
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.

Chapitre 7

Annexes

7.1 Conditions initiales

Les figures 7.1 et 7.2 présentent les séries temporelles de l'énergie cinétique turbulente (k) et de la dissipation des turbulences ϵ .

L'énergie cinétique turbulente peut être calculée avec les données des anémomètres 3D à l'aide de l'équation 7.1.

$$KTE = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (7.1)$$

La dissipation des turbulences peut être retrouvée à l'aide de la procédure suivante (Kim et al., 2021) :

$$\epsilon = \frac{1}{U} \left(\frac{D_u(\tau) \times \tau^{-\frac{2}{3}}}{C_k} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (7.2)$$

$$D_u(\tau) = \left\langle (u(t + \tau) - u(t))^2 \right\rangle \quad (7.3)$$

$$\tau = \frac{1}{f} \quad (7.4)$$

Où :

- τ est la séparation temporelle des turbulences (inverse de la fréquence temporelle f).
- C_k est la constante de Kolmogorov, elle vaut 0.52.

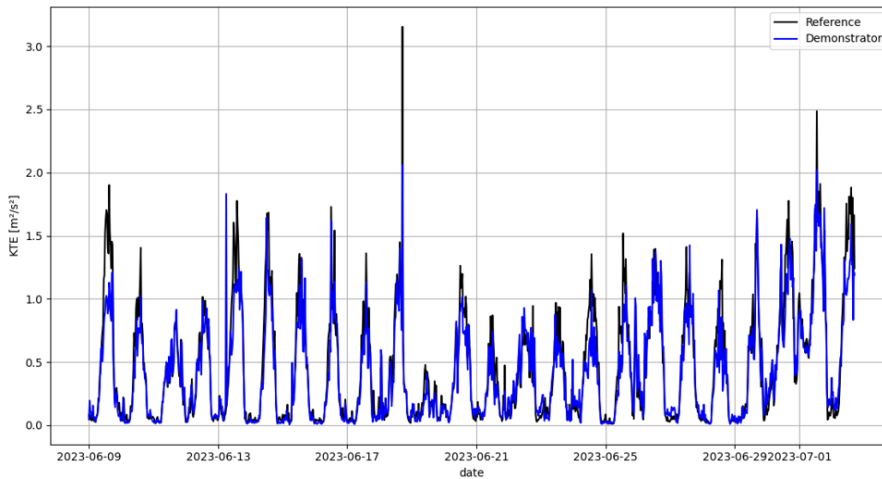


FIGURE 7.1 – Données expérimentales du démonstrateur agrivoltaïque de Valpuseaux pour l'énergie cinétique turbulente k (KTE)

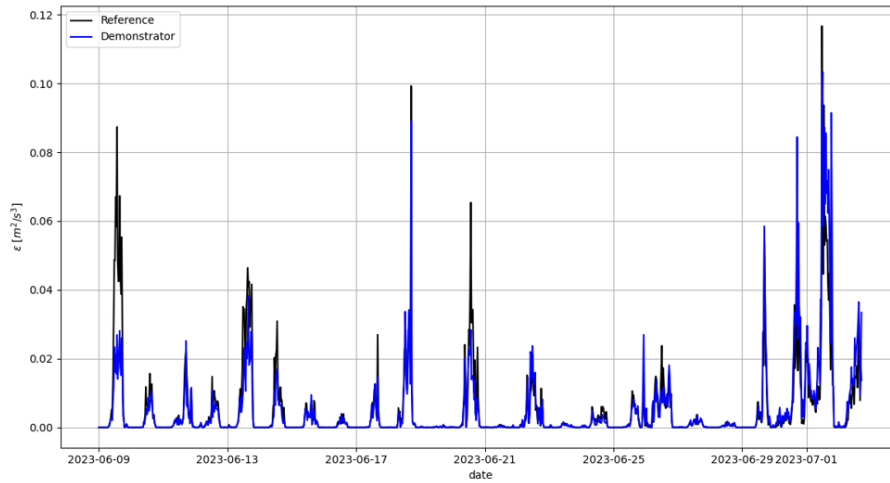


FIGURE 7.2 – Données expérimentales du démonstrateur agrivoltaïque de Valpuseaux pour la dissipation des turbulences ϵ

La dissipation spécifique peut être retrouvée à l'aide de ϵ :

$$\omega = \frac{\epsilon}{k \times \beta^*} \quad (7.5)$$

Où :

— β^* est une constante empirique et vaut 0.09.

7.2 Paramètres de canopée et coefficients de porosité

Les trois figures de cette section présentent les coefficients de l'équation de *Darcy-Forchheimer* pour modéliser l'effet d'une canopée de plantes sur l'écoulement. Le cas de la culture et de la prairie non pâturée vont servir à initier les modèles de culture sous agri-PV où il y a une alternance entre zone herbeuse et prairie (1m de zone herbeuse sous chaque panneau). Les coefficients pour la prairie de Dorinne vont permettre d'initier les modèles de la prairie de Dorinne.

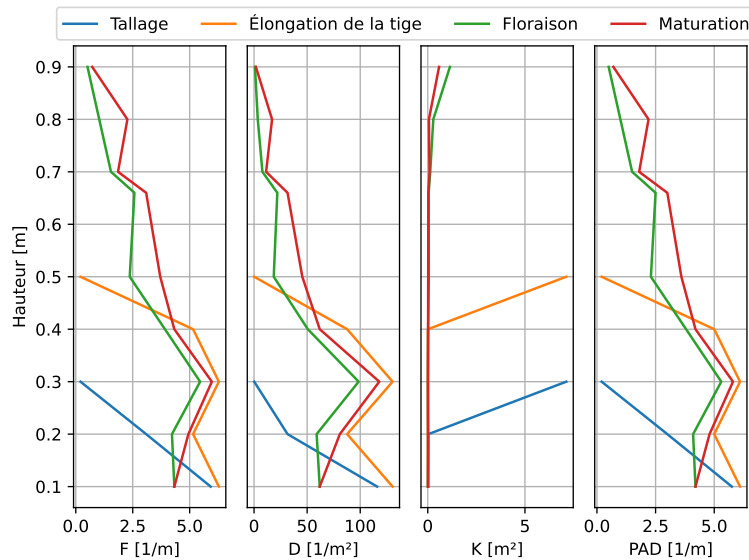


FIGURE 7.3 – Paramètres de *Darcy* et de *Forchheimer* pour l'équation des milieux poreux en fonction de la densité de surface des plantes - cas d'une culture de blé (Hosoi and Omasa, 2009a)

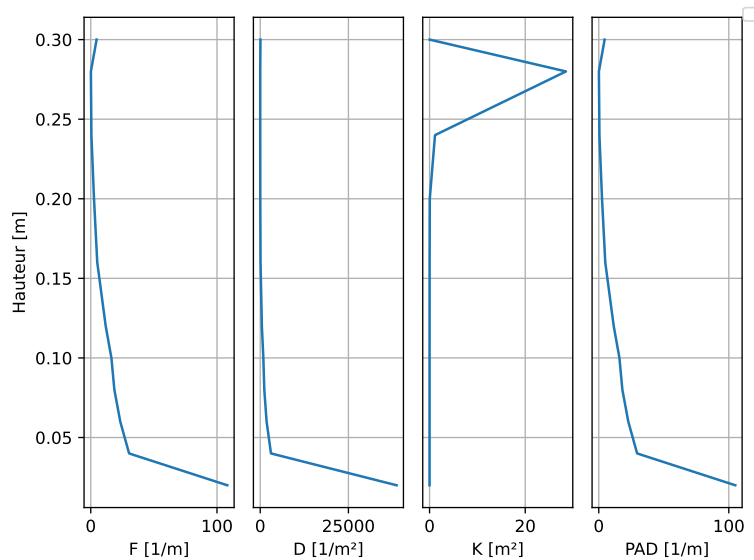


FIGURE 7.4 – Paramètres de *Darcy* et de *Forchheimer* pour l'équation des milieux poreux en fonction de la densité de surface des plantes - cas d'une prairie non pâturée (Wohlfahrt et al., 2001)

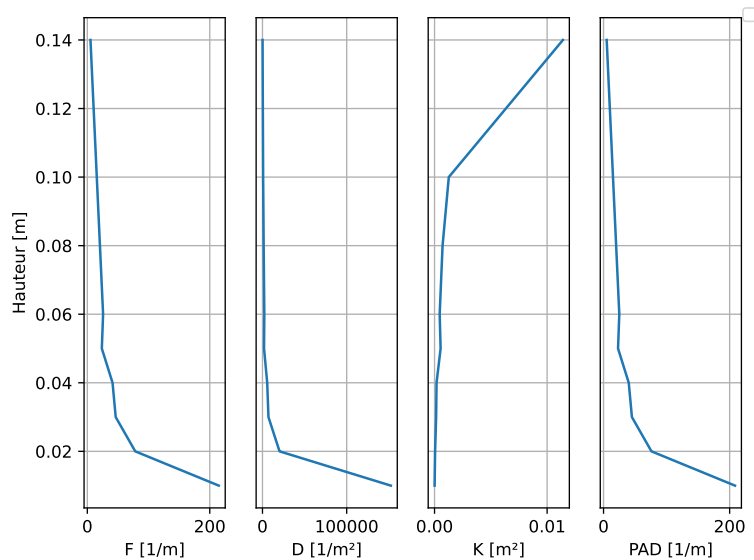


FIGURE 7.5 – Paramètres de *Darcy* et de *Forchheimer* pour l'équation des milieux poreux en fonction de la densité de surface des plantes - cas d'une prairie pâturée (Wohlfahrt et al., 2001)

7.3 A Study of 3D Turbulent Wind Flow at the Centre of Vertical Agrivoltaics in Full-Grown Wheat Condition

Auteurs : Darteville J.¹, Bruhwylér R.¹, Drahi E.^{2,3}, Tiffon-Terrade B.², Lecoindre C.², Souquet P.², Lebeau F.¹

1 DEAL, BioDynE, Gembloux Agro-Bio Tech, Université de Liège, 2 TotalEnergies, 3 Ombrea

7.3.1 Introduction

In the burgeoning field of sustainable energy solutions, the integration of photovoltaic modules into agricultural systems is a promising avenue. Agrivoltaics influences air flows, orchestrating a symphony of effects that affect the crop microclimate and consequently their growth and yield. This interaction encompasses changes in mean wind speed, shading patterns, turbulence levels and, ultimately control the evapotranspiration process. Vertical agrivoltaics is an interesting design because of its compatibility with agricultural equipment operation, its bimodal electricity production profile and the expected benefits of windbreak and shading effect on water

balance [1]. Among the multitude of factors that determine the microclimate, the transport of scalars and momentum appears to be a key player, governed mainly by turbulent wind phenomena [2]. Few studies provide details on the impact of photovoltaic structures on the airflow around the crop. One study investigated the impact mean on airflow of a ground-mounted power plant with modules close to the horizontal (18° angle of attack of) using 2D anemometers at several different heights but the low measurement frequency (1/60 Hz) give no insight to effects on flow turbulence [3]. Others have studied the microclimate in a fixed PV shading system with an angle of 25°, measuring wind speed and direction using a mechanical 2D anemometer, which therefore has an inertia that introduces errors in high-frequency measurements [4]. In addition, as in the previous study, the lack of vertical velocity measurements means that turbulence is poorly captured. Therefore, this work investigates the impact of photovoltaic modules mounted on a vertical agrivoltaics structure on wind dynamics, with particular emphasis on the windbreak effect and turbulence pattern and transport in a 111 kWc demonstrator.

7.3.2 Material and methods

This study is based on a trial conducted in a TotalEnergies vertical agrivoltaic demonstrator located in Valpuseaux (France). The trial aims to study the windbreak effect and turbulence at the center of the demonstrator according to the wind direction. Data from a 3D sonic anemometer were collected at the center of the demonstrator, 2m above the soil (Figure 7.6). These were compared with another dataset collected on a second 3D sonic anemometer located in the reference zone 30m south of the last panel of the central array. The data were collected during the growing period of wheat at a frequency of 1 Hz.

To assess the impact of measurement frequency on the calculations, we used a dataset from a sonic 3D anemometer placed above a field in Wallhausen (Germany), which measures at 20 Hz. In reality, anemometers measure at very high frequencies (50 Hz) and the results are averaged at the desired frequency. We therefore used a Fourier transform to transform the data set from 20 Hz to 1 Hz. The Figure 7.7 shows that the impact of measuring at 1 Hz is negligible compared with a conventional measurement at 20 Hz.

The turbulence transfer is characterised by the friction velocity calculated according to Kaimal and Finnigan [5] with the velocity eddy components :

$$u^* = \sqrt{u'w'} \quad (7.6)$$

Where u' is the horizontal eddy component and w' the vertical eddy component.

To study the shear rate and the momentum transfer, we perform a quadrant-hole analysis (QH) [6, 7]. This consists of decomposing the shear stress into four parts according to the sign of the eddy components :

- $u' > 0$ and $w' > 0$: Outward interaction (S1)
- $u' < 0$ and $w' > 0$: Ejection (S2)
- $u' < 0$ and $w' < 0$: Inward interaction (S3)
- $u' > 0$ and $w' < 0$: Sweeps (S4)

Sweeps are downward gusts, and ejections are upward low-wind events. The contribution of each quadrant to the momentum transfer can be calculated as follows :

$$S_i = \frac{\langle u'w' \rangle_i}{|u'w'|} \quad (7.7)$$

Where the chevron notation indicates a conditional average and the over line notation indicates a temporal average.

Outward and inward intersections have a positive conditional mean, unlike the other two quadrants.

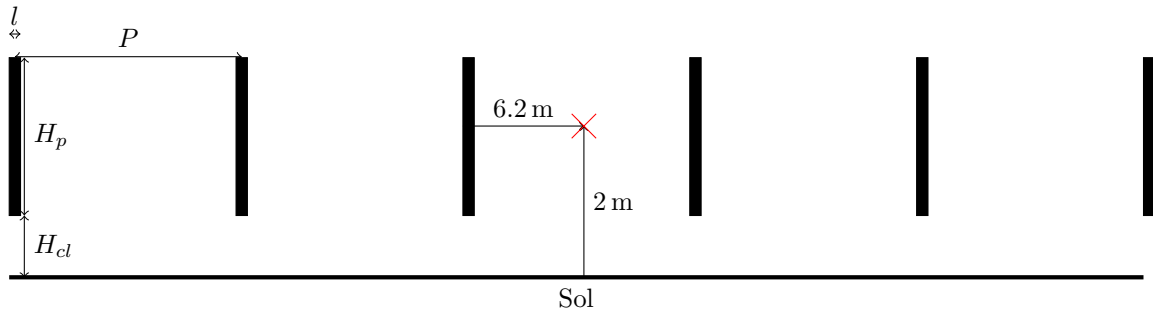


FIGURE 7.6 – Schematic diagram of the Valpuseaux agrivoltaic demonstrator and position of the 3D sonic anemometer within the demonstrator. The red cross indicates the position of the anemometer. P is the pitch distance (10 m). H_p is the panel height (2.087 m). H_{cl} is the clearance height (0.817 m). l is the row width (variable from 3 cm to 10 cm).

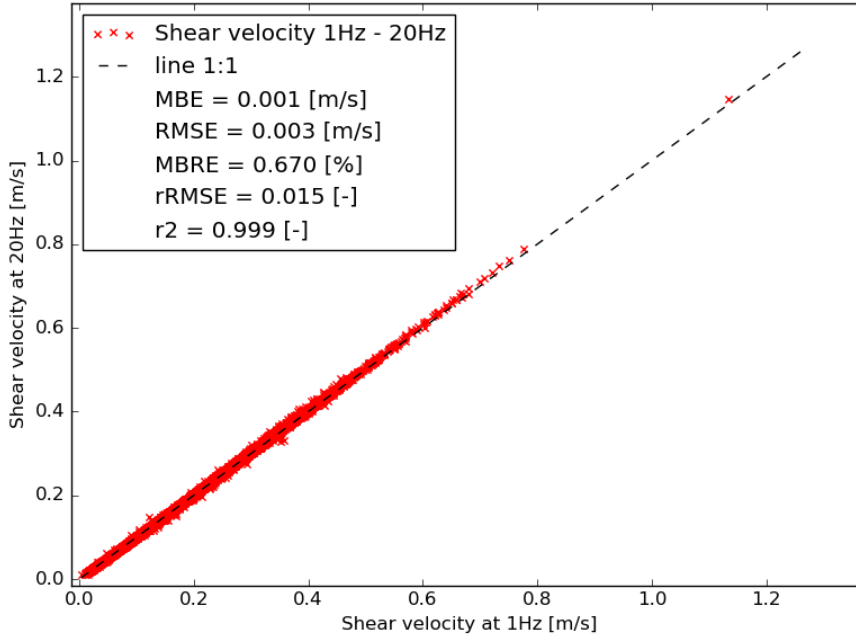


FIGURE 7.7 – Comparison between the friction speed calculated with the original data set and the data set transformed at 1 Hz

7.3.3 Results and discussion

Figure 7.8 presents the results of the study in terms of mean wind speed and direction and in terms of friction velocity (u^*) between the reference zone and the center of the demonstrator. The wind roses illustrate that the mean wind at the center of the demonstrator is deflected towards the direction parallel to the photovoltaic arrays. The wind rose for the reference area also shows that the wind rarely went from the north during the trial period. The line graph presents the evolution of the ratio between the mean speed at the center of the demonstrator and that of the reference, as well as the ratio for the friction velocity, according to the direction of the reference wind. The variation of the mean speed (in blue) between the reference zone and the center of the demonstrator appears to follow a sinusoidal law with a decrease in speed when the direction of the reference wind is perpendicular to the photovoltaic arrays and an increase in speed when the direction is parallel. This increase is probably due to a Venturi effect caused by the channeling of the flow with the photovoltaic arrays. Friction velocity (u^* in red) seems to increase overall within the demonstrator compared with the reference zone, except when the direction is close to the parallel. In addition, the increase in friction velocity seems to have peaks at certain specific directions with a symmetry around the south direction. The confidence intervals are quite large for the reference wind coming from the north because of the low occurrence of this direction.

The Agri-PV system influences the ratio of sweep to ejection and acts like a second complex canopy (Figure 7.9). In fact, just above and within the canopy, the momentum transport is dominated by sweep events, whereas above the canopy, ejections take up some of the momentum and there is a balance between the two types of events, as shown in the figure on the right. [7]. We can see that the Agri-PV structure increases the sweep when the wind is perpendicular but not when it is parallel, where it tends to reduce it. Photovoltaic structures therefore modify transport processes. In the future, we will be working on the impact of this modification on evapotranspiration and sensible heat, which are transported by the same mechanisms.

7.3.4 Conclusion

In conclusion, vertical agrivoltaics have a complex effect on the airflow measured at the centre of the demonstrator. Depending on the wind direction, they act by obstructing the flow, but in other directions, they channel the flow and accelerate it. In addition, turbulence transfer increases to a greater or lesser extent depending on the direction of the reference wind. Since these two variables affect the hydric behaviour of crops [1,2,5,8], it is important to take them into account when analysing an agrivoltaic plant. Further work will investigate the spatial variability of these effects using further experimentations and numerical models to study the overall effect on crops.

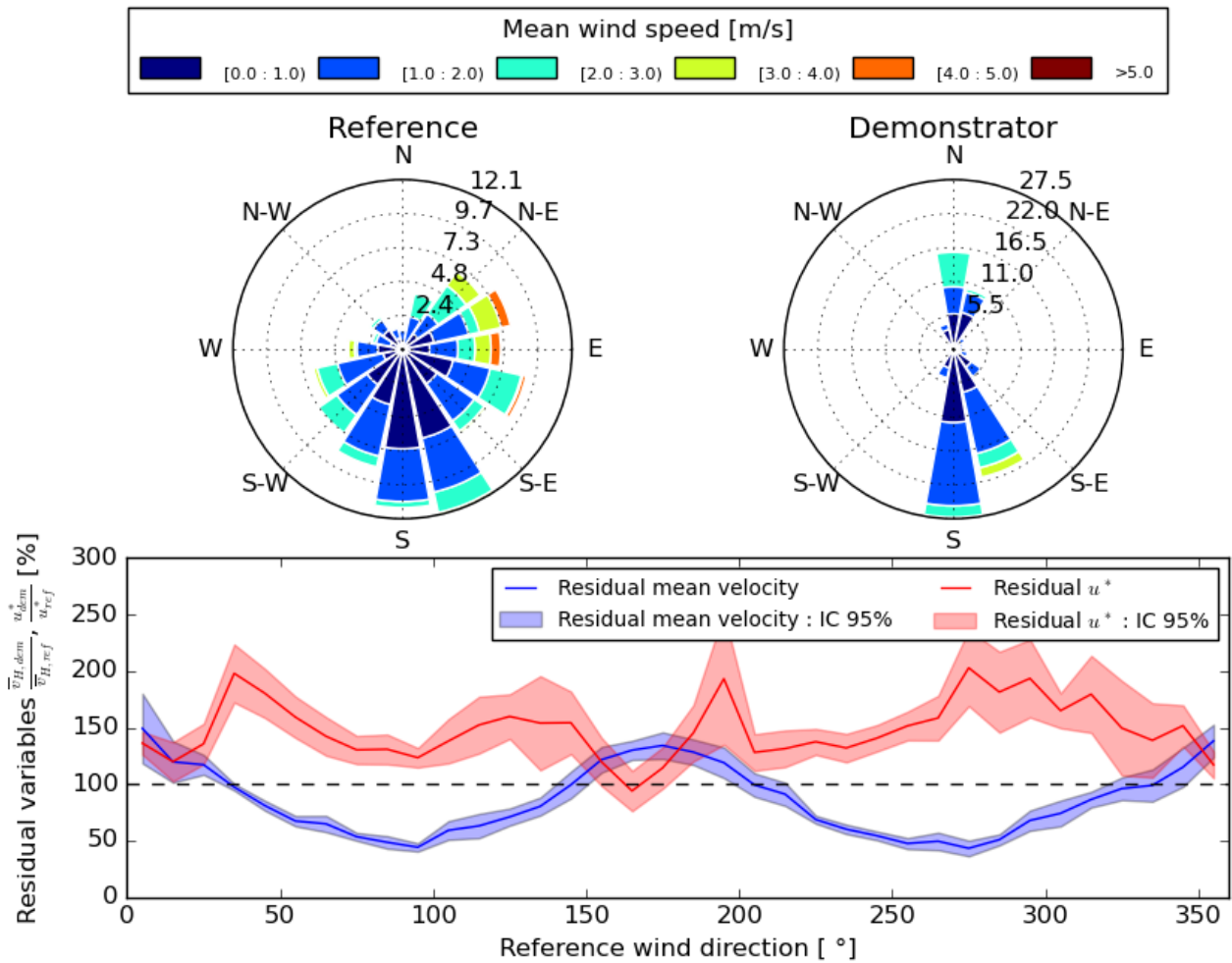


FIGURE 7.8 – Wind roses inside reference area and vertical agrivoltaics demonstrator and change in mean wind speed $\frac{\bar{v}_{H,dem}}{\bar{v}_{H,ref}}$ and friction velocity $(\frac{u_{dem}^*}{u_{ref}^*})$ as a function of reference wind direction.

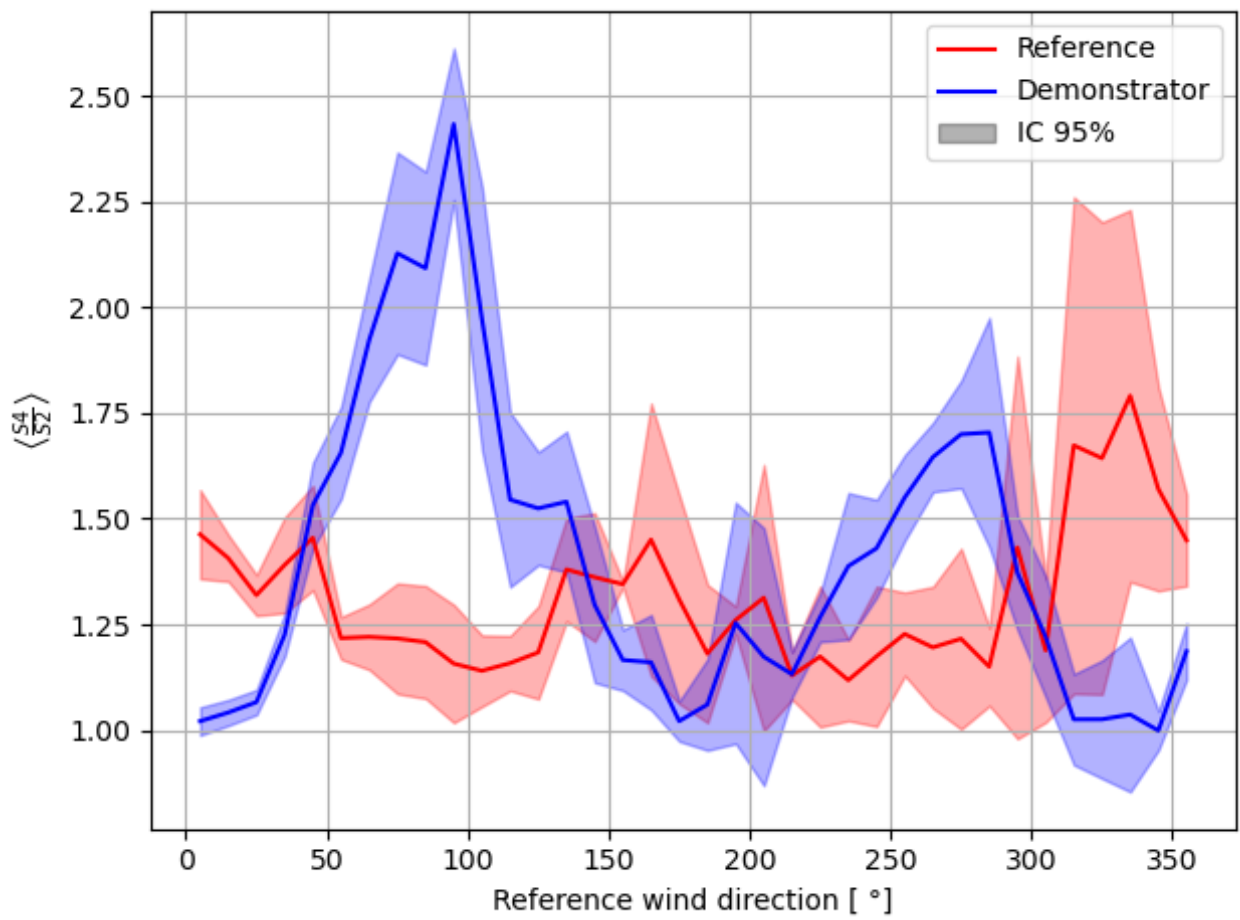


FIGURE 7.9 – Average of the ratios between sweeps and ejections $\frac{S_4}{S_2}$ for the reference anemometer and within the demonstrator as a function of the reference wind direction.

7.3.5 References

1. R. Bruhwyler et al., " Could Windbreak Effect Significantly Decrease Evapotranspiration in Vertical Agrivoltaics ? ", *AgriVoltaics2022*, 2022.
2. M. B. Parlange, W. E. Eichinger, et J. D. Albertson, « Regional scale evaporation and the atmospheric boundary layer », *Reviews of Geophysics*, vol. 33, no 1, p. 99-124, 1995, doi : 10.1029/94RG03112.
3. E. H. Adeh, J. S. Selker, et C. W. Higgins, " Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency ", *PLOS ONE*, vol. 13, no 11, p. e0203256, nov. 2018, doi : 10.1371/journal.pone.0203256.
4. H. Marrou, L. Guilioni, L. Dufour, C. Dupraz, et J. Wery, " Microclimate under agrivoltaic systems : Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels ? ", *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 177, p. 117-132, août 2013, doi : 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
5. J. C. Kaimal et J. J. Finnigan, *Atmospheric Boundary Layer Flows : Their Structure and Measurement*. Oxford University Press, 1994.
6. J. J. Finnigan, " Turbulence in waving wheat ", *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 16, no 2, p. 213-236, juin 1979, doi : 10.1007/BF02350512.
7. Y. Brunet, "Turbulent Flow in Plant Canopies : Historical Perspective and Overview ", *Boundary-Layer Meteorol*, vol. 177, no 2, p. 315-364, déc. 2020, doi : 10.1007/s10546-020-00560-7.
8. T. R. McVicar et al., " Global review and synthesis of trends in observed terrestrial near- surface wind speeds : Implications for evaporation ", *Journal of Hydrology*, vol. 416-417, p. 182-205, jan. 2012, doi : 10.1016/j.jhydrol.2011.10.024.

7.4 Maillages

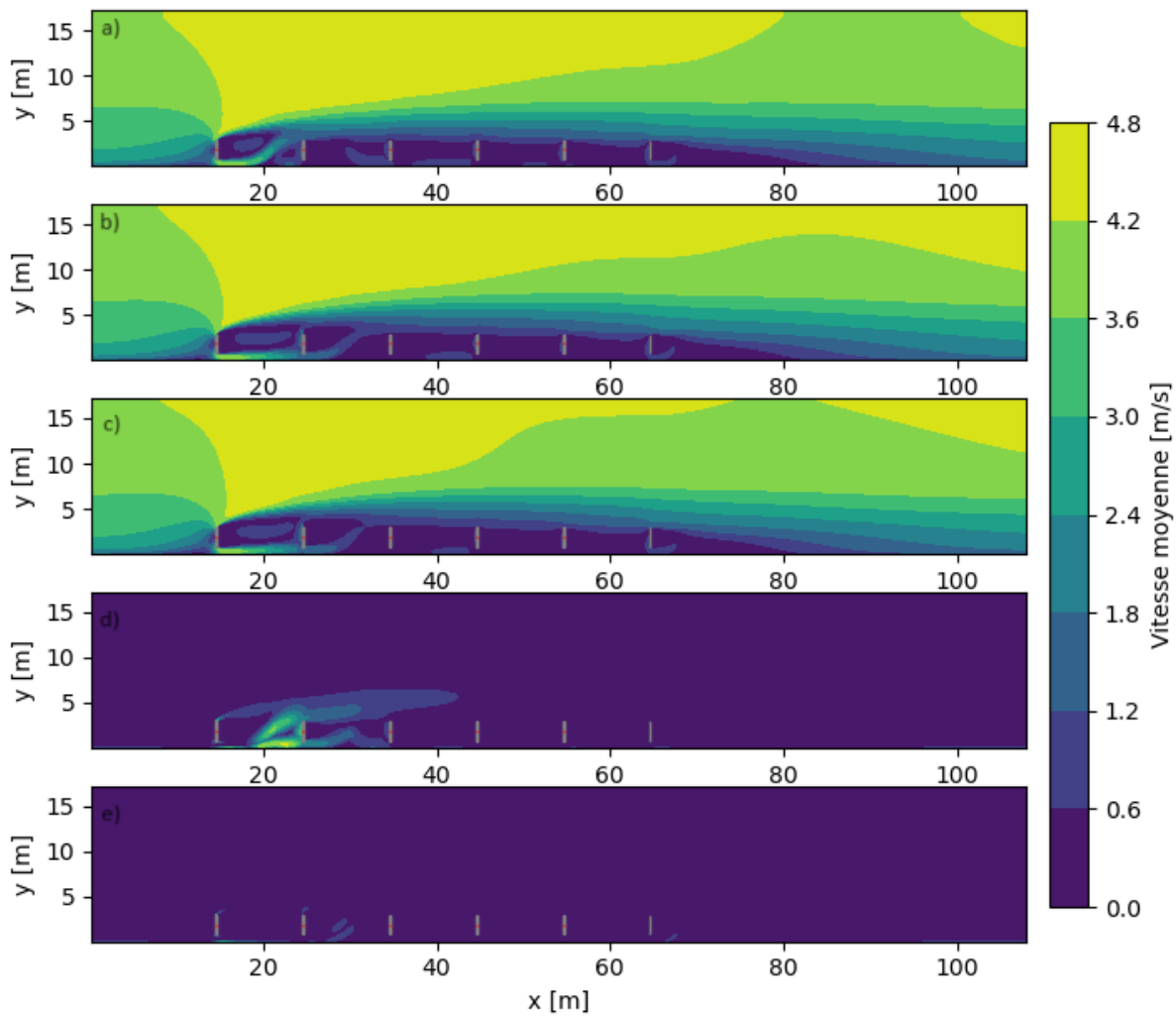


FIGURE 7.10 – Comparaison entre les 3 précisions du maillage pour le modèle de centrale à 6 rangées : Différence sur le champ des vitesses. Champ de l'amplitude des vitesses pour le maillage à (a) 20000 (b) 80000 (c) 320000. (d) Différence entre le maillage à 320000 et 20000 cellules. (e) Différence entre le maillage à 320000 et à 80000 cellules.

Cette figure montre l'influence du maillage sur le champ des vitesses. On observe des différences importantes entre le maillage le plus fin et le maillage grossier dans l'écoulement en aval du premier panneau. En effet, le comportement de l'écoulement change entre les deux maillages.

7.5 Forces et inclinaison

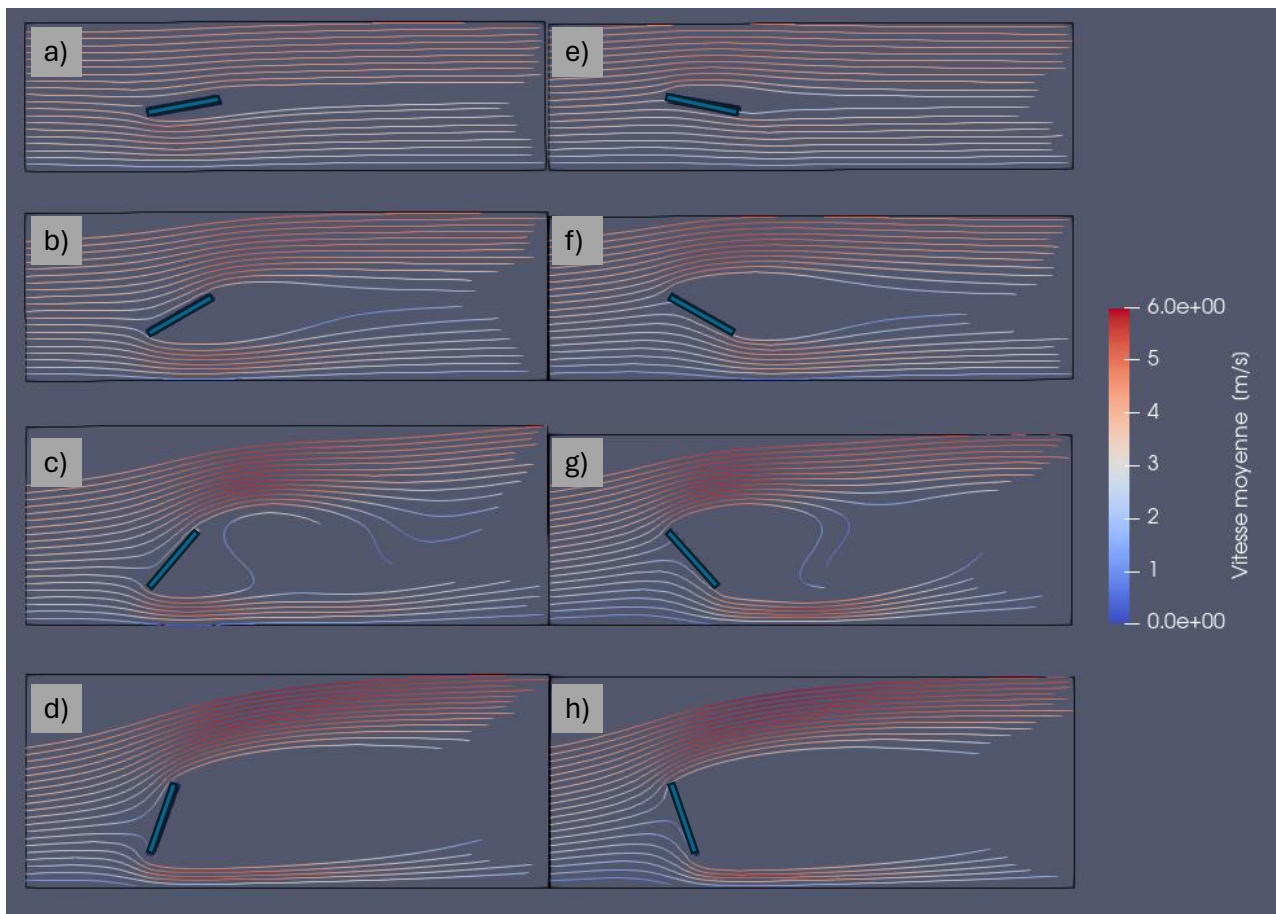


FIGURE 7.11 – Séparation de l'écoulement en fonction de l'angle d'inclinaison. (a) 10°, (b) 30°, (c) 50°, (d) 70°, (e) 170°, (f) 150°, (g) 130°, (h) 110°. Les lignes colorées représentent les lignes d'écoulement autour des panneaux. La couleur indique le module de la vitesse, le bleu correspond aux faibles vitesses et le rouge aux vitesses importantes.

Cette figure montre la séparation du flux causée par un panneau en fonction de son inclinaison. On remarque une séparation pour les angles supérieurs à 10° ou inférieurs à 170°.

7.6 Contraction inertielle

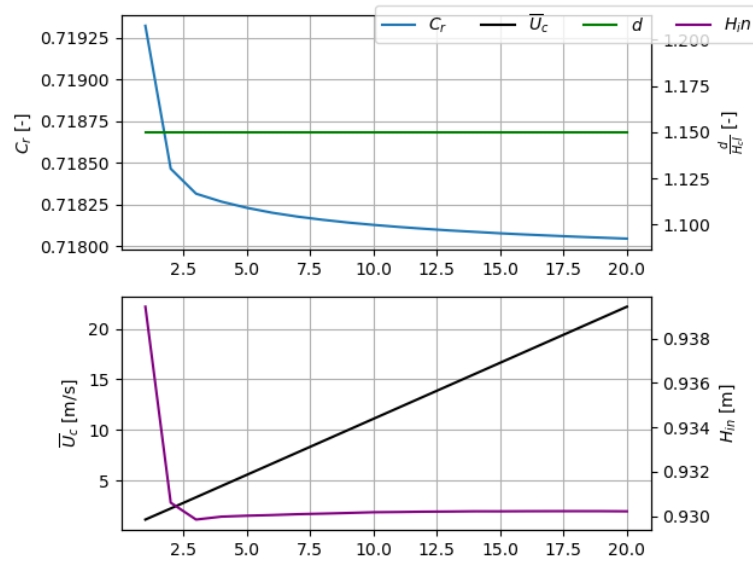


FIGURE 7.12 – Paramètres de la contraction inertielle en fonction de la vitesse d’entrée à 2 m de hauteur. C_r est le ratio de contraction. $\frac{d}{H_{cl}}$ est la distance normalisée par la hauteur de dégagement entre le panneau et la section de contraction maximum. \bar{U}_c correspond à la vitesse moyenne de la section de contraction maximum. H_{in} est la hauteur d’entrée.

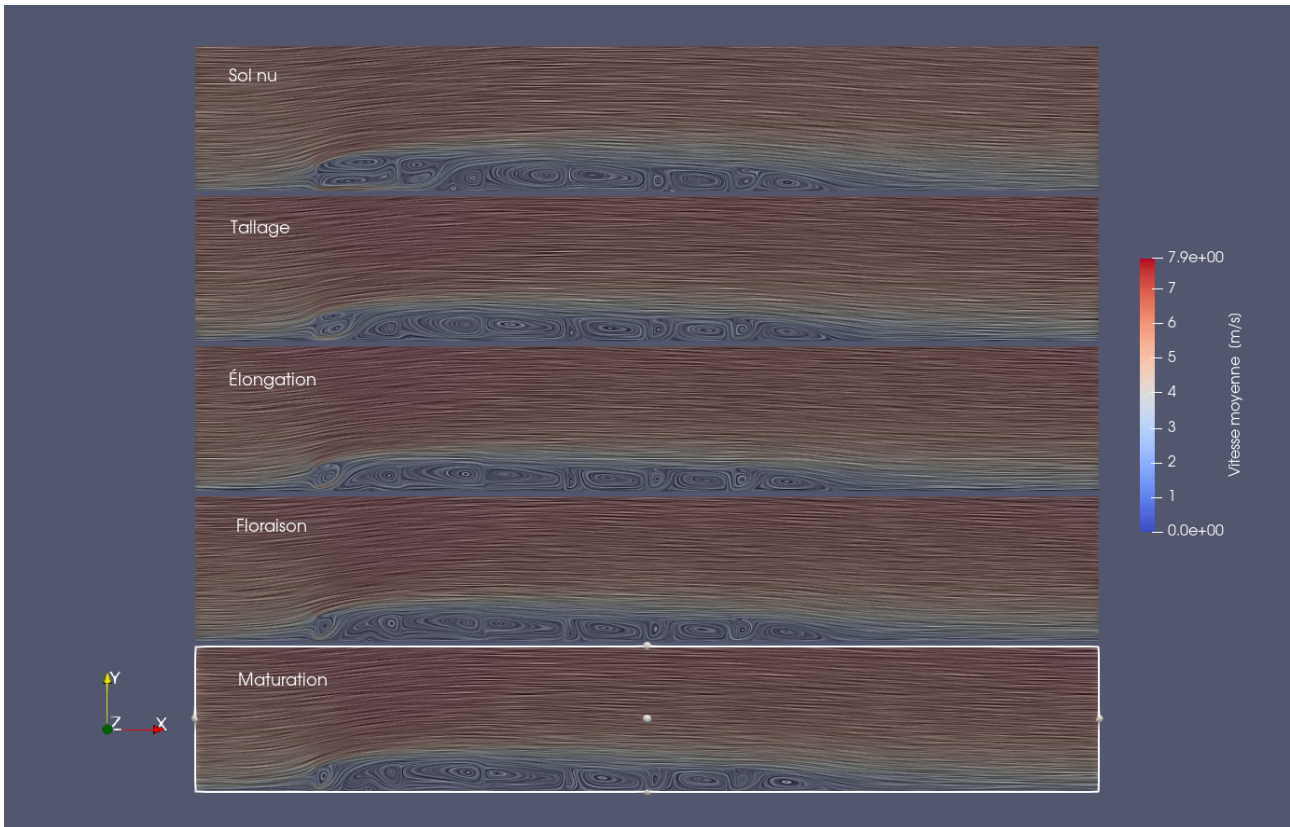
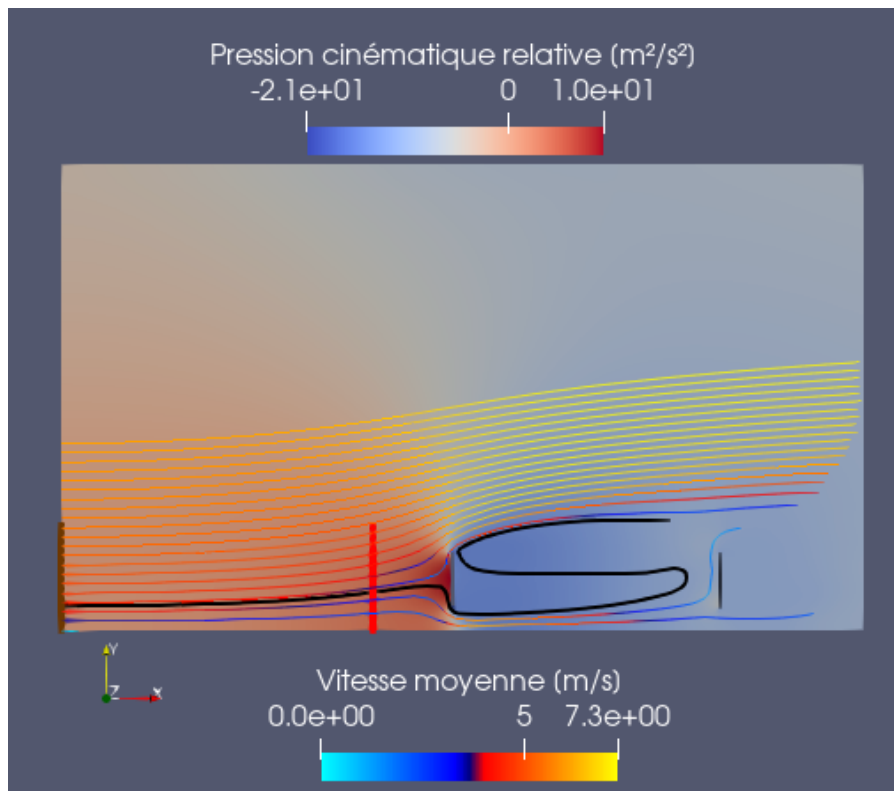
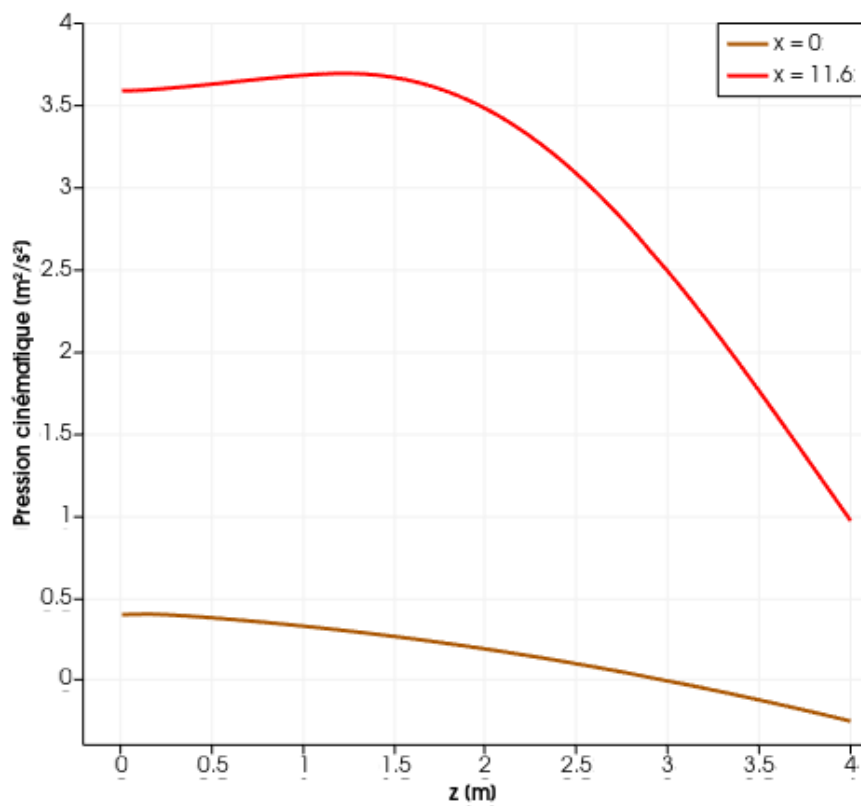


FIGURE 7.13 – Exemples de champs des vitesses modélisés en Agri-PV pour 5 stades phénologiques de la culture avec une vitesse d’entrée à 2 m de 5 m s^{-1} .

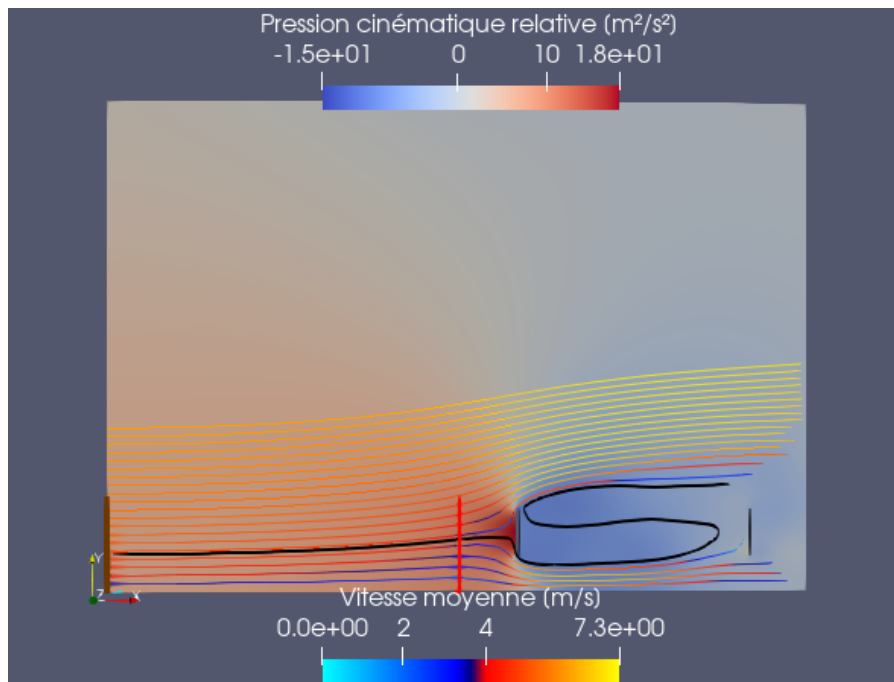


(a) Champ des pressions et lignes de courant autour du premier panneau. La couleur de fond indique les pressions. La couleur de lignes de courant donne une indication de la vitesse et la ligne noire correspond au tracé de la particule la plus haute qui passe sous le premier panneau. Le rectangle brun et le rectangle rouge correspondent aux courbes de pressions de la figure (b)

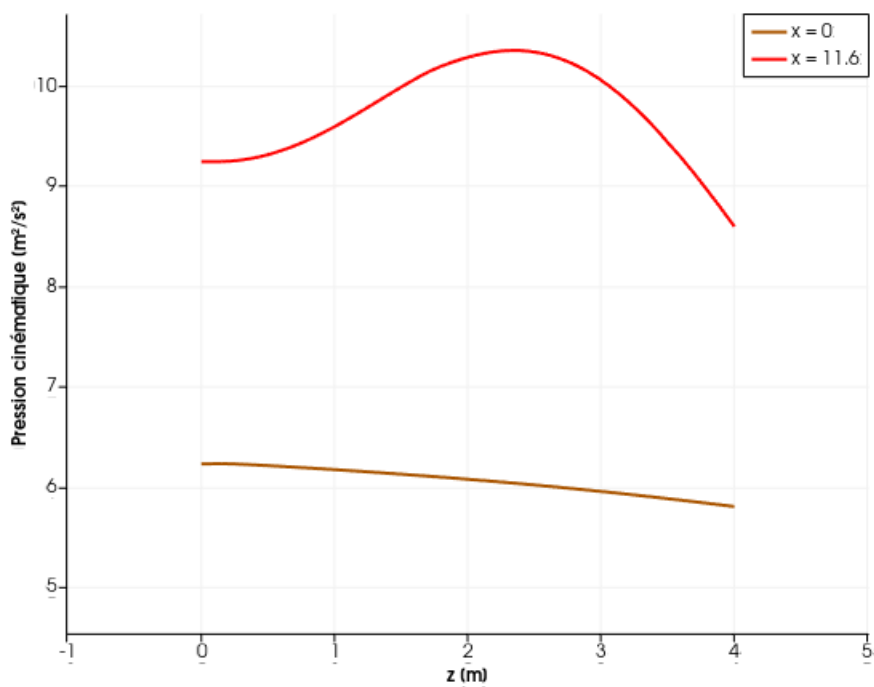


(b) Courbe de pressions en fonction de la hauteur pour les deux échantillonnages de la figure (a)

FIGURE 7.14 – Écoulement en amont du premier panneau : cas d'une hauteur de dégagement de 0.4 m



(a) Champ des pressions et lignes de courant autour du premier panneau. La couleur de fond indique les pressions. La couleur de lignes de courant donne une indication de la vitesse et la ligne noire correspond au tracé de la particule la plus haute qui passe sous le premier panneau. Le rectangle brun et le rectangle rouge correspondent aux courbes de pressions de la figure (b)

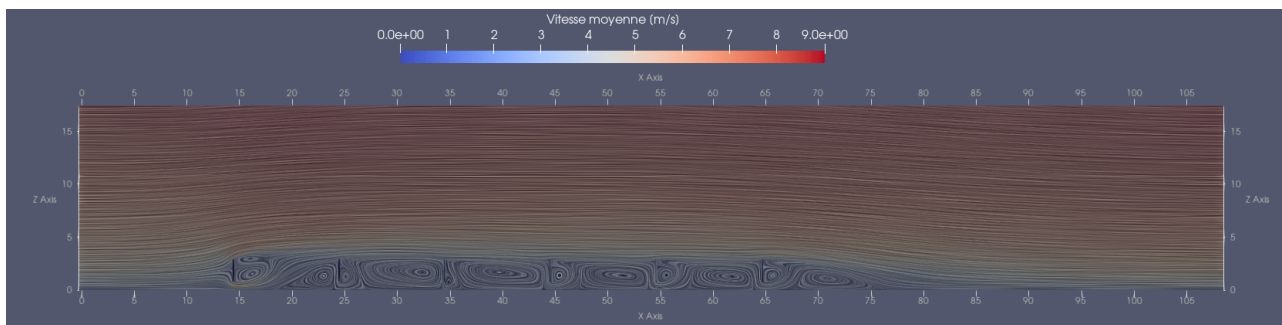


(b) Courbe de pressions en fonction de la hauteur pour les deux échantillonnages de la figure (a)

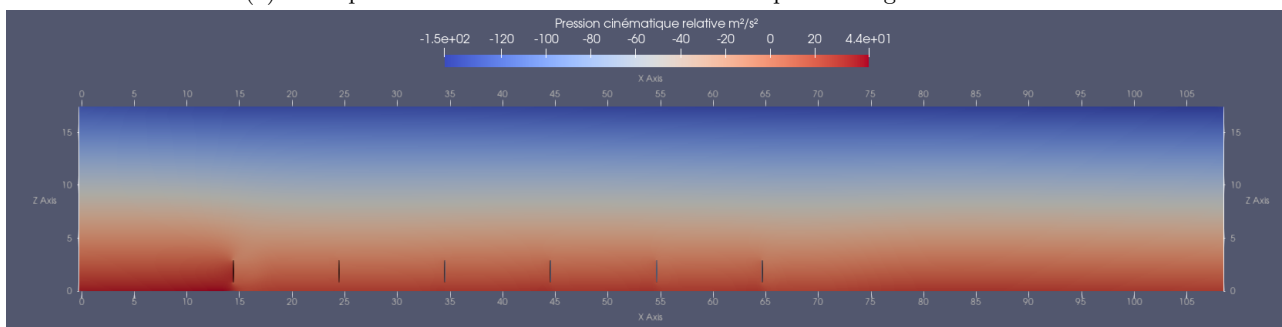
FIGURE 7.15 – Écoulement en amont du premier panneau : cas d'une hauteur de dégagement de 1.5 m

7.7 Transport de la vapeur d'eau

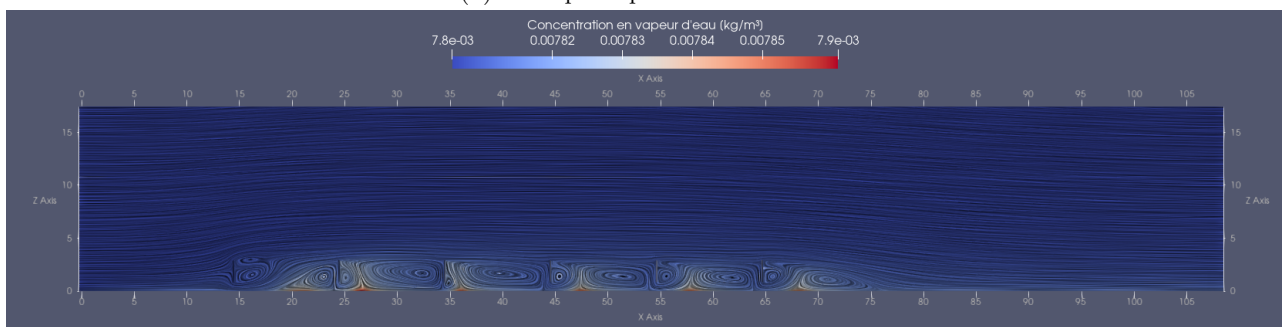
7.7.1 Les différentes variables de l'écoulement



(a) Champ des vitesses en m s^{-1} . Les tracés indiquent les lignes de courant

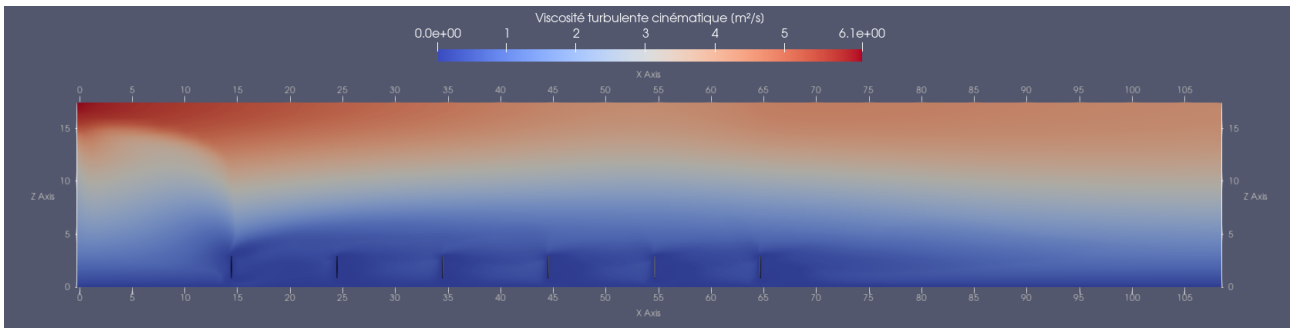


(b) Champ des pressions en $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$

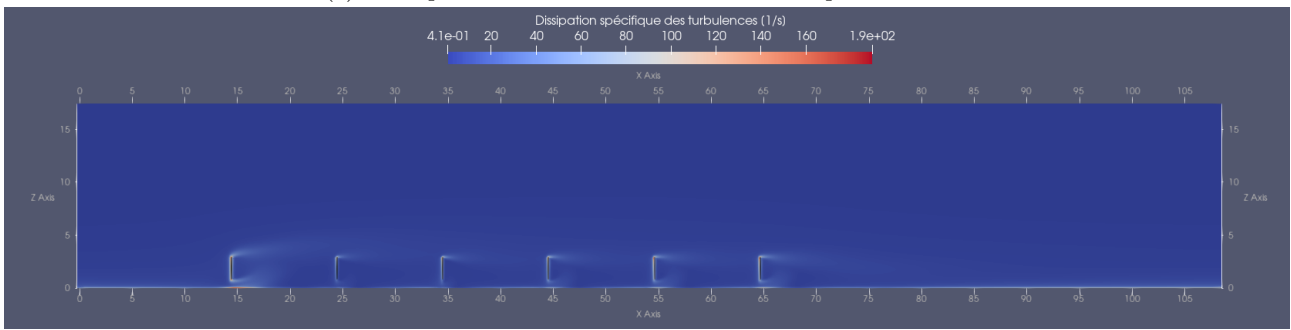


(c) Champ des concentrations en vapeur d'eau en kg m^{-3} . Les tracés indiquent les lignes de courant

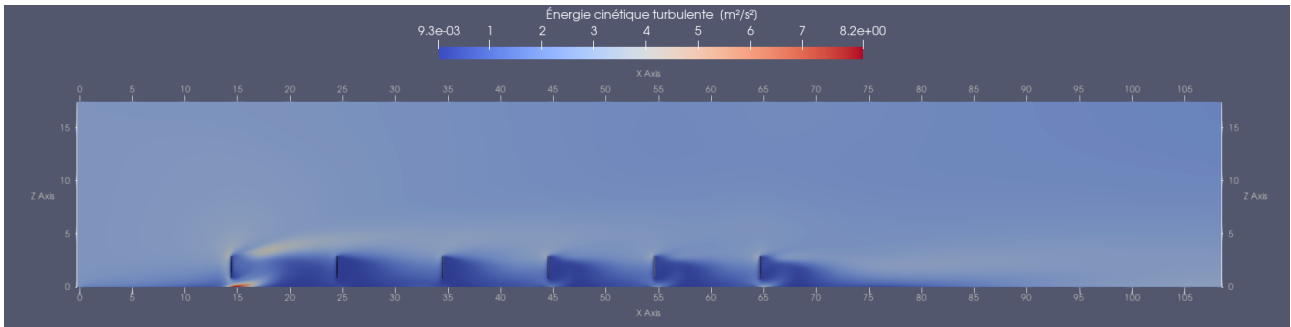
FIGURE 7.16 – Présentation des champs des différentes variables de l'écoulement - part.1



(a) Champ de la viscosité turbulente cinématique en $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$



(b) Champ de la dissipation spécifique des turbulences en s^{-1}



(c) Champ de l'énergie cinétique turbulente en $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$.

FIGURE 7.17 – Présentation des champs des différentes variables de l'écoulement - part.2

7.7.2 Effet de la hauteur sur la somme des flux

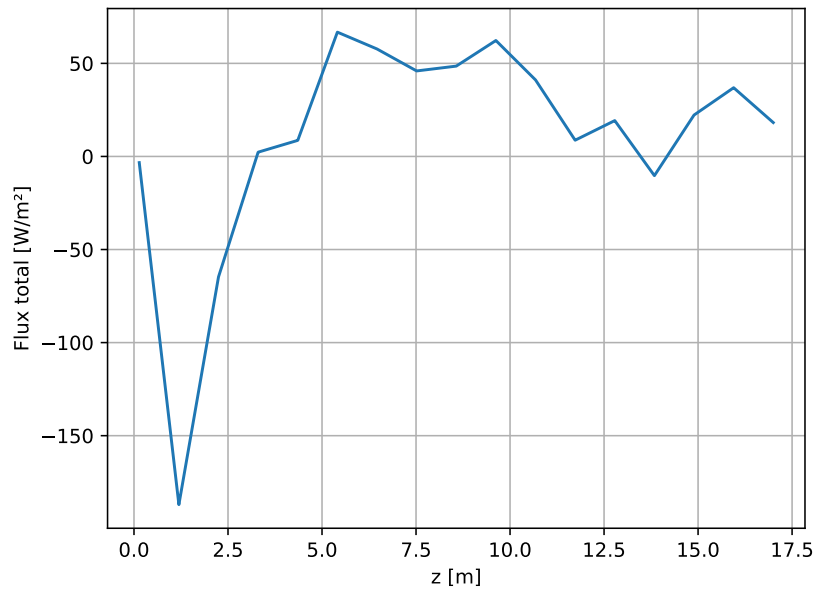


FIGURE 7.18 – Évolution de la somme des flux de vapeur d'eau en fonction de la hauteur du volume de contrôle.