

Modélisation des transferts de chaleur et de masse dans une centrale photovoltaïque flottante : utilisation de la méthode des frontières immergées

Baptiste BERLIOUX^{1,2*}, Baptiste AMIOT³, Joseph VERNIER^{3,2}, Martin FERRAND^{3,4}, Rémi LE BERRE², Oume-Lgheit RHAZI², Ronnie KNIKKER¹, Hervé PABIOU¹

¹ INSA-Lyon, CNRS, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, 69100, France

² EDF R&D - Dpt. Technology and Research for Energy Efficiency, Écuellles, 77250, France

³ CEREAS - École des Ponts, EDF R&D, Marne la Vallée, 77455, France

⁴ EDF R&D - Dpt. Fluid Mechanics Energy and Environment, Chatou, 78401, France

*(auteur correspondant : baptiste.berlioux@edf.fr)

Résumé - Les centrales photovoltaïques flottantes présentent de nombreux avantages, notamment en termes d'optimisation de la ressource foncière, de potentiel de refroidissement des modules, et de réduction de l'évaporation. La modélisation numérique par la méthode des frontières immergées est utilisée pour simuler les transferts de chaleur et de masse dans une centrale flottante, offrant une certaine finesse dans la modélisation de la géométrie. Les résultats numériques sont confrontés à des essais en soufflerie et une application au photovoltaïque flottant présente les premiers résultats de l'impact sur le taux d'évaporation.

Nomenclature

Abréviations

PV Photovoltaïque

PVF Photovoltaïque flottant

APV Agrivoltaïsme

CFD Computational Fluid Dynamics

IBM Immersed Boundary Methods

Géométries

L Longueur du domaine, m

h Hauteur du domaine, m

L_s Longueur d'entrée, m

L_{pv} Longueur du panneau, m

e_{pv} Épaisseur du panneau, m

B Hauteur du panneau, m

α Inclinaison du panneau, °

p_{pv} Espacement entre les panneaux, m

Nr Nombre de rangées

Variables

T_w Température de l'eau, °C

q_w Humidité spécifique de l'eau, kg kg⁻¹

z_0 Rugosité du sol, m

ϵ_{evap} Réduction d'évaporation

φ_T Densité de flux de chaleur, W m⁻²

φ_q Densité de flux de masse, kg m⁻² s⁻¹

1. Introduction

Face à la pression croissante sur les sols disponibles [1], les centrales PV s'intègrent de plus en plus dans une logique de double usage, avec des applications innovantes comme le photovoltaïque flottant (PVF) ou l'agrivoltaïsme (APV) [1, 2]. Ces approches multi-usages ne se limitent pas à optimiser la rentabilité des surfaces, mais introduisent également des interactions complexes avec les différents systèmes environnants. En modifiant le microclimat local, elles influencent directement la dynamique de différents phénomènes et inversement. Par exemple, dans le cas du PVF, les panneaux influencent les flux de chaleur et de masse au-dessus de la surface de l'eau, contribuant à réduire l'évaporation des lacs et des réservoirs [1]. En retour, les panneaux peuvent bénéficier d'un effet de refroidissement naturel (cooling effect) grâce à l'eau [1]. Ces interactions bidirectionnelles entre systèmes soulignent la nécessité de mieux comprendre

les couplages entre les performances des panneaux PV et les dynamiques des milieux qu'ils modifient. Bien que des modèles existent pour analyser ces interactions [3], ils peinent à intégrer précisément les effets conjoints des conditions météorologiques et des échanges thermiques et massiques. Ces phénomènes sont fortement influencés par les conditions locales, telles que la vitesse de l'écoulement, les niveaux de turbulence, ou encore les gradients thermiques et hydriques. Ces paramètres conditionnent l'intensité des effets observés et leur étendue. Dans ce cadre, la mécanique des fluides numériques (Computational Fluid Dynamics, CFD) apparaît comme une solution puissante, permettant de modéliser ces interactions complexes, notamment pour des systèmes comme le PVF, où l'impact sur l'évaporation et les flux de chaleur peut être crucial. Cependant, les approches classiques, basées sur une discrétisation spatiale explicite des panneaux, sont coûteuses en calcul, limitant leur application à un petit nombre de configurations [4].

Pour surmonter ces limites, cette étude propose l'utilisation de la méthode des frontières immergées (Immersed Boundary Methods, IBM) [5]. En représentant les panneaux par des termes sources artificiels intégrés dans les équations de Navier-Stokes, l'IBM simplifie la discrétisation spatiale et offre une flexibilité dans la modification des configurations [6]. Cette méthode ouvre la possibilité d'explorer systématiquement les interactions entre la centrale PV et son environnement, en vue d'optimiser à la fois sa performance et son impact sur l'environnement. Dans un premier temps, cette étude confronte les résultats numériques à des essais en soufflerie publiés permettant d'approuver la méthode. Puis, l'analyse des flux de chaleur et de masse est menée dans la configuration d'une centrale flottante.

2. Matériel et méthode

2.1. Modélisation numérique

Dans cette étude, les simulations numériques sont réalisées à l'aide du logiciel de calcul volumes-finis `code_saturne` [7], dont le module atmosphérique intégré constitue un outil adapté à la modélisation des phénomènes climatiques complexes. Le logiciel permet de calculer une large gamme de variables pertinentes pour l'étude des interactions climatiques, notamment les champs de vitesse, de pression, de température, de densité et d'humidité. Ces grandeurs sont déterminées grâce à la résolution numérique des équations de Navier-Stokes couplées à des modèles de transfert thermique et de transport de masse. Le modèle RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) est utilisé pour calculer les quantités moyennes des variables d'intérêt et la turbulence est modélisée à l'aide du modèle $k - \epsilon$ production linéaire [8].

Dans le cadre de simulations numériques impliquant des objets immergés dans un écoulement, la représentation explicite de la géométrie à l'aide d'un maillage conforme peut s'avérer particulièrement coûteuse en termes de temps de calcul et de ressources. Afin de surmonter ces limitations, la méthode des frontières immergées constitue une approche prometteuse, permettant d'intégrer les effets des objets solides dans un maillage cartésien. Elle évite ainsi la nécessité de raffiner localement autour des géométries complexes ou de remailler le domaine pour chaque configuration géométrique [5]. L'IBM repose sur l'introduction de termes sources artificiels dans les équations de Navier-Stokes, permettant de reproduire les effets des obstacles sur l'écoulement sans nécessiter de discrétisation explicite de leur surface.

2.2. Présentation de la configuration Soufflerie

La première partie de l'étude s'attache à démontrer que l'IBM est bien adaptée à l'étude des centrales solaires. À cette fin, une configuration de référence est utilisée, inspirée des travaux expérimentaux de Glick et al. [9, 10], qui ont analysé l'impact de panneaux photovoltaïques sur l'écoulement d'une veine atmosphérique. Ainsi, le domaine de calcul reproduit en 2D la veine de soufflerie décrite dans [10] qui mesure $L = 5$ m de long et $h = 0.8$ m de haut (voir Figure 1). À une distance $L_s = 2.6$ m de l'entrée, dix rangées ($N_r = 10$) de panneaux photovoltaïques réduits sont positionnés. Chaque panneau a une longueur de $L_{pv} = 50.8$ mm et une épaisseur de $e_{pv} = 5.3$ mm. L'espacement entre deux rangées de panneaux est fixé à $p_{pv} = 88$ mm. Ceux-ci sont placés à une hauteur $B = 38$ mm par rapport au sol. Quatre inclinaisons sont étudiées : $\alpha = -30^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 30^\circ$ et $\alpha = 45^\circ$. Les panneaux sont modélisés implicitement dans ce domaine grâce à la méthode des frontières immergées, telle que décrite dans la section 2.2.

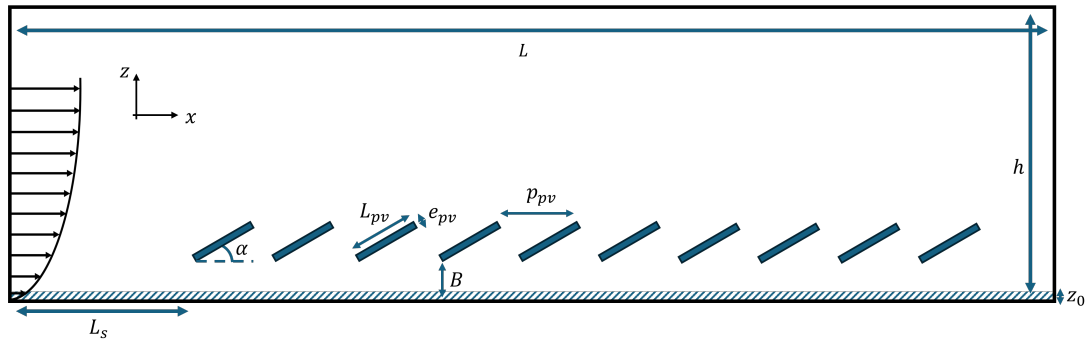


Figure 1 : Schéma du domaine de calcul et de la configuration bidimensionnelle étudiée.

Les conditions limites utilisées reprennent celles décrites dans [9], avec un profil de vitesse turbulent imposé en entrée pour reproduire l'écoulement dans la soufflerie. Au sol, une rugosité équivalente à $z_0 = 5$ mm est appliquée afin de simuler une couche limite atmosphérique. La sortie du domaine est laissée libre.

Le domaine est discrétisé à l'aide d'un maillage cartésien, conçu de manière à ce que chaque panneau (incliné à $\alpha = 45^\circ$) soit représenté par au moins 8 cellules dans sa longueur (voir Figure 2). Dépendant de la position du panneau, sa proportion immergée dans chaque cellule varie. Cette proportion est appelée porosité $\phi_{poro} = V_F/V_T$, où V_F étant la volume fluide et V_T le volume totale de la cellule. Après une étude d'indépendance des résultats vis-à-vis du maillage, le maillage final contient un total de 144 000 cellules, permettant d'obtenir des résultats stabilisés sans variations significatives au raffinement supplémentaire. L'IBM offre un avantage considérable dans ce contexte, car elle permet de modéliser différentes configurations des panneaux (quatre inclinaisons ici) en utilisant un maillage cartésien unique, sans nécessiter de remaillage pour chaque configuration. Cela réduit significativement les coûts de calcul et simplifie la mise en œuvre des simulations. Cette méthode est particulièrement adaptée aux études paramétriques, comme celles impliquant des variations de l'inclinaison ou de la position des objets, car elle permet de conserver un maillage fixe tout en modifiant la géométrie immergée.

2.3. Présentation de la configuration PVF

Une seconde partie de l'étude propose d'utiliser les IBM pour un cas typique d'une installation photovoltaïque flottante en transposant la géométrie de la centrale étudiée en soufflerie dans

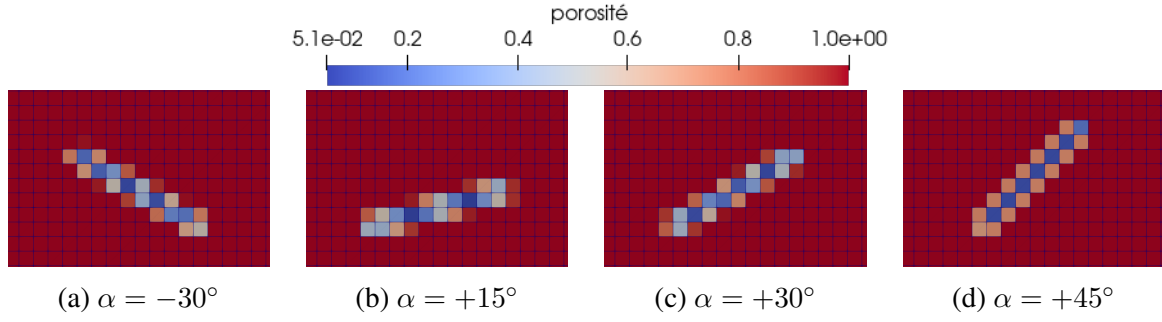


Figure 2 : Représentations implicites des panneaux dans le maillage pour les configurations étudiées.

un domaine ouvert à échelle réelle. Le domaine de calcul, illustré à la Figure 1, est alors adapté pour représenter une configuration réaliste, avec des dimensions caractéristiques : une longueur de $L = 150$ m, une hauteur de $h = 30$ m, et une longueur d'entrée de $L_s = 86$ m. Les dimensions des panneaux photovoltaïques sont également ajustées, avec une longueur $L_{pv} = 1$ m, une épaisseur de cadre de $e_{pv} = 0.04$ m, et une inclinaison représentative pour des centrales flottantes, fixée à $\alpha = 12^\circ$. La surface inférieure, représentant le lac, est modélisée avec une rugosité réduite, conformément au modèle de Charnock [11]. Une température de surface constante $T_w = 16^\circ\text{C}$ est imposée, et l'air est supposé saturé en humidité spécifique q_w à cette interface. Les conditions en entrée du domaine sont définies conformément à la théorie de similitude de Monin-Obukhov [12], avec, à 10 m d'altitude, une vitesse de 4 m s^{-1} , une température de 15°C , et une humidité relative de 50 %. La vitesse de frottement $u_* = 0.54\text{ m s}^{-1}$ est fixée, garantissant une représentation réaliste de la couche limite atmosphérique et des interactions entre l'écoulement et la surface lacustre.

Cette étude examine l'impact des panneaux photovoltaïques sur les échanges thermiques et massiques à l'interface air-eau, en se concentrant sur les densités de flux de chaleur φ_T et de masse φ_q . En pratique ces densités de flux sont directement données par les lois de parois du modèle CFD [13]. En particulier, l'analyse se concentre sur l'impact des centrales photovoltaïques flottantes sur le taux d'évaporation. L'un des principaux avantages de ces installations réside dans leur capacité à limiter les pertes d'eau par évaporation.

$$\epsilon_{evap} = 1 - \frac{\phi_q^{PV}}{\phi_q^{Libre}} \quad (1)$$

où ϕ_q^{PV} est le flux de masse observé en présence des panneaux photovoltaïques et ϕ_q^{Libre} est le flux de masse mesuré pour une surface libre, en l'absence de panneaux.

3. Résultats et discussion

3.1. Confrontation du modèle avec la configuration Soufflerie

Une première partie des résultats est dédiée à l'étude de la dynamique de l'écoulement dans la configuration Soufflerie (voir section 2.2.) afin d'évaluer la pertinence des IBM pour reproduire l'écoulement atmosphérique au sein d'une centrale solaire. La Figure 3 montre une bonne correspondance qualitative des simulations avec les mesures de vitesse horizontale (\bar{u}/U_0) et les contraintes de Reynolds ($-\bar{u}'v'/U_0^2$) normalisées par U_0 , la vitesse moyenne de l'écoulement libre ($z = 0.225$ m), fixée à 3.57 m s^{-1} [9]. Les profils présentés sont des moyennes spatiales calculées entre les rangées 8 et 9, pour des inclinaisons $\alpha = -30^\circ$ et $\alpha = 30^\circ$.

Les profils de vitesse (\bar{u}/U_0 , Figure 3) mettent en évidence trois zones caractéristiques. Sous les panneaux, le profil de vitesse imposé par confinement de l'écoulement entre le sol et les panneaux est bien reproduit numériquement sauf pour $\alpha = -30^\circ$, qui correspond à un vent venant de l'arrière du panneau. Dans ce cas, le modèle sous-estime la vitesse liée à la déviation de l'écoulement vers le bas. En revanche, la contrainte de cisaillement turbulent est très bien estimée dans cette zone quels que soient les angles. Dans le sillage des panneaux, une diminution rapide de la vitesse est observée, associée aux recirculations et à la dissipation des structures turbulentes. Ces phénomènes sont correctement modélisés, mais les pics de cisaillement dans cette zone sont légèrement sous-estimés toujours pour $\alpha = -30^\circ$. Au-dessus des panneaux, le profil de vitesse moyenne suit assez bien le profil expérimental. De même, le profil de cisaillement turbulent est assez bien représenté, avec une légère surestimation pour $\alpha = 30^\circ$ et une sous-estimation pour $\alpha = -30^\circ$.

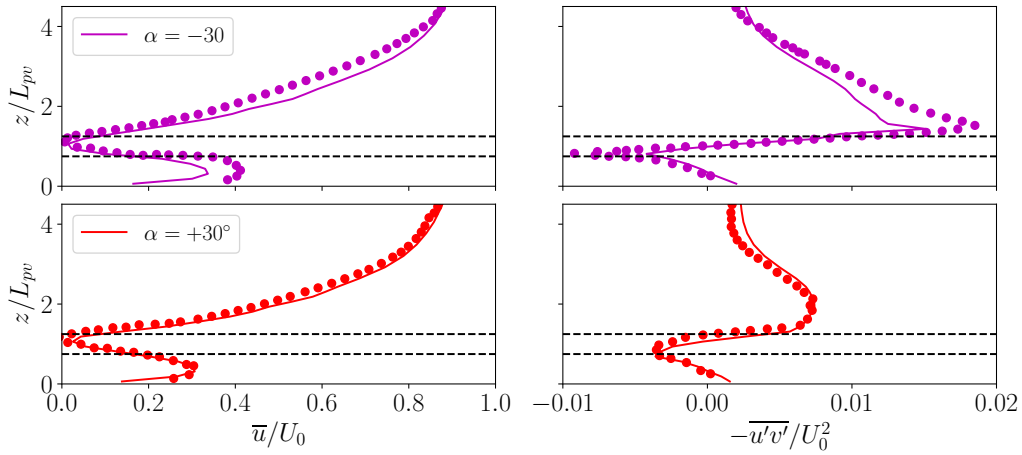


Figure 3 : Comparaison des profils de vitesse \bar{u}/U_0 et des contraintes de Reynolds $-\overline{u'v'}/U_0^2$ expérimentaux (●) [10] et numériques (—).

Quantitativement, les indicateurs $RMSE$ (écart quadratique moyen) et MBE (erreur moyenne des écarts) pour la vitesse moyenne, calculé sur la hauteur du profil normalisé, confirment la précision globale du modèle, tout en mettant en évidence une légère surestimation des vitesses dans certaines zones (voir tableau 1).

Tableau 1 : Indicateurs statistiques entre les valeurs expérimentales [10] et numériques des profils de vitesse et contrainte de Reynolds

α [°]	-30		+15		+30		+45	
	\bar{u}/U_0	$-\overline{u'v'}/U_0^2$	\bar{u}/U_0	$-\overline{u'v'}/U_0^2$	\bar{u}/U_0	$-\overline{u'v'}/U_0^2$	\bar{u}/U_0	$-\overline{u'v'}/U_0^2$
$RMSE$	0.071	0.003	0.048	0.001	0.037	0.001	0.048	0.002
MBE	0.023	-0.001	0.029	0.001	0.026	0.001	0.039	0.002

Dans le cadre des objectifs globaux de cette étude sur les transferts de masse et de chaleur dans une centrale photovoltaïque flottante, cette première analyse met en évidence la capacité de l'IBM à modéliser fidèlement l'écoulement au sein d'un tel système. En effet, ces phénomènes sont fortement influencés par la vitesse et le niveau de turbulence à proximité de la surface du lac [14], rendant indispensable une représentation précise de l'écoulement. Le

modèle développé constitue ainsi une base fiable pour étudier les interactions entre les panneaux photovoltaïques flottants et les flux thermiques et massiques à l'interface air-eau. Grâce au niveau de discrétisation des modules (Figure 2), il reproduit avec une bonne précision les principales caractéristiques de l'écoulement. Des améliorations, telles qu'un maillage plus fin ou l'utilisation de modèles de turbulence avancés (LES), pourraient affiner encore les résultats en réduisant les écarts observés. Toutefois, ces approches impliqueraient un coût de calcul significativement plus élevé, limitant leur applicabilité dans le cadre d'études nécessitant un grand nombre de simulations. Ainsi, la précision atteinte avec ce modèle est jugée suffisante pour analyser l'impact de la géométrie d'une centrale photovoltaïque flottante sur les transferts de chaleur et de masse, tout en conciliant rigueur numérique et faisabilité computationnelle.

3.2. Transfert de chaleur et de masse à la surface d'un lac pour une configuration PVF

La configuration PVF (décrite dans la section 2.3.) est reprise pour l'étude des transferts de chaleur et de masse dans le cadre d'une centrale PVF. Dans un premier temps, le nombre de rangée (Nr) est fixé à 10, la hauteur B à 0.2 m et l'espacement entre les rangées (p_{pv}) à 2 m. La Figure 4 présente le champ de température autour des panneaux, mettant en évidence l'influence de leur présence sur la distribution thermique créée par une eau un peu plus chaude que l'air en entrée du domaine. On observe une accumulation de chaleur dans les zones situées sous et en aval des panneaux, due à la perturbation de l'écoulement et aux échanges réduits avec l'air ambiant dans ces régions.

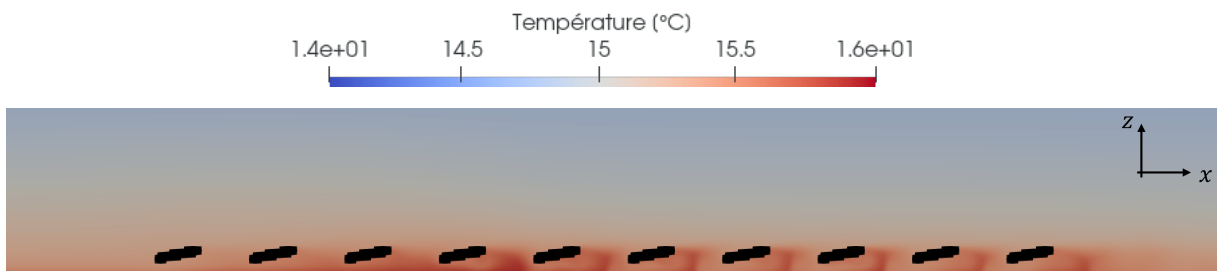


Figure 4 : Température [$^{\circ}\text{C}$] proche des panneaux. La hauteur du domaine montré est de $4L_{pv}$

Ces fluctuations thermiques le long de la centrale se traduisent par des variations des flux de chaleur comme le montre la Figure 5 qui présente les densités de flux de chaleur thermique et massique à la surface de l'eau. Le pic observé juste en amont de la centrale – pic également observé en amont de chaque panneau – correspond à une intensification des échanges liée à une déviation par les panneaux de l'écoulement principal, ce qui entraîne une augmentation du transport vertical de chaleur et de masse. Sous les panneaux (zones grisées dans la Figure 5), la vitesse de l'écoulement est fortement réduite, ce qui limite les échanges avec la surface du lac et diminue les transferts de chaleur et de masse. Entre les panneaux, la vitesse du vent a tendance à augmenter à nouveau provoquant une croissance des flux. D'autres simulations montrent que cette augmentation est d'autant plus importante que l'espacement entre les panneaux (paramètre p_{pv} sur la Figure 1) est grand. On notera également que les flux de masse et de chaleur sont très corrélés dans notre étude, ce qui traduit le fait qu'ils sont principalement gouvernés par les fluctuations de vitesse de l'écoulement turbulent. Cette proportionnalité s'explique par l'absence de prise en compte de l'échauffement des panneaux dans le modèle actuel ainsi que l'absence de transfert radiatif (le flux de chaleur calculé est uniquement un flux convectif).

Afin d'identifier une configuration optimale favorisant la réduction de l'évaporation (voir

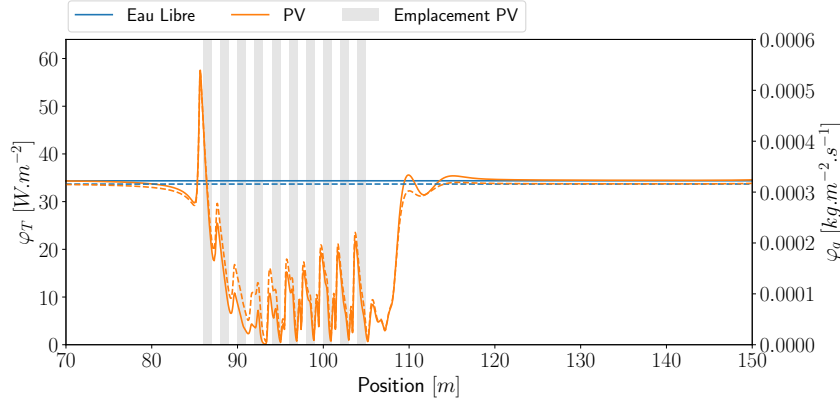


Figure 5 : Densités de flux de chaleur φ_T (—) et de masse φ_q (---) à la surface du lac entre 70 m et 130 m. Les zones grises correspondent à l'emplacement des panneaux.

équation 1), nous avons étudié l'effet de trois paramètres géométriques : le nombre de rangées (Nr), la hauteur des panneaux (B) et l'espacement entre les rangées (p_{pv}). La Figure 6 présente la réduction de l'évaporation selon trois paramètres. Comme attendu, une couverture plus dense du lac (nombre de rangées Nr élevé) réduit l'évaporation, avec une évolution linéaire. En revanche, lorsque la hauteur B des panneaux dépasse 0.75 m, leur effet diminue, devenant négligeable à 2 m. Enfin, l'espacement p_{pv} présente un optimum autour de 5 m. Trop rapprochés, les panneaux n'agissent que localement. Inversement, si trop éloignés, la couche limite de l'air a suffisamment de distance pour se redévelopper pleinement entre deux rangées rendant les panneaux indépendants les uns des autres. Dans ce cas, en amont de chaque panneau, le flux d'évaporation φ_q augmente à nouveau, annulant une partie de l'effet protecteur. Ces résultats sont particulièrement intéressants, car ils mettent en lumière une différence notable entre les centrales PVF et celles installées au sol, où l'objectif est généralement de maximiser le taux d'occupation des surfaces. De plus, ces observations s'alignent avec les récentes réglementations qui recommandent d'espacer davantage les panneaux flottants [15] afin de limiter leur impact sur la qualité de l'eau et à préserver la faune et la flore aquatiques.

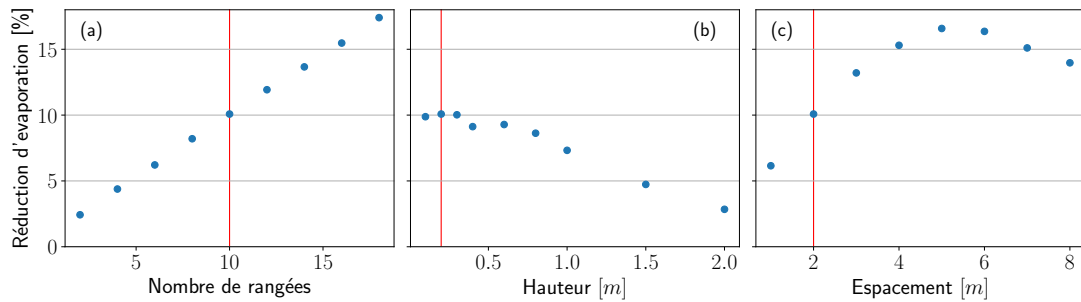


Figure 6 : Réduction d'évaporation pour différentes configurations de centrale. La ligne verticale rouge représente la configuration de référence.

4. Conclusion et perspectives

Cette étude montre la capacité des IBM à modéliser l'écoulement proche de panneaux photovoltaïques révélant l'impact de la hauteur, l'espacement, et du nombre de panneaux sur la

réduction de l'évaporation. Elle pose les bases pour des analyses plus approfondies des interactions complexes entre les panneaux photovoltaïques, l'air et l'eau. Les travaux futurs pourraient intégrer des paramètres supplémentaires – température des panneaux, effets des flotteurs, dynamique thermique de la surface lacustre – afin de mieux appréhender et optimiser les performances des centrales PVF.

Références

- [1] A Sahu, N Yadav, and K Sudhakar. Floating photovoltaic power plant : A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 66 :815–824, 2016.
- [2] H Dinesh and J M Pearce. The potential of agrivoltaic systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 54 :299–308, 2016.
- [3] S Gorjian, H Sharon, H Ebadi, K Kant, F B Scavo, and G M Tina. Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems. *Journal of Cleaner Production*, 278 :124285, 2021.
- [4] C M Jubayer and H Hangan. A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, 153 :60–70, 2016.
- [5] R Mittal and G Iaccarino. Immersed boundary methods. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 37 :239 – 261, 2005.
- [6] G F Narváez, M. Ferrand, T. Fonty, and S. Benhamadouche. Automatic solid reconstruction from 3-d points set for flow simulation via an immersed boundary method. In *Int. Conf. Finite on Volumes for Complex Applications*, pages 355–363. Springer, 2023.
- [7] F Archambeau, N Méchitoua, and M Sakiz. Code Saturne : A Finite Volume Code for Turbulent flows - Industrial Applications. *IJFV*, 1(1), 2004.
- [8] V Guimet and D Laurence. A linearised turbulent production in the $k-\varepsilon$ model for engineering applications. In *Engineering Turbulence Modelling and Experiments 5*, pages 157–166. Elsevier, 2002.
- [9] A Glick, N Ali, J Bossuyt, G Recktenwald, M Calaf, and R B Cal. Infinite photovoltaic solar arrays : Considering flux of momentum and heat transfer. *Renewable Energy*, 156 :791–803, 2020.
- [10] A Glick, S E Smith, N Ali, J Bossuyt, G Recktenwald, M Calaf, and R B Cal. Influence of flow direction and turbulence intensity on heat transfer of utility-scale photovoltaic solar farms. *Solar Energy*, 207 :173–182, 2020.
- [11] H Charnock. Wind stress on a water surface. *Q. J. R. Meteo. Soc.*, 81(350) :639–640, 1955.
- [12] A.S Monin and A.M Obukhov. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Tr. Akad. Nauk. SSSR Geophys. Inst.*, 24 :163–187, 1954.
- [13] J F Wald. *Lois de paroi adaptatives pour un modèle de fermeture du second ordre dans un contexte industriel*. PhD thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 2016.
- [14] B Berlioux, B Amiot, M Ferrand, R Le Berre, O L Rhazi, J Vidal, H Pabiou, and R Knikker. Numerical analysis of evaporation reduction in floating photovoltaic power plants : influence of design parameters. *EPJ Photovoltaics*, 16 :4, 2025.
- [15] R Maier, L Lütz, S Risch, F Kullmann, J Weinand, and D Stolten. Potential of floating, parking, and agri photovoltaics in Germany. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 200 :114500, 2024.