8 avril 2024 relatif au développement de l’agrivoltaïsme et aux conditions d’implantation des installations photovoltaïques sur des terrains agricoles, naturels ou forestiers, April 2024.
- Elnaz Hassanpour Adeh, John S. Selker, and Chad W. Higgins. Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11) :e0203256, November 2018. ISSN 1932-6203. doi : 10.1371/journal.pone.0203256.
- ADEME, I Care & Consult, Ceresco, and Cétiac. Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l’agrivoltaïsme - Guide de classification des projets et définition de l’agrivoltaïsme. Technical report, 2021a.
- ADEME, I Care & Consult, Ceresco, and Cétiac. Caractériser les projets photovoltaïques sur terrains agricoles et l’agrivoltaïsme - Etat de l’art bibliographique. Technical report, 2021b.
- Robert Aiken and N.L. Klocke. Inferring Transpiration Control from Sap Flow Heat Gauges and the Penman-Monteith Equation. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers)*, 55 :543–549, March 2012. doi : 10.13031/2013.41389.
- Alejandro Alonzo-García, Claudia Gutiérrez-Torres, and José Jiménez-Bernal. Computational Fluid Dynamics in Turbulent Flow Applications. pages 1–24. August 2016. ISBN 978-953-51-2564-8. doi : 10.5772/63831.
- Sakir Amiroudine and Jean-Luc Battaglia. *Mécanique des fluides*. Dunod, Malakoff, 4ème edition, May 2024. ISBN 978-2-10-083629-1.
- John D. Anderson, Jr and Christopher P. Cadou. *Fundamentals of Aerodynamics*. McGraw Hill LLC, seventh edition edition, January 2023. ISBN 978-1-266-07644-2.
- Ansys. Ansys Fluent | Fluid Simulation Software. <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
- AutoDesk. Logiciel Autodesk CFD | Connaître les prix et acheter CFD 2024 | Autodesk. <https://www.autodesk.be/fr/products/cfd/overview>.
- El-Sayed Aziz, Constantin Chassapis, Sven Esche, Sumei Dai, Shanjun Xu, and Ruiqing Jia. Online Wind Tunnel Laboratory. In *2008 Annual Conference & Exposition*, pages 13.949.1–13.949.19, June 2008.
- Laura Bacci, Piero Battista, Mariateresa Cardarelli, G. Carmassi, Youssef Roupahel, Luca Incrocci, Fernando Malorgio, Alberto Pardossi, Bernardo Rapi, and Giuseppe Colla. Modelling Evapotranspiration of Container Crops for Irrigation Scheduling. November 2011. ISBN 978-953-307-512-9. doi : 10.5772/18697.
- Greg Barron-Gafford, Mitchell Pavao-Zuckerman, Rebecca Minor, Leland Sutter, Isaiah Barnett-Moreno, Daniel Blackett, Moses Thompson, Kirk Dimond, Andrea Gerlak, Gary Nabhan, and Jordan Macknick. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2, September 2019. doi : 10.1038/s41893-019-0364-5.
- G. S. Beavers, E. M. Sparrow, and D. E. Rodenz. Influence of Bed Size on the Flow Characteristics and Porosity of Randomly Packed Beds of Spheres. *Journal of Applied Mechanics*, 40(3) :655–660, September 1973. ISSN 0021-8936. doi : 10.1115/1.3423067.
- Thierry Boulard, Jean-Claude Roy, Jean-Baptiste Pouillard, Hicham Fatnassi, and Ariane Grisey. Modeling of micrometeorology, canopy transpiration and photosynthesis in a closed greenhouse using computational fluid dynamics. *Biosystems Engineering*, 158 :110–133, June 2017. ISSN 1537-5110. doi : 10.1016/j.biosystemseng.2017.04.001.
- Jonas Bredberg. *On the Wall Boundary Condition for Turbulence Models*. January 2000.

- A. J. Brenner, P. G. Jarvis, and R. J. van den Beldt. Windbreak-crop interactions in the Sahel. 2. Growth response of millet in shelter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 75(4) :235–262, July 1995. ISSN 0168-1923. doi : 10.1016/0168-1923(94)02218-9.
- Roxane Bruhwyler, Pascal Brunet, Gabriel Dabadie, Etienne Drahi, Pierre Souquet, Julien Chapon, Agathe Boukouya, Bruno Delahaye, Christelle Jennet, and Frédéric Lebeau. Could Windbreak Effect Significantly Decrease Evapotranspiration in Vertical Agrivoltaics? *AgriVoltaics2022*, 2022.
- Anatoli Chatzipanagi, Nigel Taylor, and Arnulf Jaeger-Waldau. Overview of the potential and challenges for Agri-Photovoltaics in the European Union. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC132879>, April 2023. ISSN 1831-9424.
- Seok Min Choi, Chang-Dae Park, Sung-Hoon Cho, and Byung-Ju Lim. Effects of wind loads on the solar panel array of a floating photovoltaic system – Experimental study and economic analysis. *Energy*, 256 :124649, October 2022. ISSN 0360-5442. doi : 10.1016/j.energy.2022.124649.
- H. A. Cleugh. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. *Agroforestry Systems*, 41(1) : 55–84, April 1998. ISSN 1572-9680. doi : 10.1023/A :1006019805109.
- James Coombs, David Oakley Hall, Stephen Patrick Long, J. M. O. Scurlock, and United Nations Environment Programme. *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. Pergamon International Library of Science, Technology, Engineering and Social Studies. Pergamon Press, Oxford, 2nd ed. edition, 1985. ISBN 978-0-08-031998-8.
- Benjamin Dardenne. Pression de vent sur des panneaux oscillants, March 2024.
- Zh. A. Dayev and A. K. Kairakbaev. Modeling of coefficient of contraction of differential pressure flowmeters. *Flow Measurement and Instrumentation*, 66 :128–131, April 2019. ISSN 0955-5986. doi : 10.1016/j.flowmeasinst.2019.02.009.
- Xavier de Liedekerke de Pailhe and Benjamin Dardenne. Conception et optimisation de structures agrivoltaïques via modélisation paramétrique : câbles et grumes, allier légèreté et simplicité, 2023.
- Frederik De Roo and Matthias Mauder. The influence of idealized surface heterogeneity on virtual turbulent flux measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(7) :5059–5074, April 2018. ISSN 1680-7316. doi : 10.5194/acp-18-5059-2018.
- Curt G. DeGroot, Robin Shandas, and Lilliam Valdes-Cruz. Analysis of the Effect of Flow Rate on the Doppler Continuity Equation for Stenotic Orifice Area Calculations. *Circulation*, 97(16) :1597–1605, April 1998. doi : 10.1161/01.CIR.97.16.1597.
- S. Dupont, F. Gosselin, C. Py, E. De Langre, P. Hemon, and Y. Brunet. Modelling waving crops using large-eddy simulation : Comparison with experiments and a linear stability analysis. *Journal of Fluid Mechanics*, 652 : 5–44, June 2010. ISSN 1469-7645, 0022-1120. doi : 10.1017/S0022112010000686.
- C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use : Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10) :2725–2732, October 2011. ISSN 0960-1481. doi : 10.1016/j.renene.2011.03.005.
- Y. Elamri, B. Cheviron, J. M. Lopez, C. Dejean, and G. Belaud. Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems : Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, 208 :440–453, September 2018. ISSN 0378-3774. doi : 10.1016/j.agwat.2018.07.001.
- Stefan Emeis. *Wind Energy Meteorology : Atmospheric Physics for Wind Power Generation*. Green Energy and Technology. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-30522-1 978-3-642-30523-8. doi : 10.1007/978-3-642-30523-8.
- Arthur Fage, F. C. Johansen, and Horace Lamb. On the flow of air behind an inclined flat plate of infinite span. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 116(773) :170–197, January 1997. doi : 10.1098/rspa.1927.0130.
- Hui Fang, Kun Li, Gang Wu, Ruifeng Cheng, Yi Zhang, and Qichang Yang. A CFD analysis on improving lettuce canopy airflow distribution in a plant factory considering the crop resistance and LEDs heat dissipation. *Biosystems Engineering*, 200 :1–12, December 2020. ISSN 1537-5110. doi : 10.1016/j.biosystemseng.2020.08.017.
- Ulrike Feistel, Stefan Werisch, Philipp Marx, Susanna Kettner, Jakob Ebermann, and Laurence Wagner. Assessing the impact of shading by solar panels on evapotranspiration and plant growth using lysimeters. *AIP Conference Proceedings*, 2635(1) :150001, December 2022. ISSN 0094-243X. doi : 10.1063/5.0103124.

- Lucía Fernández. U.S. levelized energy costs by source 2023. <https://www.statista.com/statistics/493797/estimated-levelized-cost-of-energy-generation-in-the-us-by-technology/>, 2024.
- Víctor Manuel Fernández-Pacheco, Elena Antuña-Yudego, Juan Luis Carús-Candás, María José Suárez-López, and Eduardo Álvarez-Álvarez. An Evapotranspiration Evolution Model as a Function of Meteorological Variables : A CFD Model Approach. *Sustainability*, 14(7) :3800, January 2022. ISSN 2071-1050. doi : 10.3390/su14073800.
- Jörg Franke, Antti Hellsten, Heinke Schlünzen, and Bertrand Carissimo. *BEST PRACTICE GUIDELINE FOR THE CFD SIMULATION OF FLOWS IN THE URBAN ENVIRONMENT*. Report, COST European Cooperation in Science and Technology, May 2007.
- Rudolf Geiger, Robert H. Aron, and Paul Todhunter. *The Climate Near the Ground*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1995. ISBN 978-3-322-86584-7 978-3-322-86582-3. doi : 10.1007/978-3-322-86582-3.
- Shiva Gorjian, Erion Bousi, Özal Emre Özdemir, Max Trommsdorff, Nallapaneni Manoj Kumar, Abhishek Anand, Karunesh Kant, and Shauhrat S. Chopra. Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158 :112126, April 2022. ISSN 1364-0321. doi : 10.1016/j.rser.2022.112126.
- Ülgen Gülçat. *Fundamentals of Modern Unsteady Aerodynamics*. Springer, Singapore, 2016. ISBN 978-981-10-0016-4 978-981-10-0018-8. doi : 10.1007/978-981-10-0018-8.
- K. Hami. Turbulence Modeling a Review for Different Used Methods. *International Journal of Heat and Technology*, 39 :227–234, February 2021. doi : 10.18280/ijht.390125.
- D. M. Hargreaves and N. G. Wright. On the use of the $k-E$ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95(5) :355–369, May 2007. ISSN 0167-6105. doi : 10.1016/j.jweia.2006.08.002.
- Koami Soulemane Hayibo. Open-Source Vertical Swinging Wood-Based Solar Photovoltaic Racking Systems.
- Koami Soulemane Hayibo and Joshua M. Pearce. Vertical free-swinging photovoltaic racking energy modeling : A novel approach to agrivoltaics. *Renewable Energy*, 218 :119343, December 2023. ISSN 0960-1481. doi : 10.1016/j.renene.2023.119343.
- Chenchen He and Wenyan Shao. Numerical simulation of shelter effect assessment for single-row windbreaks on the periphery of oasis farmland. *Journal of Arid Environments*, 222 :105165, June 2024. ISSN 0140-1963. doi : 10.1016/j.jaridenv.2024.105165.
- Bernard Heinesch, Gaëtan Bogaerts, Henri Chopin, Loïc Demoulin, Arianne Faurès, Bernard Longdoz, Tanguy Manise, and Ayche Orgun. ETC L2 Fluxnet (half-hourly), Dorinne, 2021-12-31–2023-12-31, 2024.
- Sighard F. Hoerner. *Fluid-Dynamic Drag : Theoretical, Experimental and Statistical Information*. Hoerner Fluid Dynamics, Bakersfield, CA 93390, 2 edition, 1965. ISBN 1-124-13622-3.
- Fumiki Hosoi and Kenji Omasa. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(2) :151–158, March 2009a. ISSN 0924-2716. doi : 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.003.
- Fumiki Hosoi and Kenji Omasa. Estimating vertical plant area density profile and growth parameters of a wheat canopy at different growth stages using three-dimensional portable lidar imaging. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(2) :151–158, March 2009b. ISSN 0924-2716. doi : 10.1016/j.isprsjprs.2008.09.003.
- IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2022*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, August 2023. ISBN 978-92-9260-544-5.
- Hassan Irtaza and Ashish Agarwal. CFD Simulation of Turbulent Wind Effect on an Array of Ground-Mounted Solar PV Panels. *J. Inst. Eng. India Ser. A*, 99(2) :205–218, June 2018. ISSN 2250-2157. doi : 10.1007/s40030-018-0283-x.
- Ali Jahanfar, Jennifer Drake, Bahram Gharabaghi, and Brent Sleep. An experimental and modeling study of evapotranspiration from integrated green roof photovoltaic systems. *Ecological Engineering*, 152 :105767, June 2020. ISSN 0925-8574. doi : 10.1016/j.ecoleng.2020.105767.

- Wei Jiao, Qi Liu, Lijun Gao, Kunyu Liu, Rui Shi, and Na Ta. Computational Fluid Dynamics-Based Simulation of Crop Canopy Temperature and Humidity in Double-Film Solar Greenhouse. *Journal of Sensors*, 2020 : e8874468, October 2020. ISSN 1687-725X. doi : 10.1155/2020/8874468.
- F. Johansson, B. E. Gustafsson, B. Stridh, and P. E. Campana. 3D-thermal modelling of a bifacial agrivoltaic system : A photovoltaic module perspective. *Energy Nexus*, 5 :100052, March 2022. ISSN 2772-4271. doi : 10.1016/j.nexus.2022.100052.
- D. Johnson, F. Menter, and C. Rumsey. The status of turbulence modeling for external aerodynamics. In *Fluid Dynamics Conference*, Colorado Springs, 1994. American Institute of Aeronautics and Astronautics. doi : 10.2514/6.1994-2226.
- Chowdhury Mohammad Jubayer and Horia Hangan. Numerical simulation of wind effects on a stand-alone ground mounted photovoltaic (PV) system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 134 : 56–64, November 2014. ISSN 0167-6105. doi : 10.1016/j.jweia.2014.08.008.
- Chowdhury Mohammad Jubayer, Kamran Siddiqui, and Horia Hangan. CFD analysis of convective heat transfer from ground mounted solar panels. *Solar Energy*, 133 :556–566, August 2016. ISSN 0038-092X. doi : 10.1016/j.solener.2016.04.027.
- J. C. Kaimal and J. J. Finnigan. *Atmospheric Boundary Layer Flows : Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, January 1994. ISBN 978-0-19-536277-0.
- Panagiota Karava, Chowdhury Mohammad Jubayer, and Eric Savory. Numerical modelling of forced convective heat transfer from the inclined windward roof of an isolated low-rise building with application to photovoltaic/thermal systems. *Applied Thermal Engineering*, 31(11) :1950–1963, August 2011. ISSN 1359-4311. doi : 10.1016/j.applthermaleng.2011.02.042.
- Jeonghoe Kim, Jung-Hoon Kim, and Robert D. Sharman. Characteristics of Energy Dissipation Rate Observed from the High-Frequency Sonic Anemometer at Boseong, South Korea. *Atmosphere*, 12(7) :837, July 2021. ISSN 2073-4433. doi : 10.3390/atmos12070837.
- Sangik Lee, Jong-hyuk Lee, Youngjoon Jeong, Dongsu Kim, Byung-hun Seo, Ye-jin Seo, Taejin Kim, and Won Choi. Agrivoltaic system designing for sustainability and smart farming : Agronomic aspects and design criteria with safety assessment. *Applied Energy*, 341 :121130, July 2023. ISSN 0306-2619. doi : 10.1016/j.apenergy.2023.121130.
- Tianshu Liu. Evolutionary understanding of airfoil lift. *Advances in Aerodynamics*, 3(1) :37, December 2021. ISSN 2524-6992. doi : 10.1186/s42774-021-00089-4.
- Julia S. Stewart Lowndes, Benjamin D. Best, Courtney Scarborough, Jamie C. Afflerbach, Melanie R. Frazier, Casey C. O'Hara, Ning Jiang, and Benjamin S. Halpern. Our path to better science in less time using open data science tools. *Nat Ecol Evol*, 1(6) :1–7, May 2017. ISSN 2397-334X. doi : 10.1038/s41559-017-0160.
- H. Marrou, L. Dufour, and J. Wery. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system ? *European Journal of Agronomy*, 50 :38–51, October 2013. ISSN 1161-0301. doi : 10.1016/j.eja.2013.05.004.
- Sarah McClure, Jeong Jae Kim, Sang Joon Lee, and Wei Zhang. Shelter effects of porous multi-scale fractal fences. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 163 :6–14, April 2017. ISSN 0167-6105. doi : 10.1016/j.jweia.2017.01.007.
- Florian Menter and Thomas Esch. ELEMENTS OF INDUSTRIAL HEAT TRANSFER PREDICTIONS. In *16th BRAZILIAN CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING*, volume 20, page 11, Uberlândia, 2001. Proceedings of COBEM 2001.
- Florian Menter, M. Kuntz, and RB Langtry. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model. *Heat and Mass Transfer*, 4, January 2003.
- J. L. Monteith. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 19 :205–234, 1965.
- Hexagon MSC. MSC Software. <https://hexagon.com/company/divisions/manufacturing-intelligence/msc-software>.
- Donald A. Nield and Adrian Bejan. *Convection in Porous Media*. Springer, New York, NY, 2013. ISBN 978-1-4614-5540-0 978-1-4614-5541-7. doi : 10.1007/978-1-4614-5541-7.

- OpenFOAM. OpenFOAM. <https://www.openfoam.com/>, December 2023.
- Nicholas T. Ouellette. Turbulence in two dimensions. *Physics Today*, 65(5) :68–69, May 2012. ISSN 0031-9228. doi : 10.1063/PT.3.1570.
- A. Parente, C. Gorlé, J. van Beeck, and C. Benocci. Improved k - ϵ model and wall function formulation for the RANS simulation of ABL flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4) :267–278, April 2011. ISSN 0167-6105. doi : 10.1016/j.jweia.2010.12.017.
- Supun Pieris, Serhiy Yarusevych, and Sean D. Peterson. Flow development over inclined flat plates in ground effect and relation to aerodynamic loads. *Physics of Fluids*, 34(9) :095113, September 2022. ISSN 1070-6631. doi : 10.1063/5.0102406.
- Supun Pieris, Serhiy Yarusevych, and Sean D. Peterson. Effect of yaw angle on aerodynamics of square inclined flat plates in ground effect. *Physics of Fluids*, 35(5) :055144, May 2023. ISSN 1070-6631. doi : 10.1063/5.0151616.
- P.J Richards and R.P Hoxey. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k - ϵ turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46–47 :145–153, August 1993. ISSN 0167-6105. doi : 10.1016/0167-6105(93)90124-7.
- Service public de Wallonie. Circulaire relative aux permis d’urbanisme pour le photovoltaïque, March 2024.
- M. Shademan and H. Hangan. Wind Loading on Solar Panels at Different Inclination Angles. 2009.
- E. Shashi Menon. Chapter Five - Fluid Flow in Pipes. In E. Shashi Menon, editor, *Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual*, pages 149–234. Gulf Professional Publishing, Boston, January 2015. ISBN 978-1-85617-830-3. doi : 10.1016/B978-1-85617-830-3.00005-5.
- W. James Shuttleworth and J. S. Wallace. Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(469) :839–855, 1985. ISSN 1477-870X. doi : 10.1002/qj.49711146910.
- Solidwork Flow Simulation. SOLIDWORKS Flow Simulation. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>, November 2017.
- Andrey Sogachev and Oleg Panferov. Modification of Two-Equation Models to Account for Plant Drag. *Boundary-Layer Meteorol*, 121(2) :229–266, November 2006. ISSN 1573-1472. doi : 10.1007/s10546-006-9073-5.
- Thorsten Stoesser, Guillermo Palau Salvador, Wolfgang Rodi, and Panayiotis Diplas. Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Through Submerged Vegetation. *Transp Porous Med*, 78(3) :347–365, July 2009. ISSN 1573-1634. doi : 10.1007/s11242-009-9371-8.
- Joel Theis. Quality Guidelines for Energy Systems Studies : Cost Estimation Methodology for NETL Assessments of Power Plant Performance. Technical Report NETL-PUB-22580, 1567736, February 2021.
- Hao Wang, Eugene S. Takle, and Jinmei Shen. SHELTERBELTS AND WINDBREAKS : Mathematical Modeling and Computer Simulations of Turbulent Flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33(Volume 33, 2001) :549–586, January 2001. ISSN 0066-4189, 1545-4479. doi : 10.1146/annurev.fluid.33.1.549.
- Jingxue Wang, Luca Patruno, Guoye Zhao, and Yukio Tamura. Windbreak effectiveness of shelterbelts with different characteristic parameters and arrangements by means of CFD simulation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 344 :109813, January 2024. ISSN 0168-1923. doi : 10.1016/j.agrformet.2023.109813.
- J. C. Ward. Turbulent Flow in Porous Media. *Journal of the Hydraulics Division*, 90(5) :1–12, September 1964. doi : 10.1061/JYCEAJ.0001096.
- Tsutomu Watanabe, Marie Takagi, Kou Shimoyama, Masayuki Kawashima, Naoyuki Onodera, and Atsushi Inagaki. Coherent Eddies Transporting Passive Scalars Through the Plant Canopy Revealed by Large-Eddy Simulations Using the Lattice Boltzmann Method. *Boundary-Layer Meteorol*, 181(1) :39–71, October 2021. ISSN 1573-1472. doi : 10.1007/s10546-021-00633-1.
- Bradford H. Wick. Study of the subsonic forces and moments on an inclined plate of infinite span, June 1954.
- N. Robert Wilson and Roger H. Shaw. A Higher Order Closure Model for Canopy Flow. *Journal of Applied Meteorology (1962-1982)*, 16(11) :1197–1205, 1977. ISSN 0021-8952.

- Georg Wohlfahrt, Sigrid Sapinsky, Ulrike Tappeiner, and Alexander Cernusca. Estimation of plant area index of grasslands from measurements of canopy radiation profiles. *Agricultural and Forest Meteorology*, 109(1) : 1–12, August 2001. ISSN 0168-1923. doi : 10.1016/S0168-1923(01)00259-3.
- Yi Yang, M. Gu, and Xin-yang Jin. NEW INFLOW BOUNDARY CONDITIONS FOR MODELING THE NEUTRAL EQUILIBRIUM ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER IN SST $k\omega$ MODEL. 2009.
- Sebastian Zainali, Omar Qadir, Sertac Cem Parlak, Silvia Ma Lu, Anders Avelin, Bengt Stridh, and Pietro Elia Campana. Computational fluid dynamics modelling of microclimate for a vertical agrivoltaic system. *Energy Nexus*, 9 :100173, March 2023. ISSN 2772-4271. doi : 10.1016/j.nexus.2023.100173.
- Jonathan Zerihan. *An Investigation into the Aerodynamics of Wings in Ground Effect*. PhD thesis, University of Southampton, April 2001.