

### Pourquoi le photovoltaïque flottant (PVF) ?

Face à la pression croissante sur l'usage des terres, le photovoltaïque s'oriente vers des solutions à double usages. Parmi elles, les centrales photovoltaïques flottantes (PVF) se distinguent en exploitant les plans d'eau inutilisés tout en offrant des bénéfices supplémentaires :

- **Effet de refroidissement** des modules : amélioration du rendement
- **Réduction de l'évaporation** : préservation de la ressource en eau
- **Comment modéliser précisément les effets de refroidissement et la réduction d'évaporation pour optimiser la conception des centrales PVF ?**



Centrale PV flottant de Lazer 20MWc (Hautes-Alpes, 05)

### Modélisation microclimatique

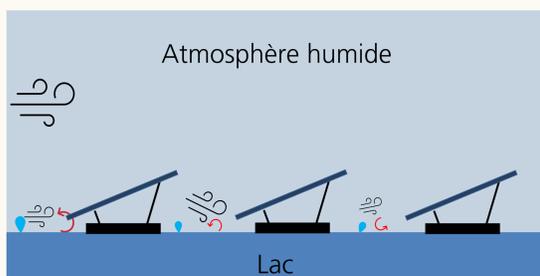
#### Modèle

- Reynolds-Averaged Navier-Stokes ( $\rho, \bar{u}, \bar{P}$ ) + Modèle de turbulence ( $k, \epsilon$ ) + Energie ( $\bar{T}$ ) + Humidité ( $\bar{q}$ ) :

➔ Simulations réalisées avec code.saturne

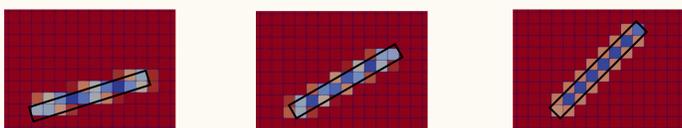
- **Méthode des frontières immergées (IBM) :**

➔ Représentation implicite des panneaux via l'introduction de termes sources (*trainée, dissipation*) dans les équations des Navier-Stokes.



Les IBM présentent plusieurs avantages :

- **Discretisation spatiale simplifiée**
- **Flexibilité** des configurations
- **Etude paramétrique**



Représentation d'un panneau incliné avec 3 angles différents dans un **maillage unique**

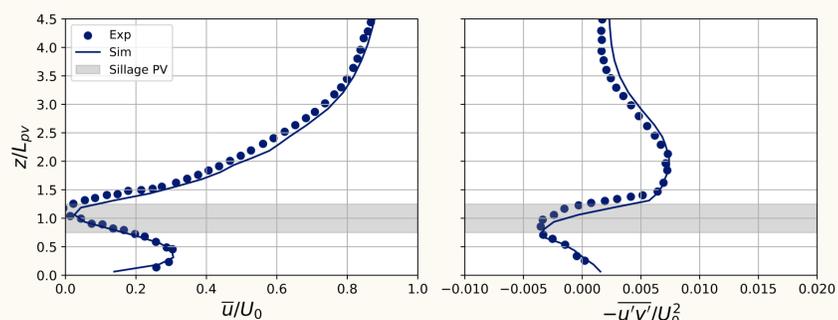
(L'échelle de couleur représente le taux d'occupation de chaque cellule par le module)

#### Validation

Modélisation 2D d'essais en soufflerie d'une centrale PV réduite [Glick et al. 2020]<sup>1</sup>.

- **Nombre de panneaux**  $Nr = 10$
- **Longueur panneau**  $L_{pv} = 50.8 \text{ mm}$
- **Hauteur panneau**  $B = 38 \text{ mm}$
- **Inclinaison des panneaux**  $\alpha_{pv} = 30^\circ$
- **Espacement inter-rangée**  $p_{pv} = 88 \text{ mm}$
- **Vitesse de l'écoulement développé**  $U_0 = 3.57 \text{ m.s}^{-1}$

Comparaison numérique-expérimentale des profils moyens normalisés de vitesse et de contraintes de Reynolds entre les rangs 8 et 9.



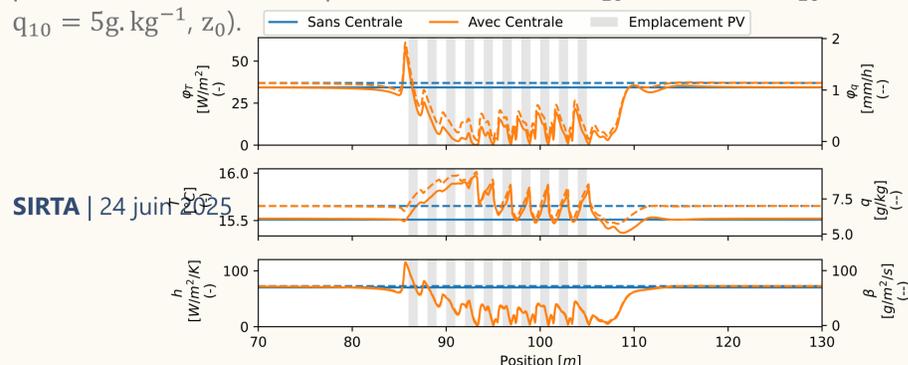
#### Application PVF

Modélisation 2D d'une centrale PVF ( $L_{pv} = 1\text{m}$ ,  $B = 0.2\text{m}$ ,  $\alpha_{pv} = 12^\circ$ ). Pour le photovoltaïque flottant, l'enjeu est d'analyser comment la présence des panneaux influence :

- **le transfert de chaleur** à la surface du lac  $\phi_T = h(T_w - T)$
- **le taux d'évaporation** à la surface du lac  $\phi_q = \beta(q_w - q)$

Les coefficients de transfert  $h$  et  $\beta$  sont donnés par les lois de parois<sup>3</sup>.  $T$  et  $q$  sont la température et l'humidité spécifique de l'air à la première cellule.

**Hypothèses :** Le lac est à température constante ( $T_w = 16^\circ\text{C}$ ) et humidité saturée ( $q_w$ )<sup>2</sup> en surface. Les panneaux sont supposés non chauffés. Des profils idéalisés sont imposés en entrée<sup>3</sup> ( $U_{10} = 6 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $T_{10} = 15^\circ\text{C}$ ,  $q_{10} = 5 \text{ g.kg}^{-1}$ ,  $z_0$ ).

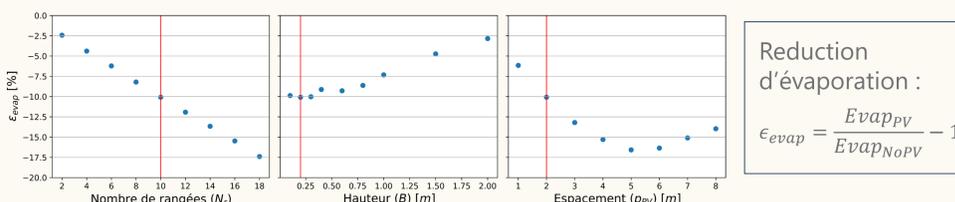


**Réduction significative des échanges** de chaleur et de masse à l'interface air-eau sous la centrale :

- Accumulation de chaleur et d'humidité ➔ Diminution de  $\Delta T$  et  $\Delta q$
- Diminution de la vitesse moyenne ➔ Réduction des coefficients de transfert  $h$  et  $\beta$

**Modèle aérodynamique :** Fonction de Lewis  $F(Le) = h/(\beta c_p) \approx 1$ , Forte corrélation transfert de chaleur et de masse.

#### Etudes de sensibilité



Reduction d'évaporation :

$$\epsilon_{evap} = \frac{Evap_{PV}}{Evap_{NoPV}} - 1$$

Configuration optimale pour limiter l'évaporation :

- **Maximisation** du nombre de rangées
- **Faible hauteur des panneaux**
- **Existence d'un espacement optimal** entre les rangées

#### Conclusions et perspectives

- ✓ **Validation de l'IBM** pour modéliser l'écoulement autour des modules.
- ✓ **Analyse des interactions air-eau-panneaux** : effets aérodynamiques sur les transferts.
- ✓ **Réduction de l'évaporation** influencée par la hauteur, l'espacement et le nombre de panneaux.
- ☐ **Perspectives** : Application pour un cas réel avec prise en compte de la température des panneaux, des flotteurs et de la dynamique thermique du lac.

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> D. J. G. T. Orlob Glanz. Lincoln Lake ecologic study. Water Resource Engineering, 1973.

<sup>3</sup> 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