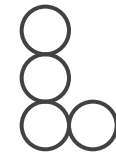


LAGEPP



Université  
Claude Bernard Lyon 1



Systemes photovoltaïques intégrés aux  
bâtiments – Modélisation de la production  
d'énergie en milieu urbain

- Présenté par :  
Maryam ERRAJI

- Encadré par :  
DJIBRILLA MOUNKAILA NOMA  
STEPHANIE GIROUX  
ERIC PEYROL



## Vers une décarbonation des villes

Le milieu urbain, un environnement et une phénoménologie **complexe**

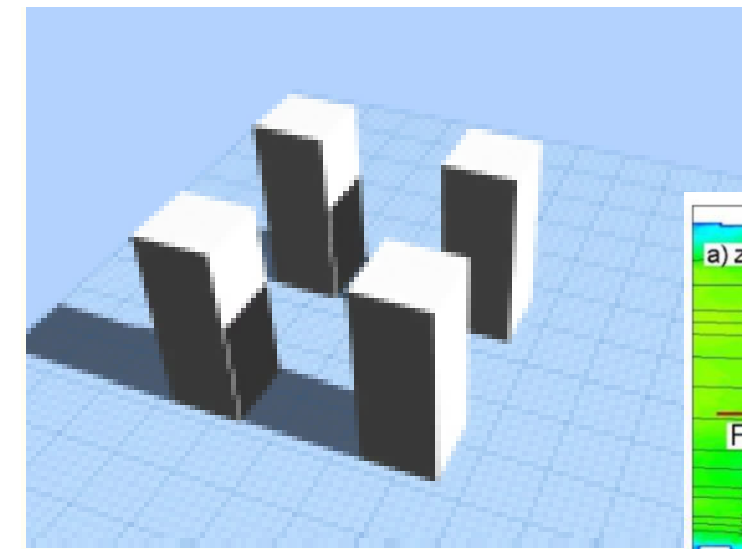
Morphologies urbaine et typologie des bâtiments

**Variabilité et l'intermittence** de la ressource **solaire**

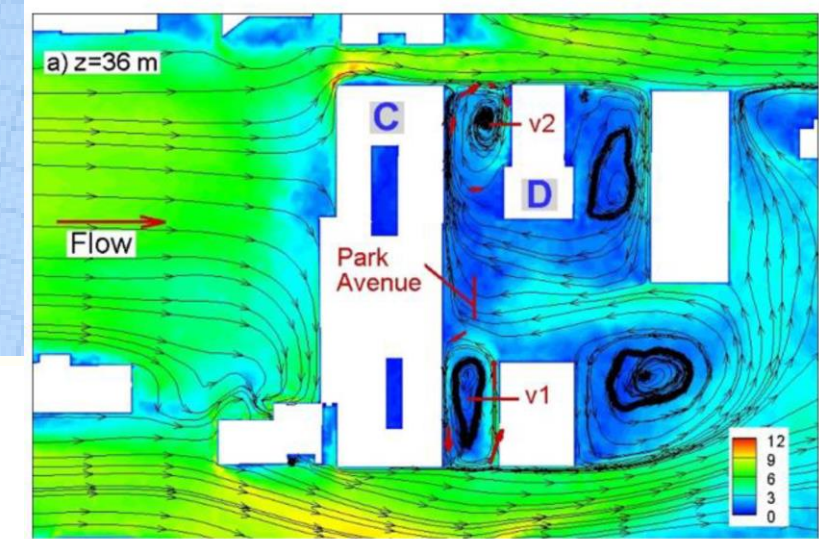
Intensités turbulentes du **vent**, zones de recirculation

Transferts de **chaleur** et de **masse**

Conditions de **pollution atmosphérique**



Ombrages Inter réflexions

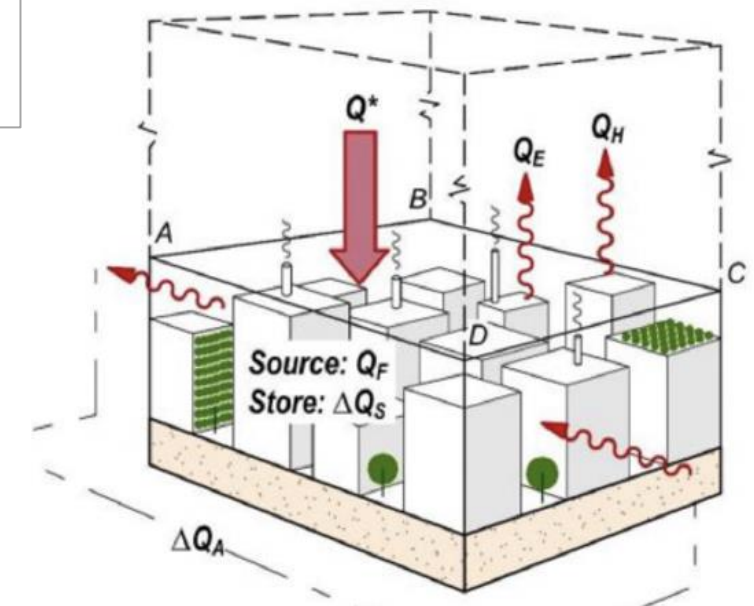


Dynamique des écoulements

**Production PV :  $P_{elec} = f(G, T_{PV})$**

**Perte 0,2 à 0,5 %/°C**

Transferts de chaleur et de masse  
Stockage



## Problématiques

Modélisation des conditions locales proches parois

Prédiction dynamique de la production électrique

Production optimale selon la morphologie de l'îlot de bâtiments / du quartier / de la ville

Impact d'une intégration massive sur l'îlot de Chaleur Urbain

Autonomie énergétique – Bâtiments producteurs et consommateurs

Gestion du réseau à l'échelle de l'îlot de bâtiments / du quartier / de la ville

Modélisation – Simulations  
Sciences des données  
Méthodes d'apprentissage  
Algorithmes d'optimisation et de décision



- **Programme AUFRANDE : Impact des systèmes photovoltaïques urbains sur les flux atmosphériques et l'effet d'îlot de chaleur**



- Identification des structures dynamiques et thermiques cohérentes qui peuvent affecter localement le mélange turbulent et, par conséquent, les paramètres de la couche limite atmosphérique.
- Etude de l'influence des assemblages urbains et des propriétés radiatives de la surface sur le climat de la ville

- Thèse en cotutelle : UCBL - LAGEPP / UNSW - School of MME / CEREMA
- Mai 2024-2025

- **Chaire sur la Transition du territoire avec une approche intégrée et multidisciplinaire** autour des axes suivants :

- Villes, territoires ruraux, bâtiments, santé et bien-être
- Cadre bâti, biodiversité et qualité de vie
- Architecture, urbanisme, construction
- Système urbain, rural, économe en ressources, sobre et résilient
- **Énergie, bâtiments et transports**





# Sommaire

01. introduction

02. Contexte et objectif

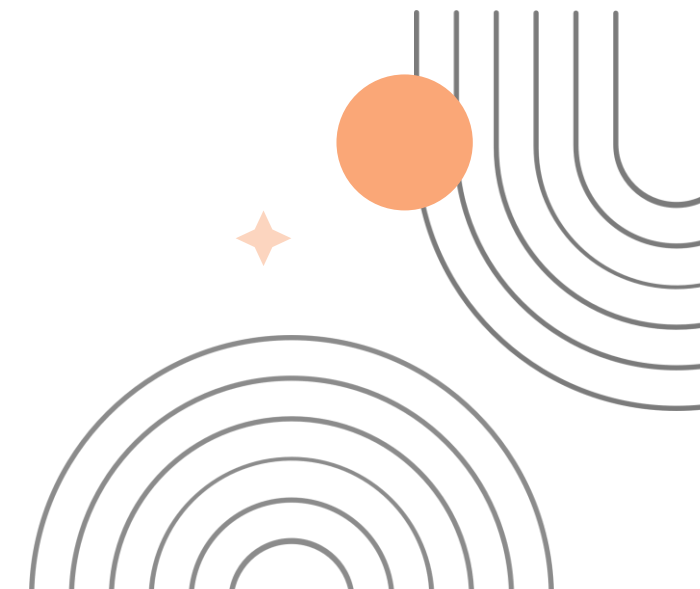
03. Structure du BIPV

08. Conclusion et perspectives

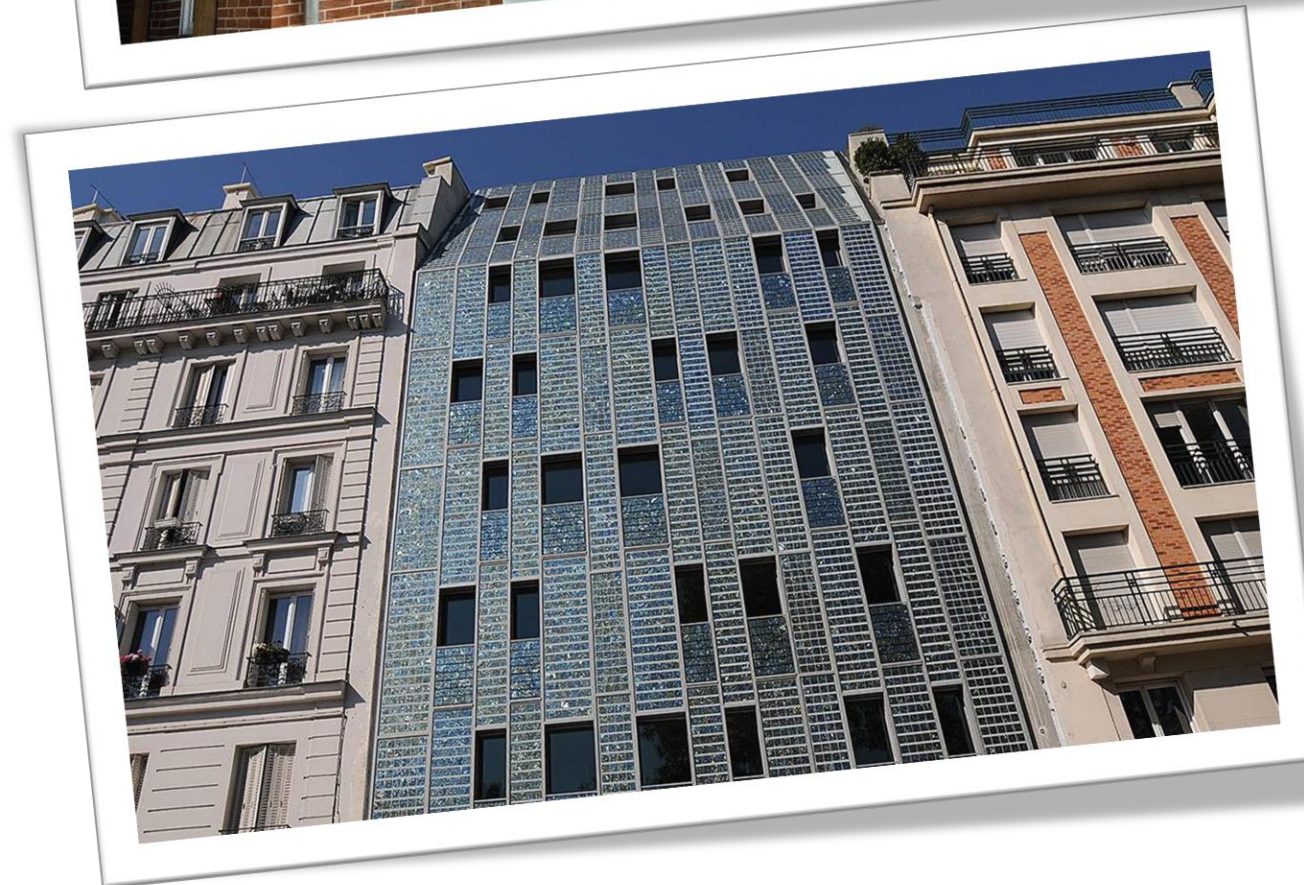
04. Méthodologie

06. Modèle thermique

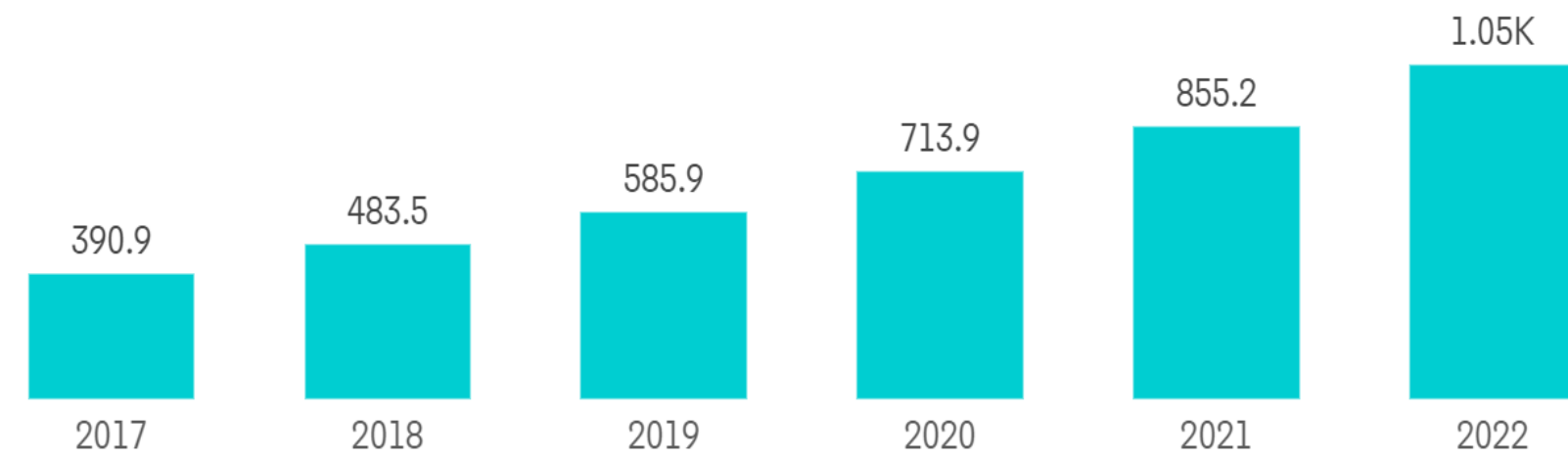
07. validation et résultats



# INTRODUCTION



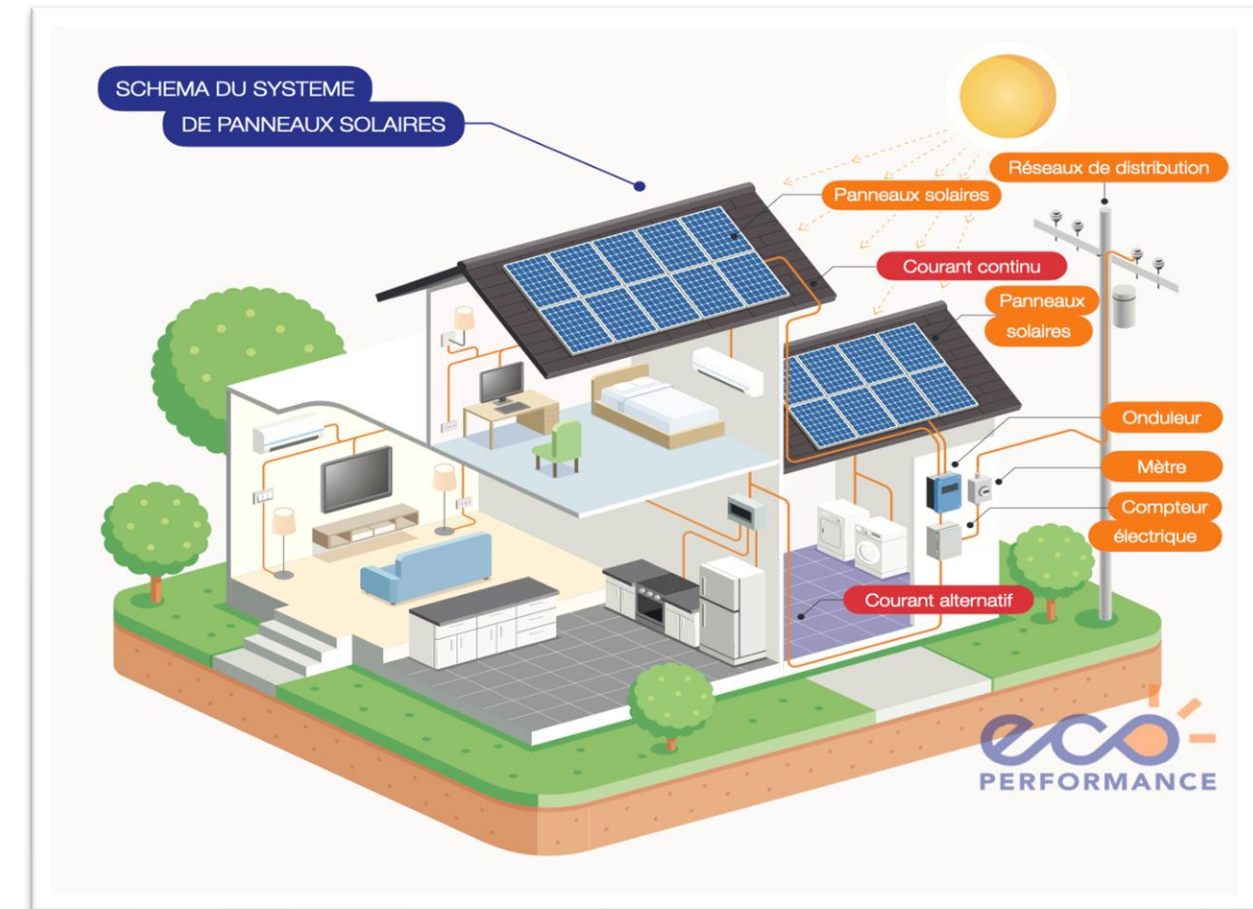
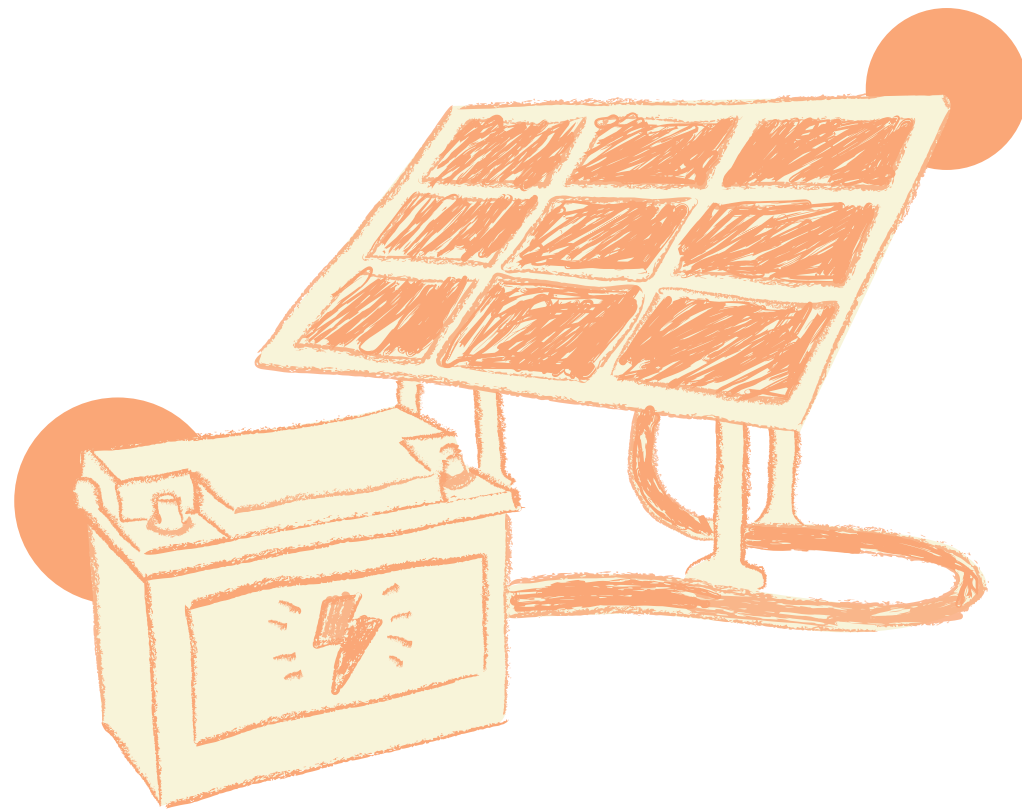
Building-integrated photovoltaics (BIPV) Market: Solar PV Installation, in Gigawatt, Global, 2017-2022



Source: International Renewable Energy Agency



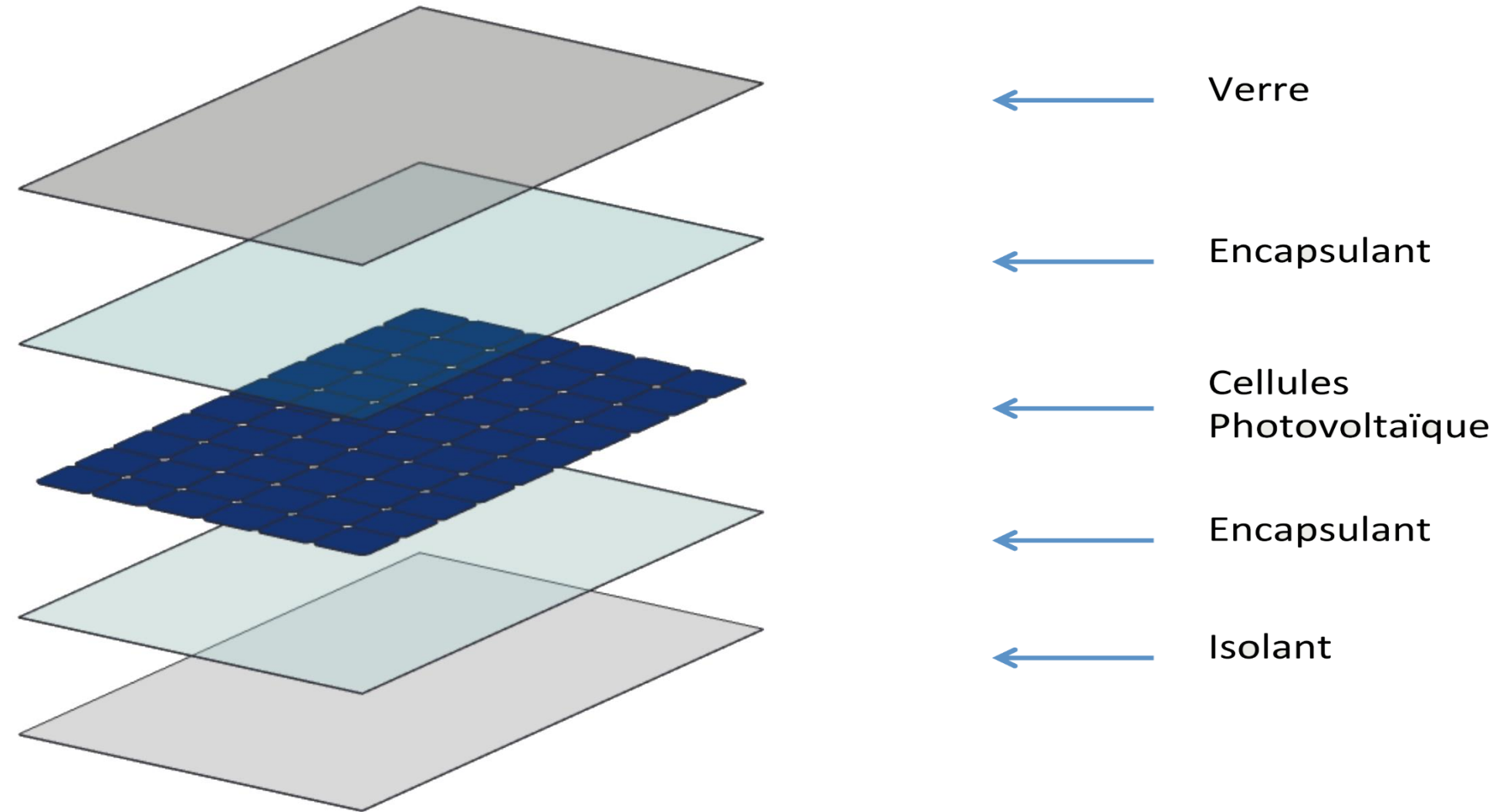
# Contexte et objectif



Une modélisation thermique précise pour optimiser l'intégration et les performances des panneau photovoltaïques dans le contexte urbain.

# STRUCTURE DU BIPV

- Poly-Si PV panel
- 60 cellules en séries,
  - Dimension de la cellule:  
**156.5\*156.5 mm**
- Longueur et largeur du panneau :  
**1652\*994 mm**



Layer	Thickness - th (mm)	Thermal conductivity - k (W/m K)	Density - $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat capacity - C (J/kg K)
Glass	3	1.8	3000	500
EVA Top	0.2	0.35	960	2090
PV Cells	0.3	148	2330	677
EVA Bottom	0.2	0.35	960	2090
Tedlar	0.1	0.2	1200	1250

Source : Aly et al.,2018

# Methodologie



•Méthode des différences finies en 1D

•Schéma implicite pour la résolution temporelle





# Methodologie

• Méthode des différences finies en 1D

- Équation de base de la chaleur en 1D :

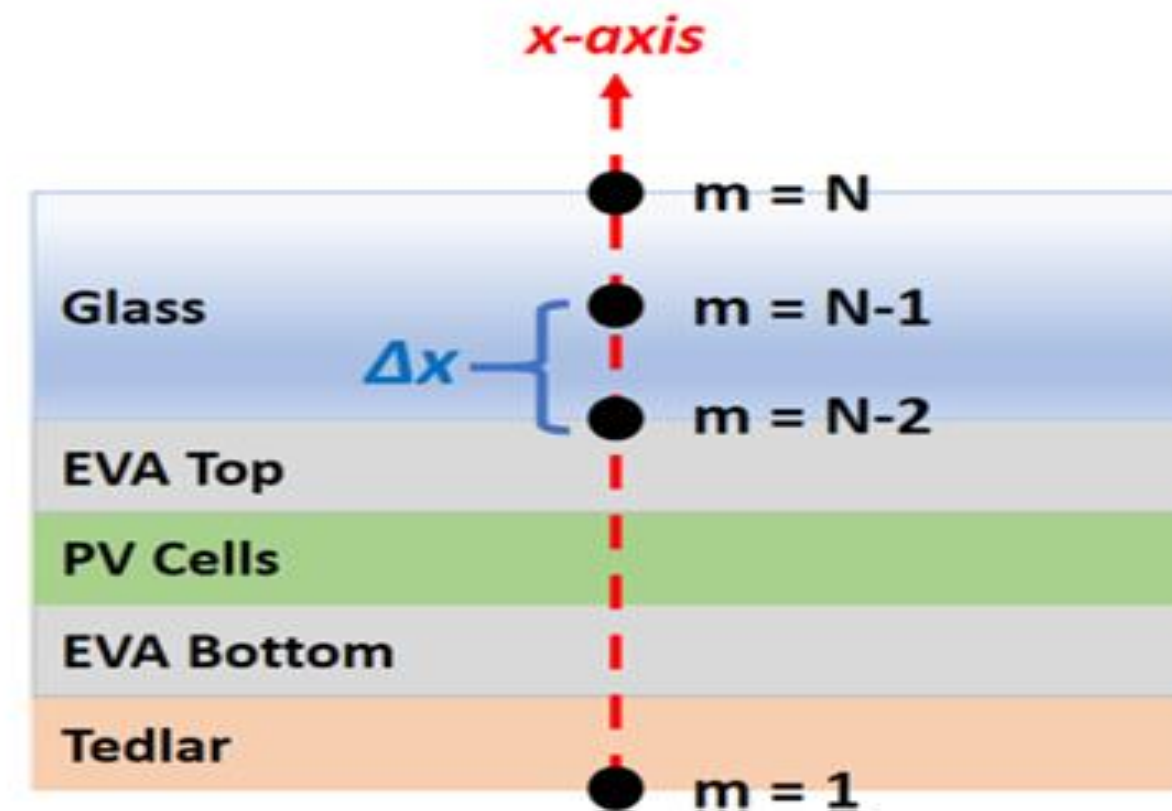
$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right)$$

- Discrétisation par différences finies :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx (T[i + 1] - 2 * T[i] + T[i - 1]) / \Delta x^2$$

- Discrétisation spatiale :

- Pas spatial :  $\Delta x = \frac{th_{PV,panels}}{N}$
- Position des nœuds :  $x_m = m\Delta x$ , avec  $1 \leq m \leq N$



# Methodologie

•Schéma implicite pour la  
résolution temporelle

- Dans un schéma implicite, on obtient une équation de la forme :

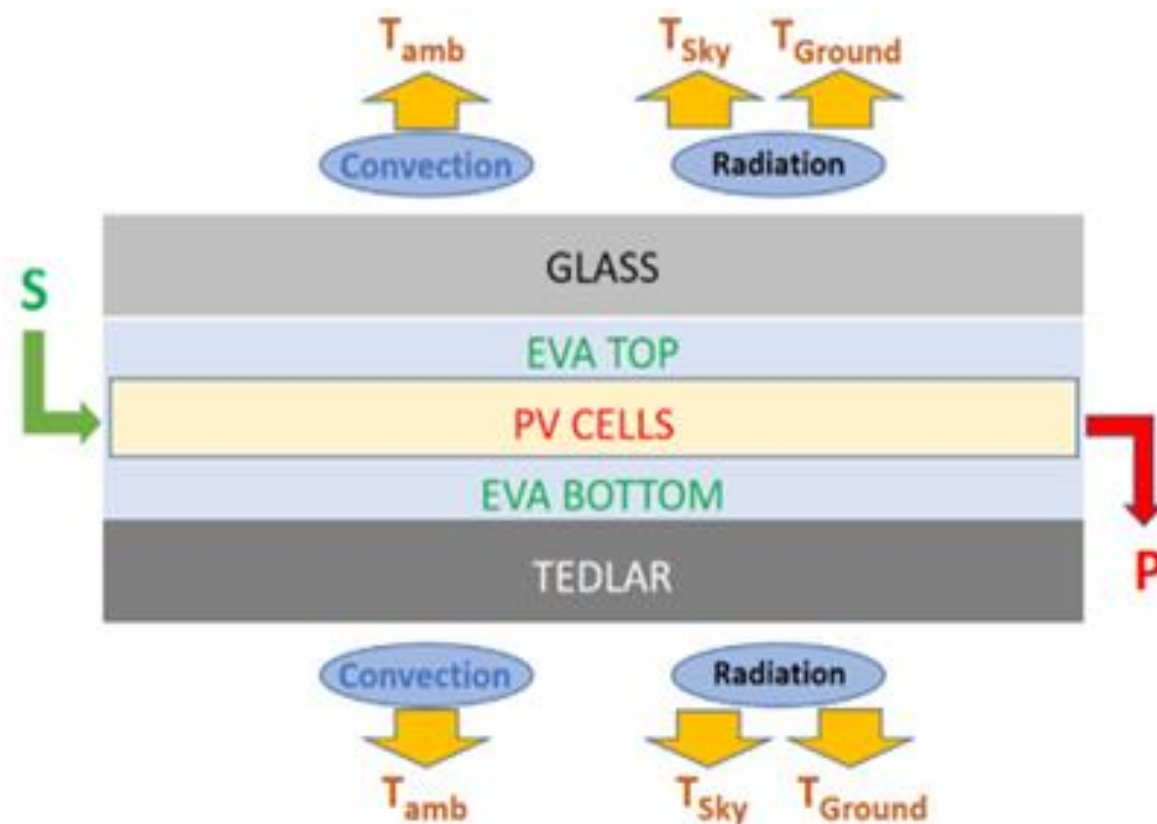
$$-r * T[i - 1, n + 1] + (1 + 2r) * T[i, n + 1] - r * T[i + 1, n + 1] = T[i, n]$$

où  $r = \alpha * \Delta t / \Delta x^2$ ,  $n$  est l'indice temporel actuel, et  $n+1$  est le prochain pas de temps.

- Système matriciel :  
Ces équations forment un système linéaire  $AT = B$ ,  
où  $A$  est une matrice tridiagonale

# MODELE thermique

## Équation de base du bilan énergétique



Équation de base du bilan énergétique:

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st}$$

Où :

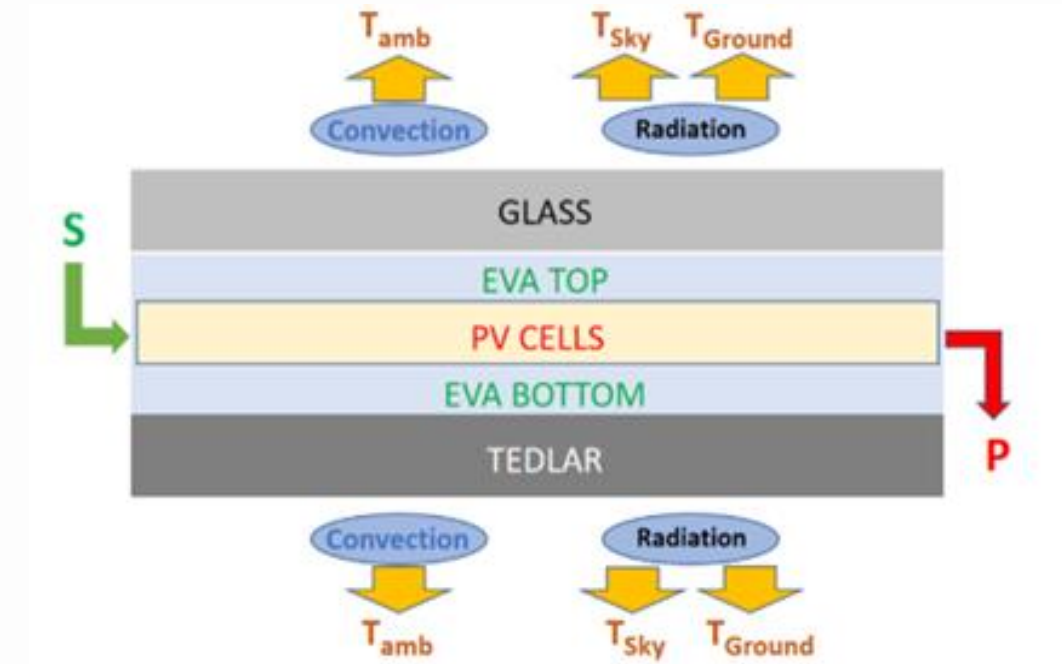
- $\dot{E}_{in}$  est l'énergie thermique entrant dans le volume de contrôle par conduction.
- $\dot{E}_g$  est l'énergie générée à l'intérieur du volume de contrôle (par exemple, la chaleur générée par les cellules PV).
- $\dot{E}_{st}$  est l'énergie stockée dans le volume de contrôle en raison de la capacité thermique du matériau.

# MODELE thermique

## Conditions aux limites

Équations pour les nœuds de surface :

- Pour la surface supérieure (verre)



$$\dot{E}_{st} \rightarrow \frac{\rho C \Delta x}{2 \Delta t} (T[m, p + 1] - T[m, p]) =$$

$$\dot{E}_{in} \rightarrow \left( \frac{k}{\Delta x} \right) (T[m - 1, p + 1] - T[m, p + 1]) + h_{conv} (T_{amb} - T[m, p + 1]) + h_{rad \text{ front sky}} (T_{sky} - T[m, p + 1]) + h_{rad \text{ front Ground}} (T_{Ground} - T[m, p + 1])$$

$$\dot{E}_g \rightarrow + Q_{fg} \frac{\Delta x}{2}$$

- Pour la surface inférieure (Tedlar)

$$\dot{E}_{st} \rightarrow \frac{\rho C \Delta x}{2 \Delta t} (T[m, p + 1] - T[m, p])$$

$$\dot{E}_{in} \rightarrow = \left( \frac{k}{\Delta x} \right) (T[m + 1, p + 1] - T[m, p + 1]) + h_{conv} (T_{amb} - T[m, p + 1]) + h_{rad \text{ back sky}} (T_{sky} - T[m, p + 1]) + h_{rad \text{ back Ground}} (T_{Ground} - T[m, p + 1])$$

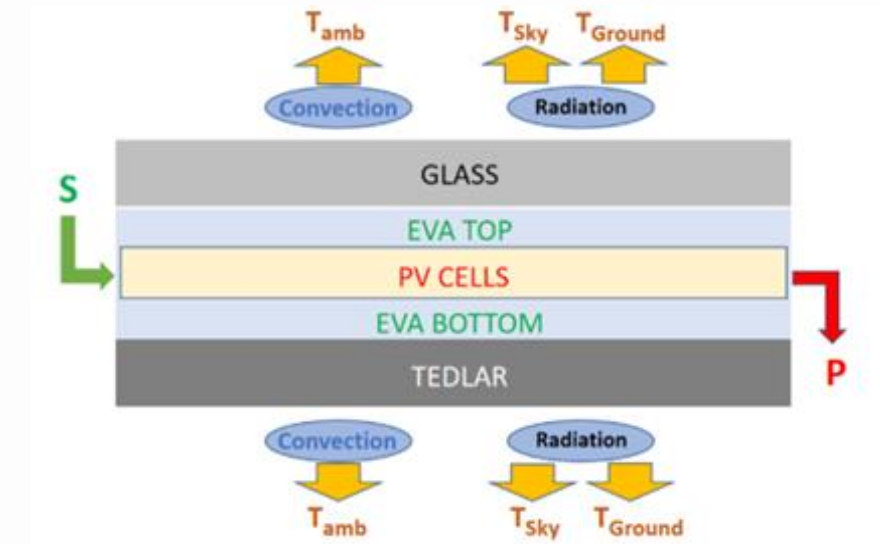
# MODELE thermique

## Construction de la matrice tridiagonale

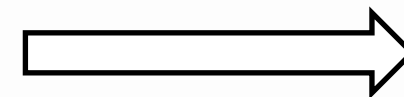
Le système d'équations est sous forme:

$$[A]\{T\} = \{B\}$$

La forme plus élaborée, sous forme matricelle, est:



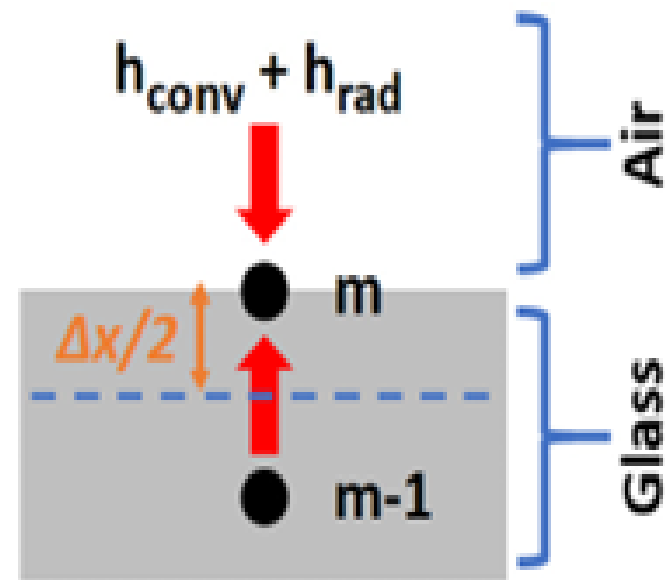
$$\begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \dots & A_{1,N-1} & A_{1,N} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \dots & A_{2,N-1} & A_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ A_{N-1,1} & A_{N-1,2} & \dots & A_{N-1,N-1} & A_{N-1,N} \\ A_{N,1} & A_{N,1} & \dots & A_{N,N-1} & A_{N,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{p+1} \\ T_2^{p+1} \\ \vdots \\ T_{N-1}^{p+1} \\ T_N^{p+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_{N-1} \\ B_N \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 1+2r & -r & 0 & 0 & 0 \\ -r & 1+2r & -r & 0 & 0 \\ 0 & -r & 1+2r & -r & 0 \\ 0 & 0 & -r & 1+2r & -r \\ 0 & 0 & 0 & -r & 1+2r \end{bmatrix}$$

# Modele thermique

10



Volumes de contrôle  
pour les nœuds de la  
partie supérieur en  
verre

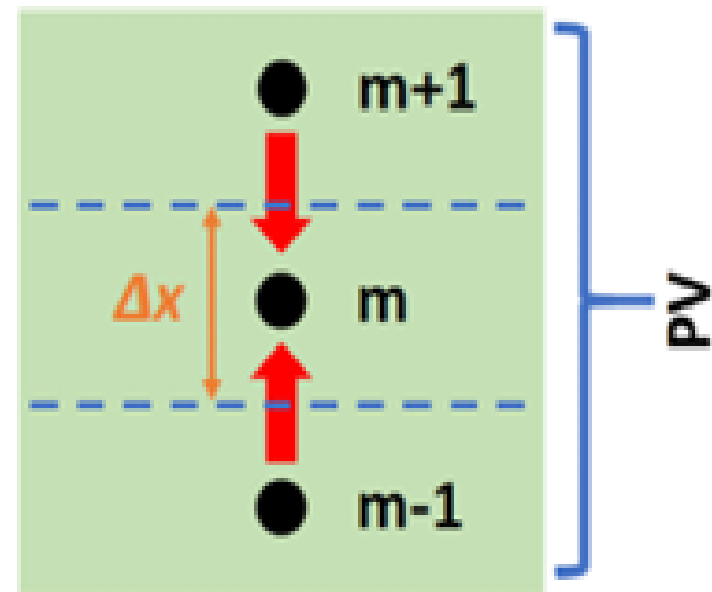
ÉLÉMENT DE A ET B POUR LE NŒUD DE LA SURFACE SUPÉRIEURE DU VERRE

$$A(m, m) = \left(\frac{2\Delta t}{\rho C \Delta x}\right) \left(\frac{\rho C \Delta x}{2\Delta t} + \frac{k}{\Delta x} + h_{conv} + h_{rad \text{ front sky}} + h_{rad \text{ front Ground}}\right)$$

$$A(m, m - 1) = \left(\frac{2\Delta t}{\rho C \Delta x}\right) \left(\frac{k}{\Delta x}\right)$$

$$B(m) = \left[\left(\frac{2\Delta t}{\rho C \Delta x}\right) (T_{amb} h_{conv} + T_{Sky} h_{rad \text{ front sky}} + T_{Gr} h_{rad \text{ front Ground}} + Q_{fg} \frac{\Delta x}{2})\right] + T_m^P$$

# Modele thermique

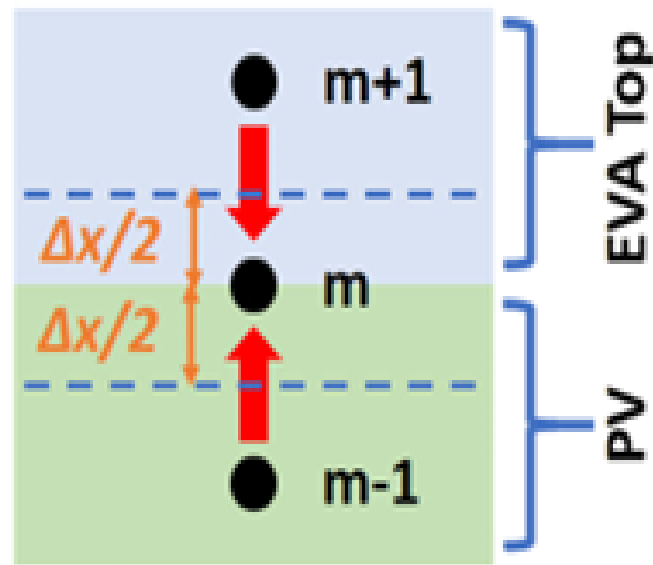


Volumes de contrôle  
pour les nœuds du  
milieu des cellules PV

ÉLÉMENT DE A ET B POUR LES NŒUDS DE LA COUCHE DES CELLULES PV COUCHE NŒUD INTÉRIEUR

$$\begin{aligned}
 A(m, m) &= \left(\frac{\Delta t}{\rho C \Delta x}\right) \left(\frac{\rho C \Delta x}{2 \Delta t} + \frac{k}{\Delta x} + \frac{k}{\Delta x}\right) \\
 A(m, m+1) &= \left(\frac{\Delta t}{\rho C \Delta x}\right) \left(\frac{k}{\Delta x}\right) \\
 A(m, m-1) &= \left(\frac{\Delta t}{\rho C \Delta x}\right) \left(\frac{k}{\Delta x}\right) \\
 B(m) &= \left[\left(\frac{\Delta t}{\rho C \Delta x}\right) Q_{PV} \Delta x\right] + T_m^P
 \end{aligned}$$

# Modele thermique



Volumes de contrôle pour les nœuds de l'interface entre la partie supérieure en EVA et les cellules PV

## ÉLÉMENT DE A ET B POUR LE NŒUD D'INTERFACE EVA TOP/PV CELLS

$$A(m, m) = \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{2\Delta t}{\rho_{top}C_{top} + \rho_{bottom}C_{bottom}} \right) \left( (\rho_{top}C_{top} + \rho_{bottom}C_{bottom}) \frac{\Delta x}{2\Delta t} + \frac{k_{top}}{\Delta x} + \frac{k_{bottom}}{\Delta x} \right)$$

$$A(m, m + 1) = \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{2\Delta t}{\rho_{top}C_{top} + \rho_{bottom}C_{bottom}} \right) \left( \frac{k_{top}}{\Delta x} \right)$$

$$A(m, m - 1) = \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{2\Delta t}{\rho_{top}C_{top} + \rho_{bottom}C_{bottom}} \right) \left( \frac{k_{bottom}}{\Delta x} \right)$$

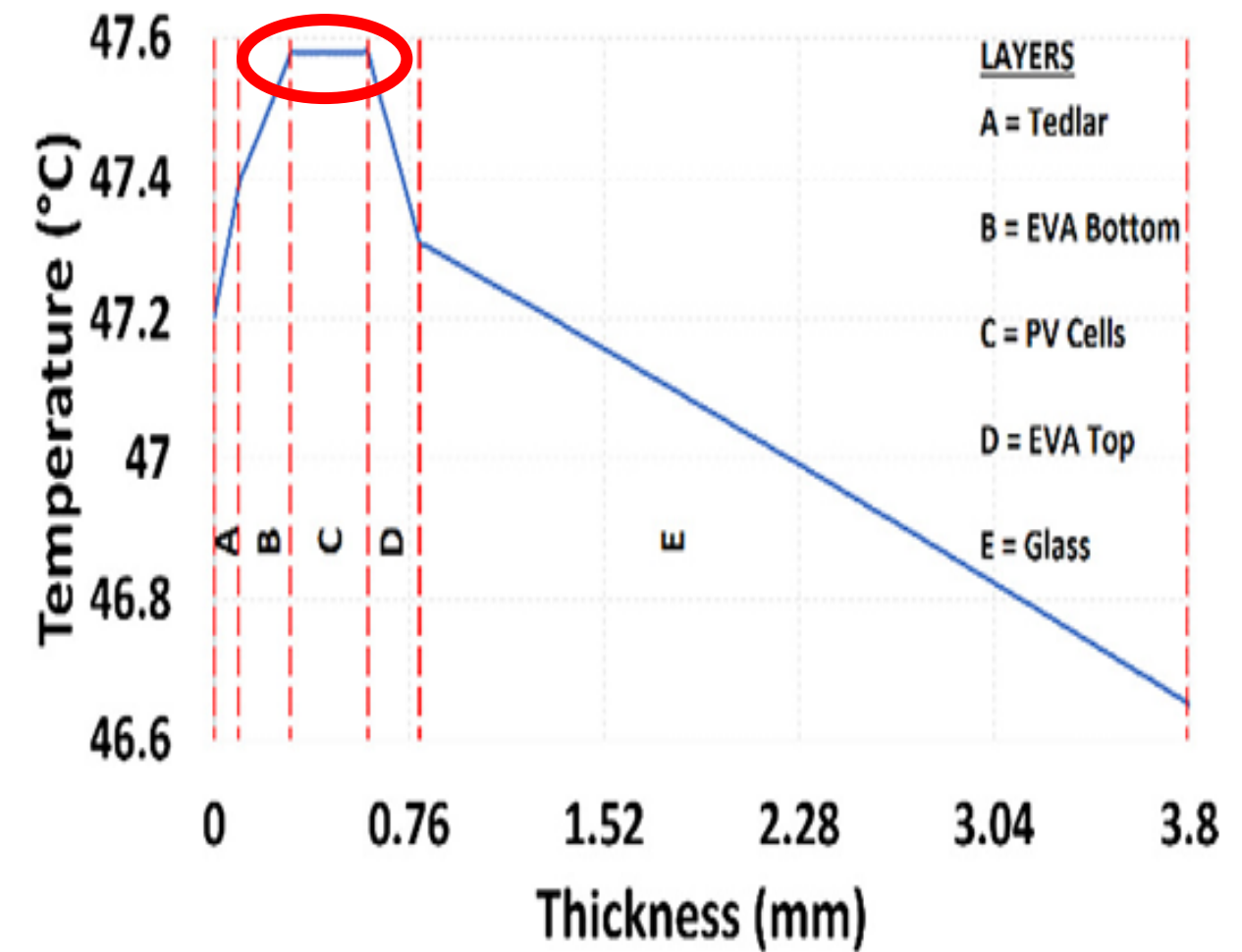
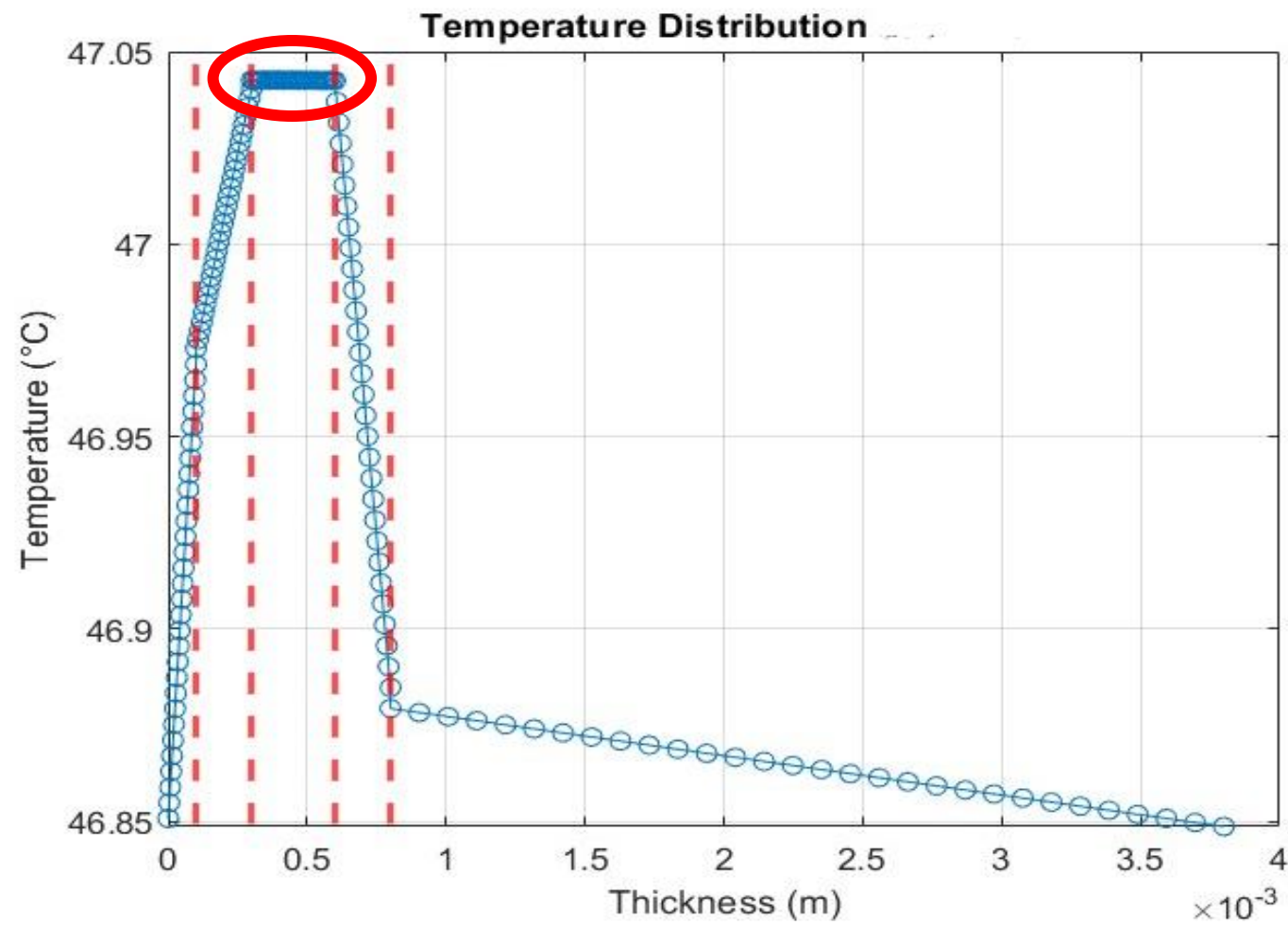
$$B(m) = \left[ \frac{1}{\Delta x} \left( \frac{2\Delta t}{\rho_{top}C_{top} + \rho_{bottom}C_{bottom}} \right) Q_{top/bottom} \frac{\Delta x}{2} \right] + T_m^P$$



# Validations et Resultats

Tcell = 47,0426 °C

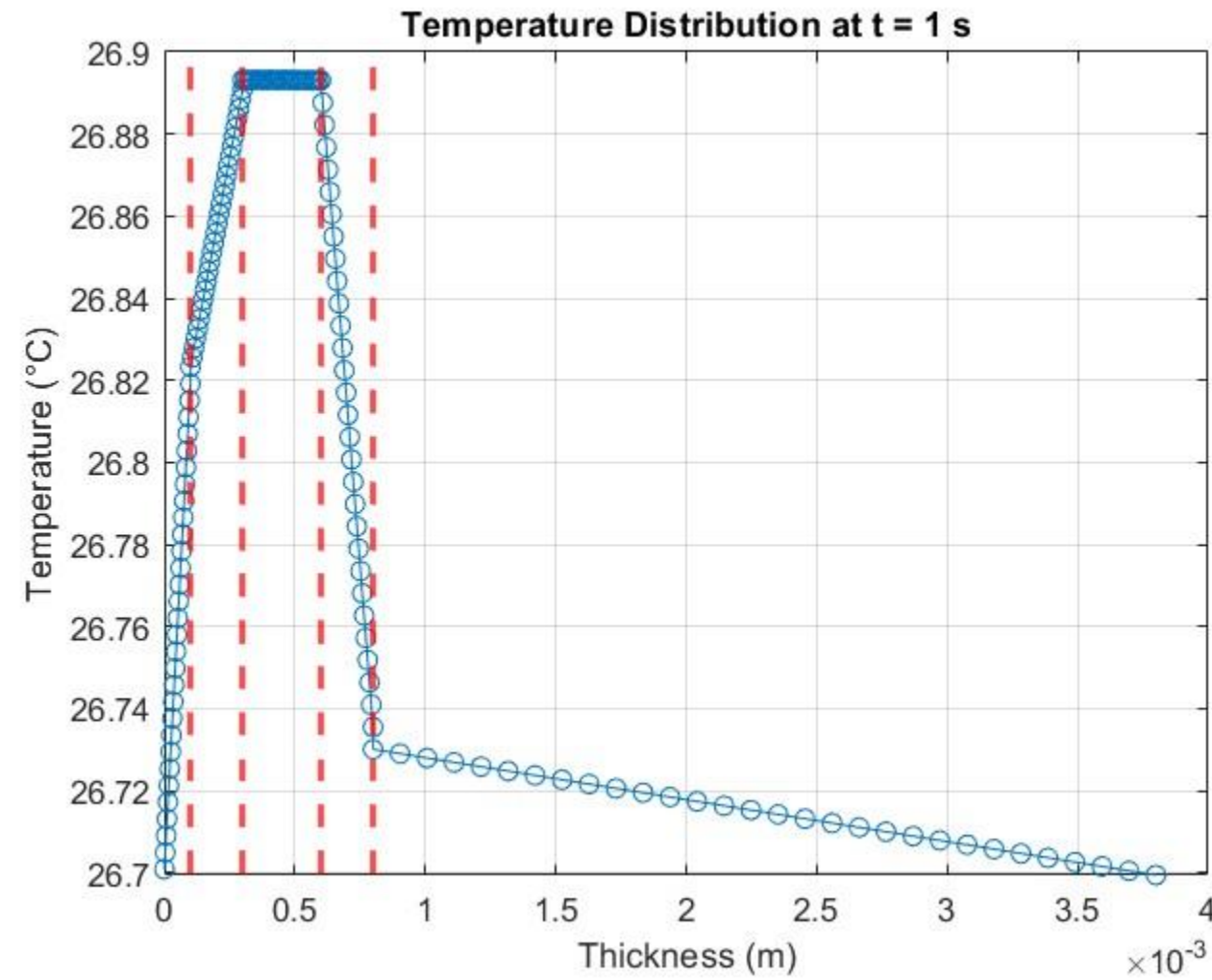
Tcell = 47,5 ± 1,5 °C



Source : Aly et al.,2018

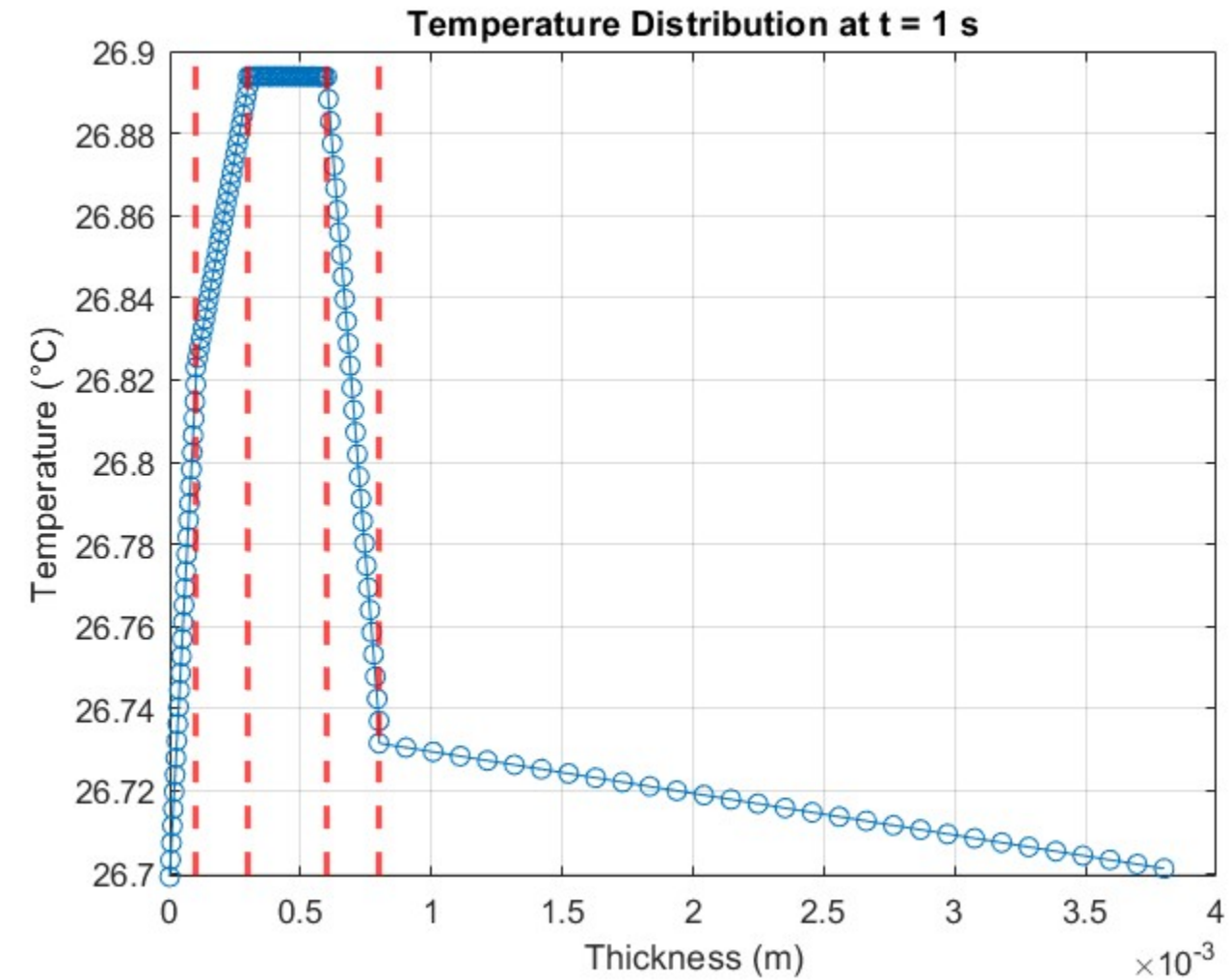
Distribution de la température sur une inclinaison 45° à Doha  
QATAR

# Validations et résultats



Distribution de la température sur une inclinaison 45° à Lyon

**Tcell = 26,8932 °C**




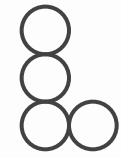
Distribution de la température sur une inclinaison 90° à Lyon

**Tcell = 26,8939 °C**



# CONCLUSIONS et perspectives

- Modèle thermique précis et robuste pour les panneaux PV
  - Applications potentielles :
    - Optimisation des BIPV
    - Prédiction des performances à long terme
    - Analyse de l'impact sur le microclimat urbain
  - Perspectives d'amélioration :
    - Couplage avec des simulations CFD
    - Prédiction de la température sur court, moyen et long terme
- 



MERCI POUR VOTRE  
attention !

