



**COLLÈGE
DE FRANCE**
—1530—

Chaire Innovation Technologique
Liliane Bettencourt 2021-2022



**Fondation
Bettencourt
Schueller**

Reconnue d'utilité publique depuis 1987

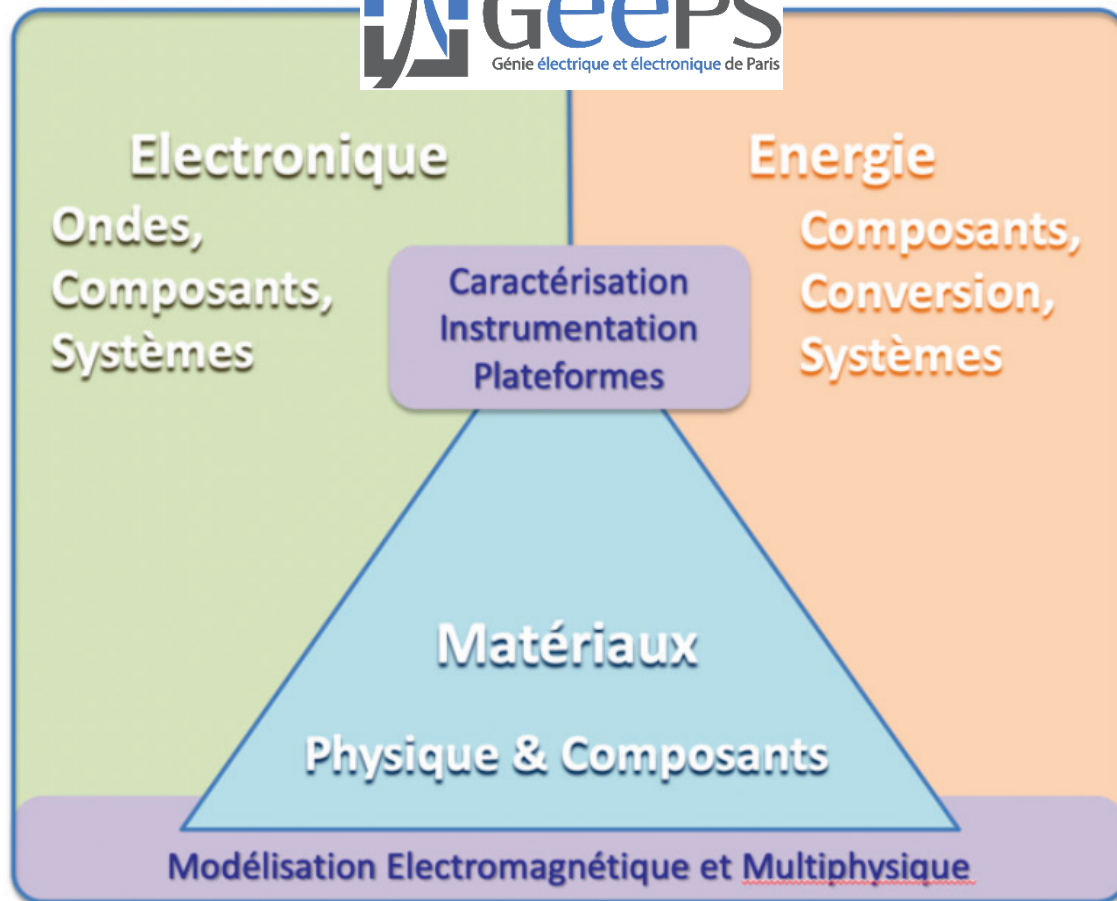
Énergie solaire photovoltaïque et Transition énergétique

**Architecture, fiabilité et
évolution des systèmes photovoltaïques**

Anne MIGAN DUBOIS

**Professeure à l'Université Paris-Saclay
Laboratoire GeePs : Génie électrique et électronique de Paris**

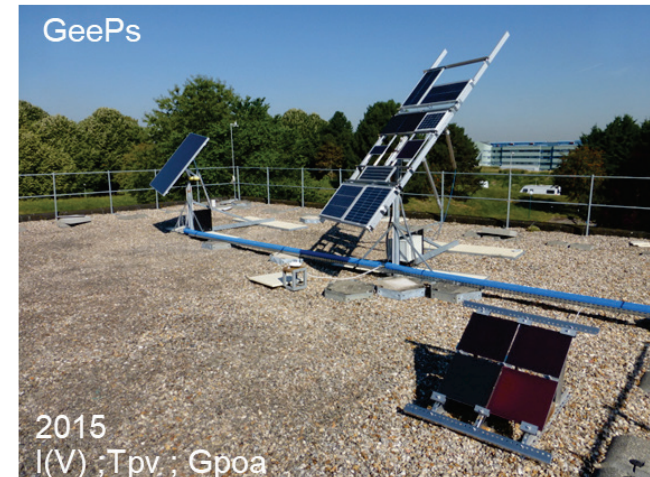
Collège de France, cours de Daniel Lincot, 9 Mars 2022



- 250 collaborateurs
- 3 pôles
- 2 centres d'expertise

Triple approche :
Théorie
Modélisation numérique
Caractérisation et validation
expérimentales

Les plateformes instrumentales



Exemples d'études : La faible concentration



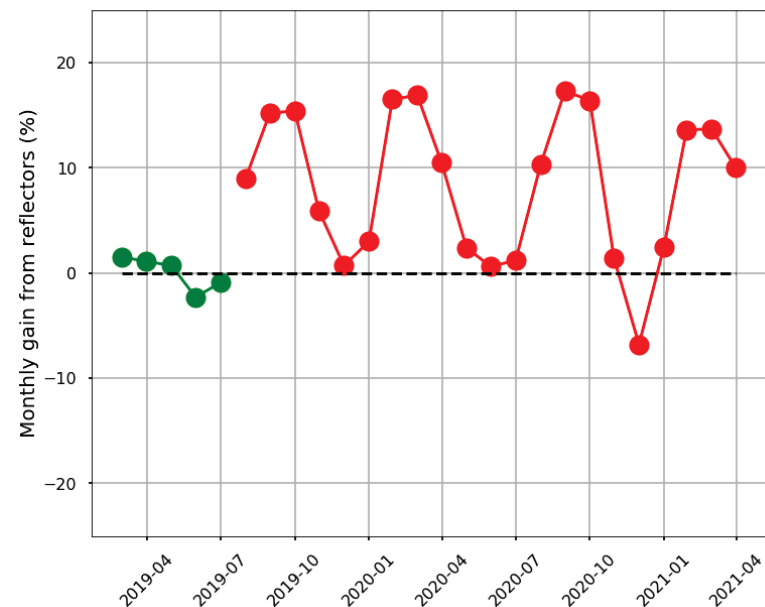
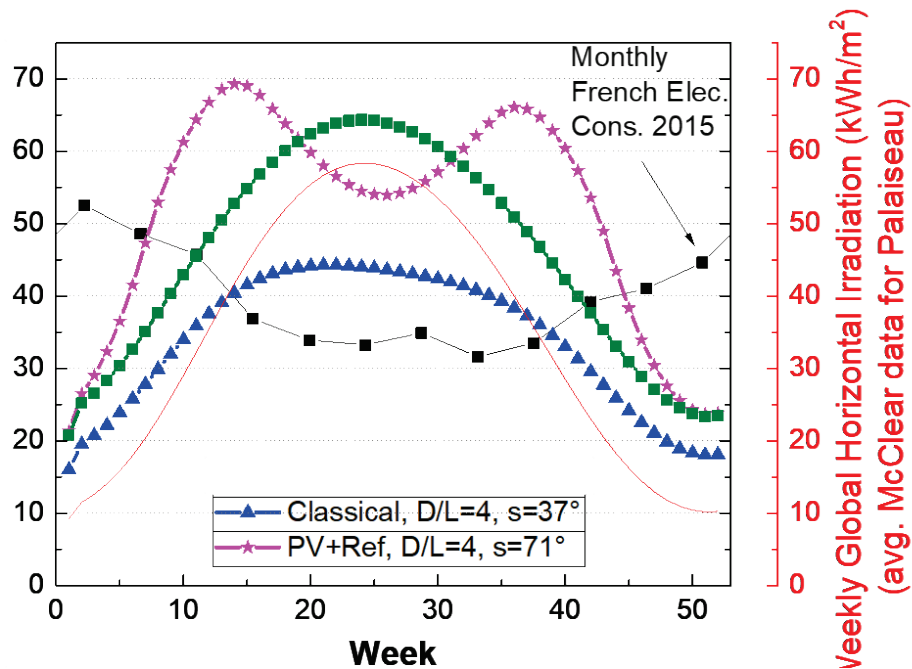
Aleph

- 2014
- PV+reflectors
- I(V) module

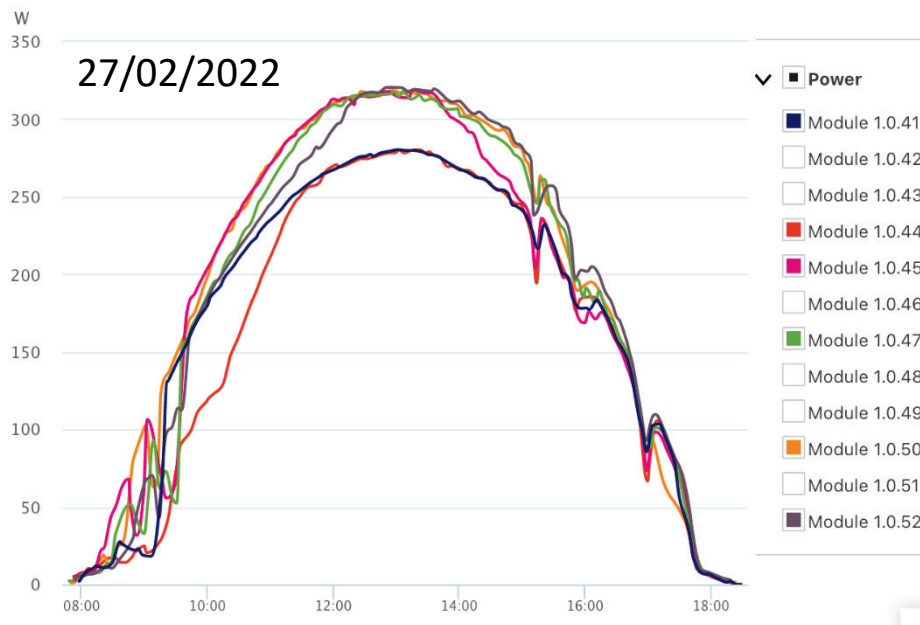
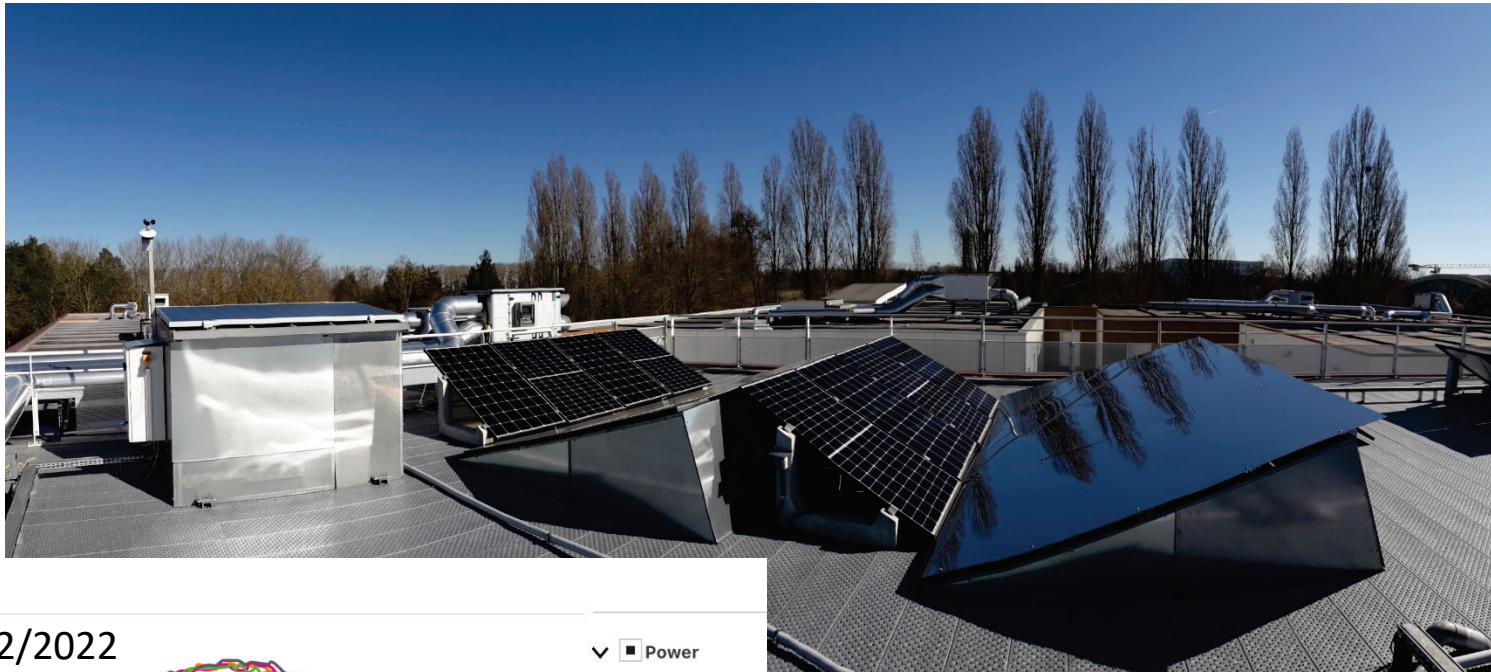


Myrialeph

- 2019
- PV+reflectors
- DC, AC



Exemples d'études : La faible concentration



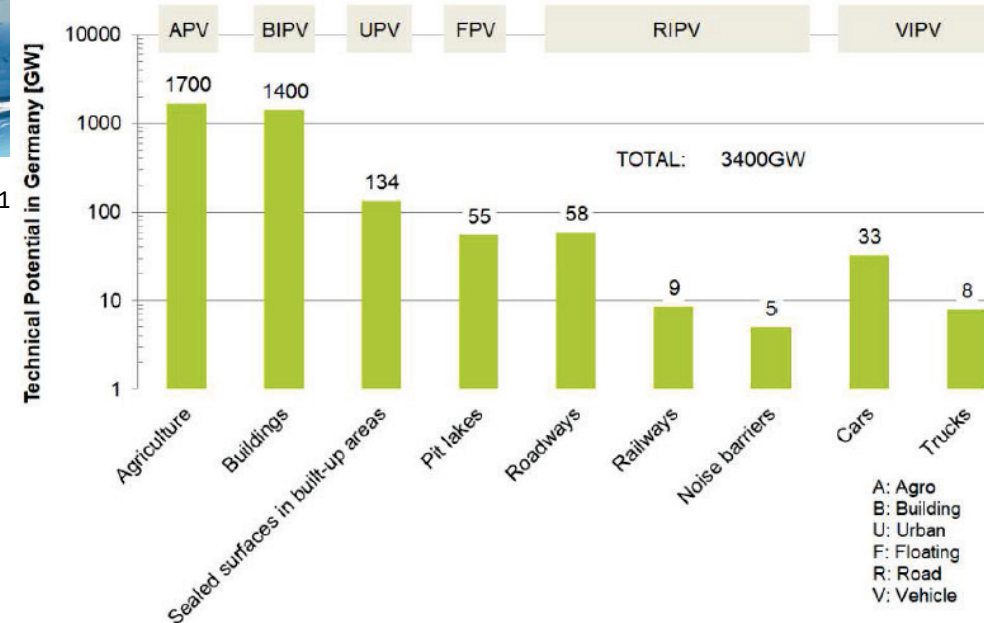


- **Quelques exemples d'intégration du photovoltaïque**
- Les interconnexions de modules
- Les éléments de base d'un système photovoltaïque
- Les défaillances et le suivi de l'état de santé des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques



https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/09/07_M.-Trommsdorff_A-PV_T1



- Protection contre la chaleur excessive
- Mise à disposition d'ombrage, de lumière et de bornes de recharge
- Connexion facile au réseau
- Visuel esthétique
- Concept global de fonctionnalité et esthétique





Objectifs :

- Prototype de système PV d'ombrière routière,
- Démonstrateur
- Mesures des performances PV
- Estimation des effets secondaires positifs potentiels.



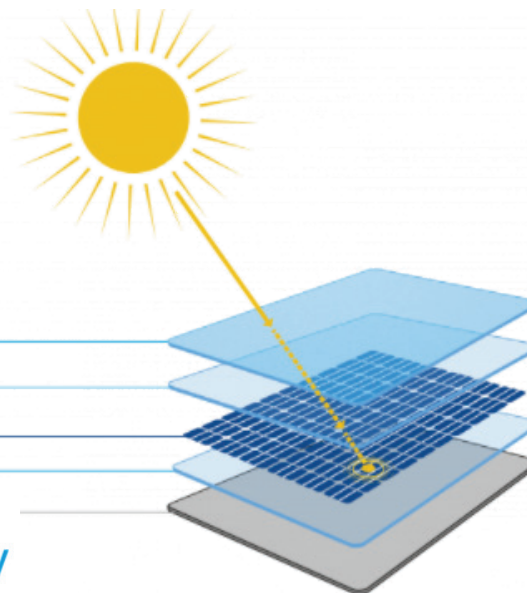
Plate-forme de train, Grasse (France)



168m² pour des bornes de recharge et la mise en lumière, Châteauneuf-le-Rouge (France)



2 bornes de recharge de vélos électriques, Châlons-en-Champagne (France)



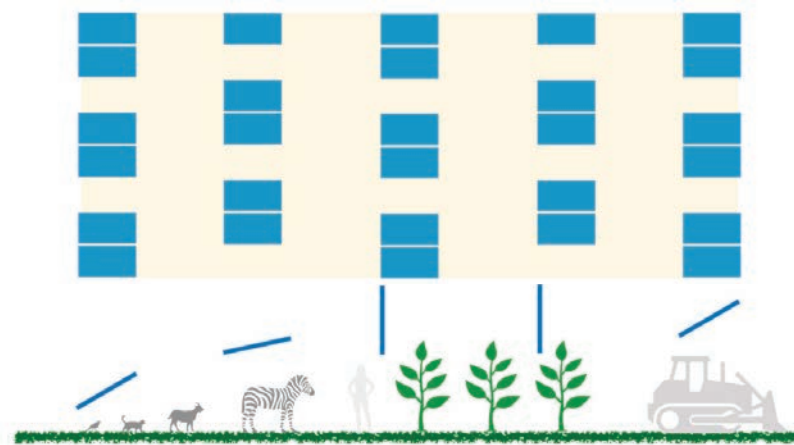
Granulat de verre
lié par une résine
transparente

Matériau résistant

Cellule solaire

Matériau résistant

wattway



Objectifs :

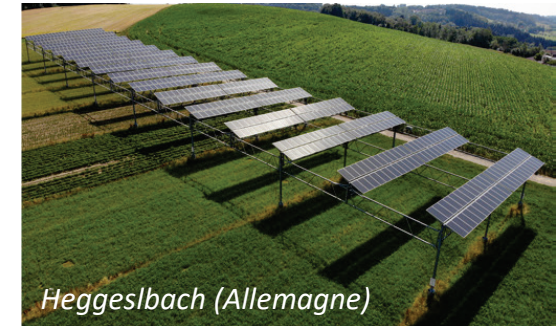
- Limiter les conflits d'utilisation des sols
- L'agriculture en premier
- Mesures des performances PV
- Augmenter les rendements agricoles en optimisant les ombrages en fonction des plantes
- Gestion de l'irrigation

Enjeux :

- Techniques
- Agronomiques
- Environnementaux
- Economiques
- Sociétaux

APV (fixe)

- 0,3 ha : 9,5m entre les rangées, 3,4 largeur des rangées et 5m de hauteur
- 193 kWc, panneaux semi transparents
- 2018 : +12% pour le céleri, +3% pour le blé d'hiver et -8% pour le trèfle



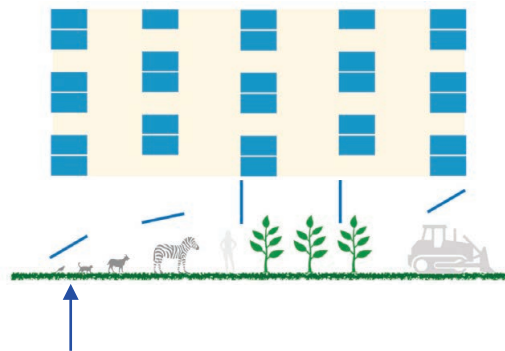
- Suffisamment de lumière et de précipitations
- Degré de couverture réduit d'un tiers
- 1^{er} système proposé en 1981

- 3,3 ha de framboises
- 2,67 MWc
- Pas de lumière directe,
- -5°C sous les panneaux comparé à une installation sous bâche
- -2°C comparé à la zone environnante
- Rendements agricoles comparables à ceux sous une bâche



<https://doi.org/10.3390/su13126871>

APV (fixe)



- Thé de java, aloé-vera, épinards
- Rendement plus élevé pour les plantes
- Température PV réduite de 0,85% (+2,8% en énergie)
- Gestion de l'eau pour le nettoyage et l'irrigation

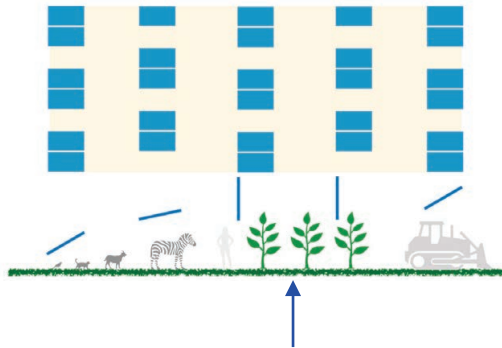
- Faible coût de structure
- Microclimat sous les modules
- Espèces tolérantes à l'ombre
- Climats arides et chauds



- 7 ha
- 5 GWh produit en moyenne par an depuis 2012
- Pastèque, curcuma, gingembre, piment

<https://doi.org/10.3390/su13126871>

APV (fixe)



- Faible coût de structure
- Peu de possibilité de gestion de l'éclairement
- Vitesse de vent réduite
- Coût des modules PV (~600 €/kWc)
- Orientation Est-Ouest



- 240 Wc : PERT et HIT
- Mis en service en 2021



- Plus grand site Européen (14 ha)
- Foin et ensilage

<https://doi.org/10.3390/su13126871>

APV (dynamique)



- 1000 m² de vignes (grenache noir) dont 600 m² sous l'APV
- 84 kWc de panneaux bifaciaux
- Intelligence artificielle programmée pour la croissance de la plante
- -5°C en période chaude
- +2°C lorsque 0°C approche
- -34% d'eau pour l'irrigation
- Meilleur équilibre aromatique du vin

1 axe :

- Suivi en élévation ou en azimut
 - Bonne gestion de l'éclairement sur les plantes
 - Protection contre le gel et la grêle
 - Coût d'acquisition et de maintenance
 - Acclimatation des plantes aux ombrages transitoires
-
- + 2,7% pour le blé
 - +11% pour les pommes de terre
 - -7,8% pour le trèfle
 - 246 MWh produit en 2018 (83%)



APV (dynamique)

- 5m de haut
- 115 kWc
- 1700 m² + surface témoin
- Installé en 2021

2 axes :

- Suivi en élévation et en azimut
- Maximisation du rendement énergétique
- Petits trackers pour éviter les grandes zones ombragées



- Maïs pour le biogaz
- Densité double : 29,5% d'ombrage
- Densité simple : 13,4% d'ombrage
- Statique : +20%
- Dynamique +23,2%



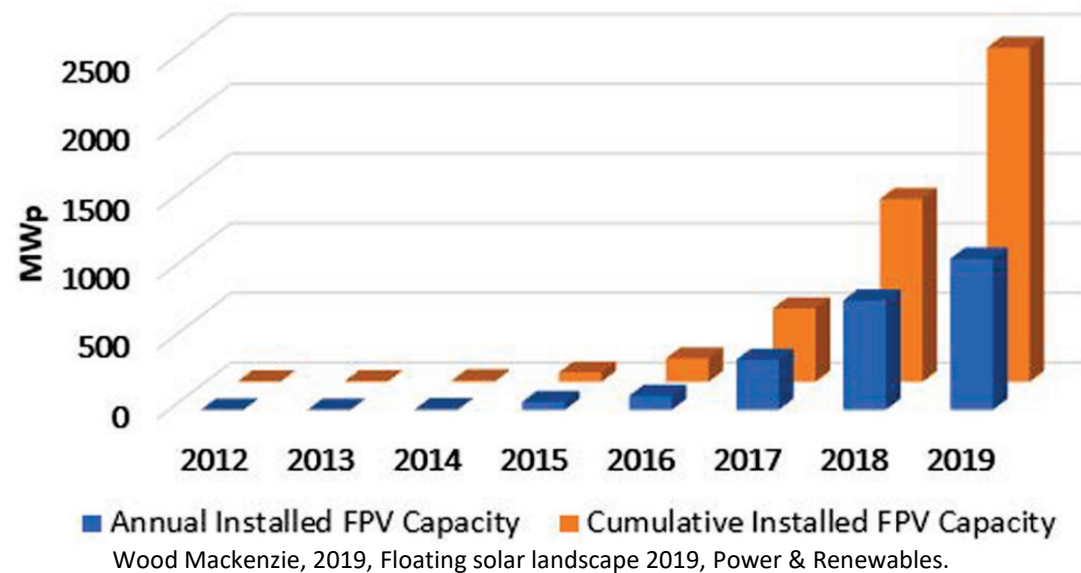
Croissance très rapide :

2 MWc installés en 2011

2,6 GWc fin 2021

- Grandes surfaces inutilisées
- Meilleure efficacité du module grâce à l'effet de refroidissement de l'eau
- Taux d'évaporation réduit
- Irradiation solaire plus faible réduit la formation d'algues et protège l'écosystème

Installed FPV Capacity





Pays Bas



Singapour

Comparaison avec une installation terrestre

- Température moyenne de fonctionnement diminuée de 3,2°C aux Pays-Bas et 4,5°C à Singapour,
- Ce qui correspond à un gain énergétique de 3% et 6% pour les Pays-Bas et Singapour respectivement

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.11.029>

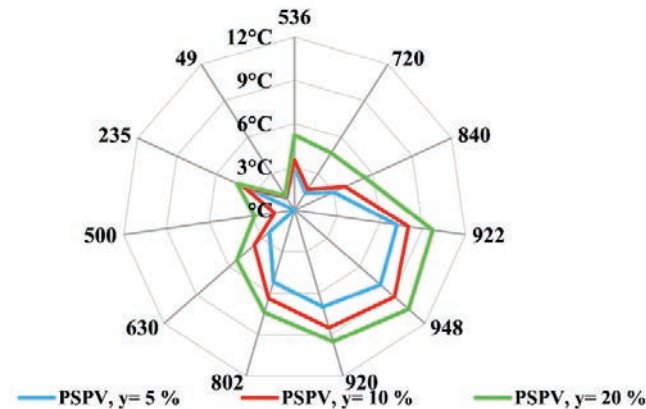


Fig. 13. The temperature difference between PSPV and LBPV modules in relation to the corresponding solar radiation, (W/m²).

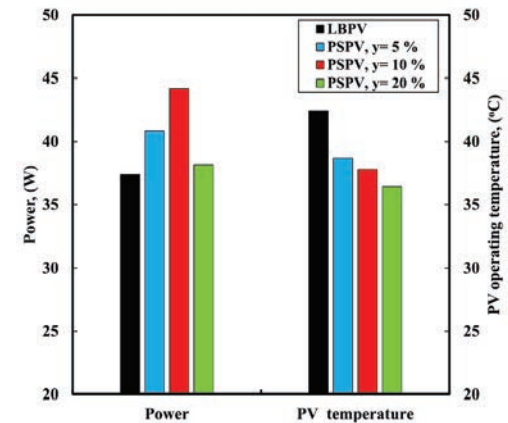
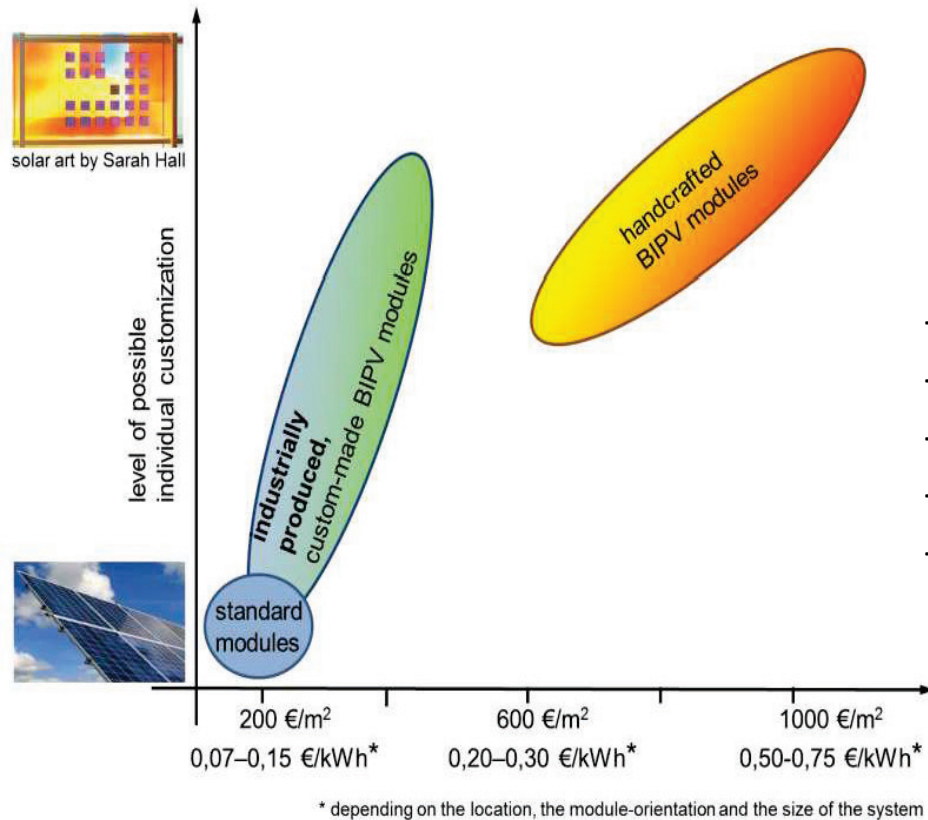


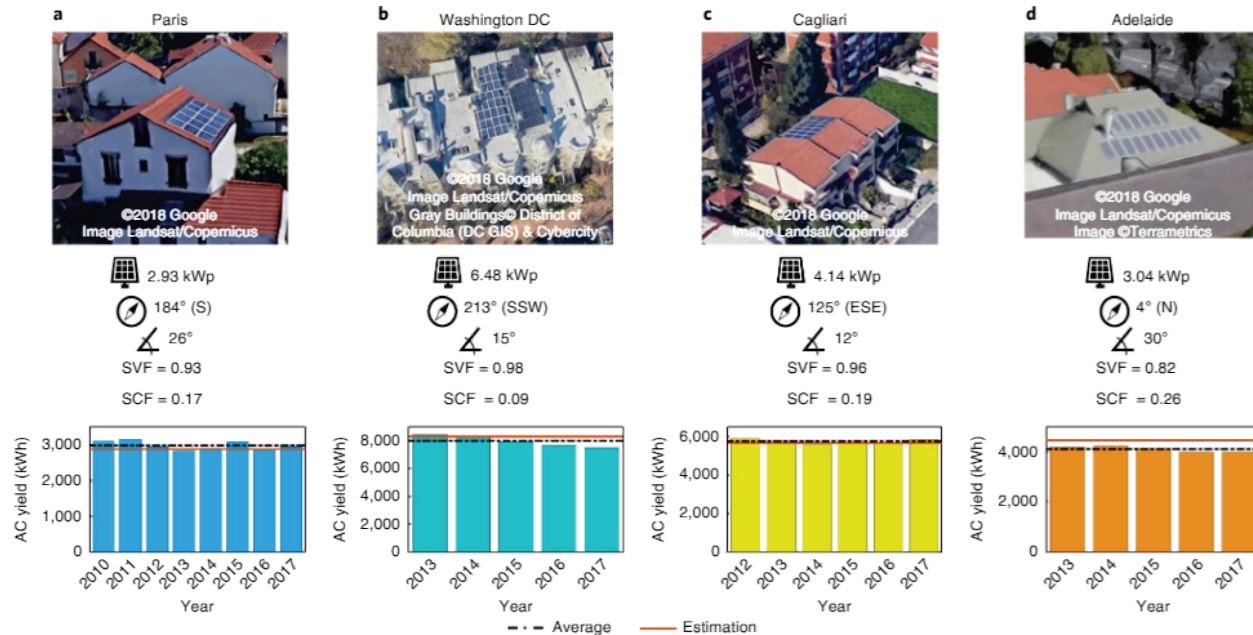
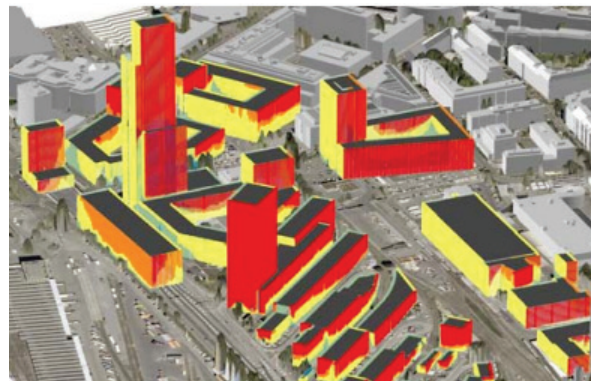
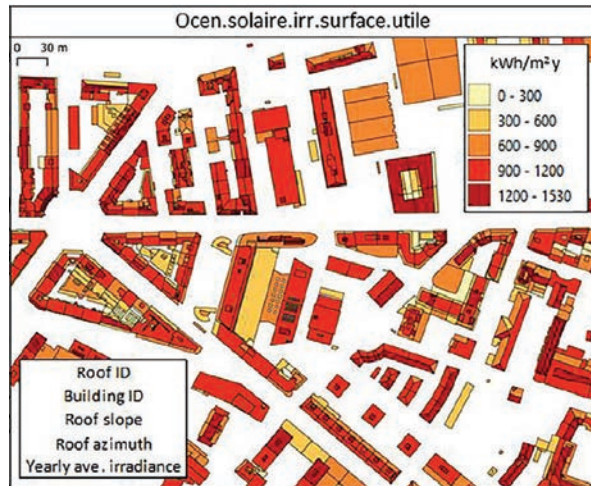
Fig. 17. Daily average electrical power and its corresponding working temperature for various submerged ratios.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123444>



- Réduction des émissions de CO₂ des bâtiments
- Energie à faible coût
- Faibles coûts d'installation supplémentaires
- Pas de standardisation, produit de construction
- Design et esthétique importants

BIPV : Cadastre solaire



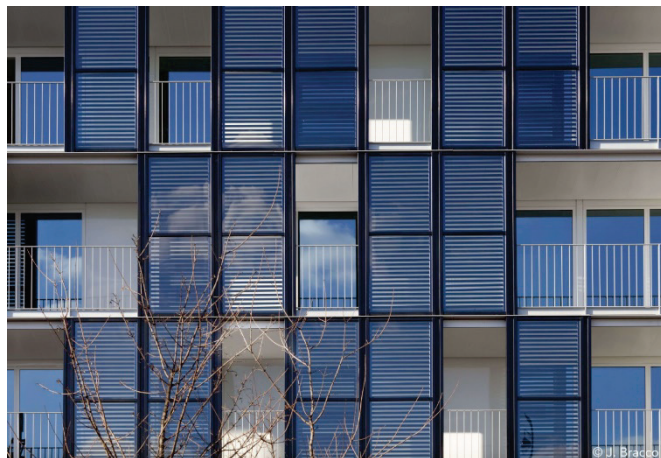
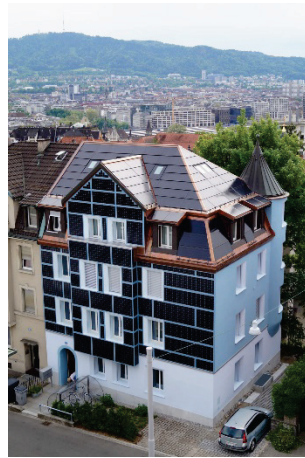
<https://doi.org/10.1038/s41560-018-0318-6>

- 10% : Erreur maximale observée par la validation
- Diminution sensible des temps de calcul de production électrique
- Applications aux cadastres solaires

- 75% des bâtiments sont partiellement ombragés
- 75% des bâtiments ombragés, le sont faiblement (moins de 30%)
- Les bâtiments les moins ombragés sont plutôt de grands bâtiments peu hauts

<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111919>

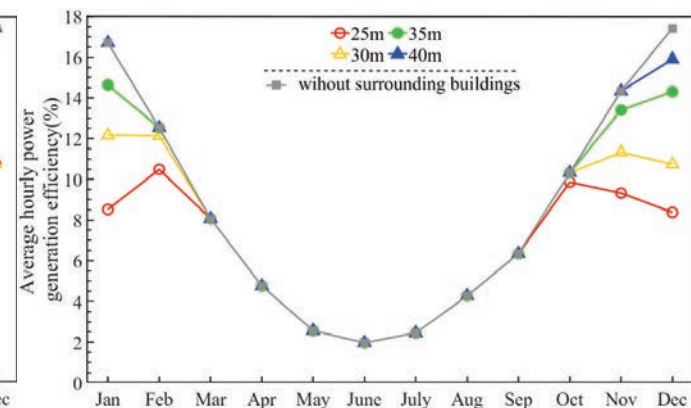
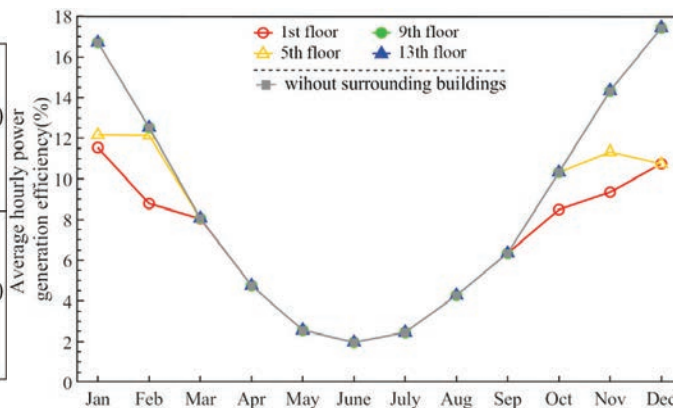
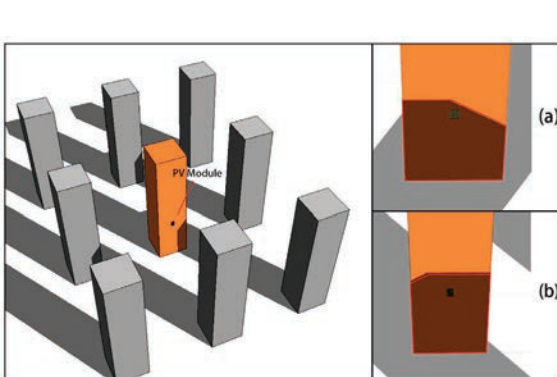
BIPV : Intégration du PV aux bâtiments



Zurich (Suisse)

Paris (France)

- Rénovation/Construction
- Non uniformité d'éclairement

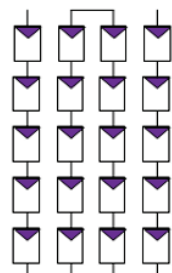


<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123160>

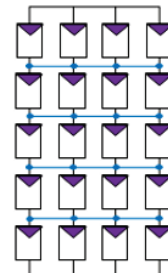
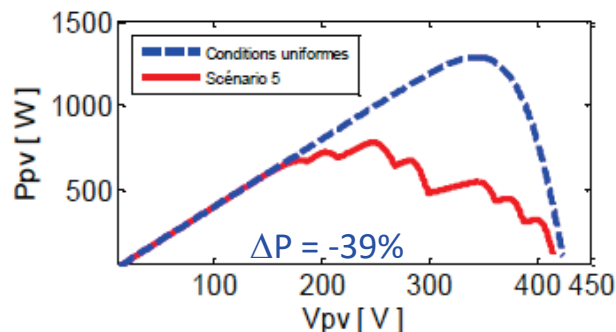


- *Quelques exemples d'intégration du photovoltaïque*
- **Les interconnexions de modules**
- Les éléments de base d'un système photovoltaïque et les défaillances et le suivi de l'état de santé des systèmes photovoltaïques

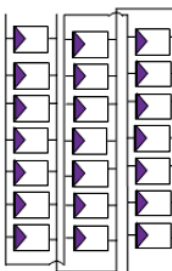
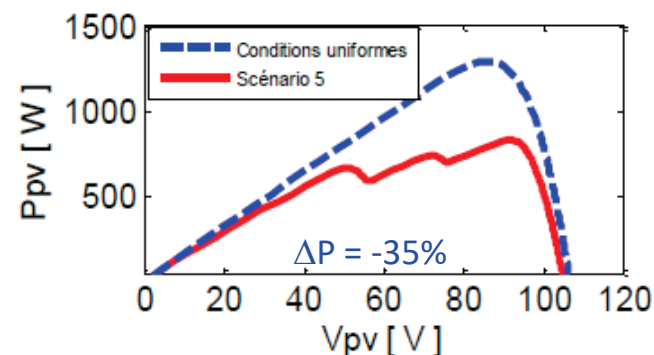
Les interconnexions de modules



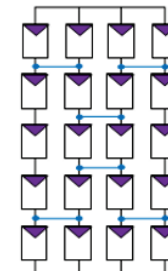
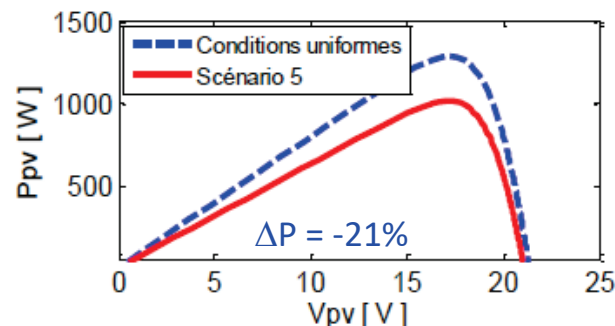
Série



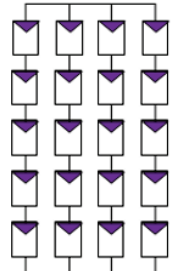
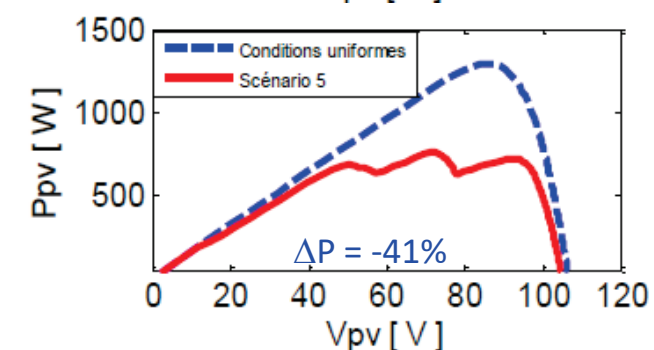
Croisé



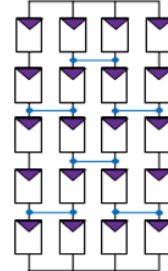
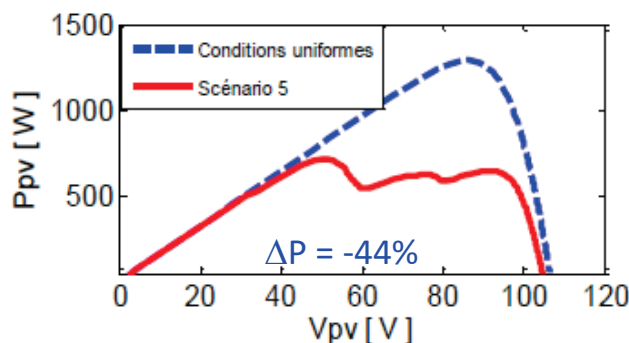
Parallèle



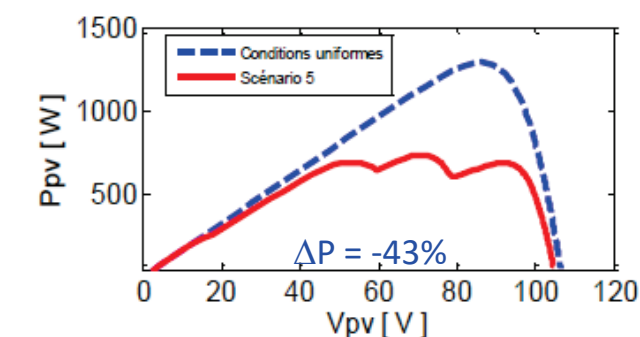
Pont



Série-Parallèle



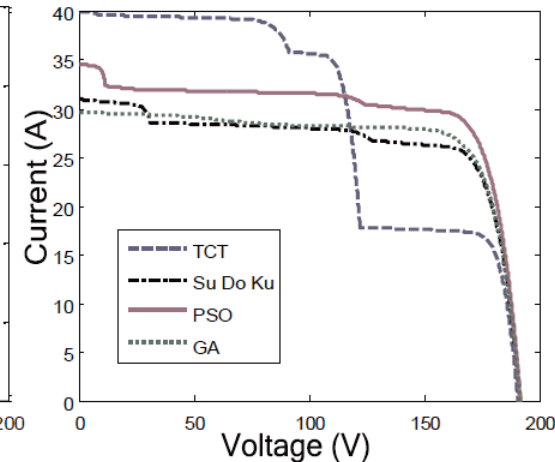
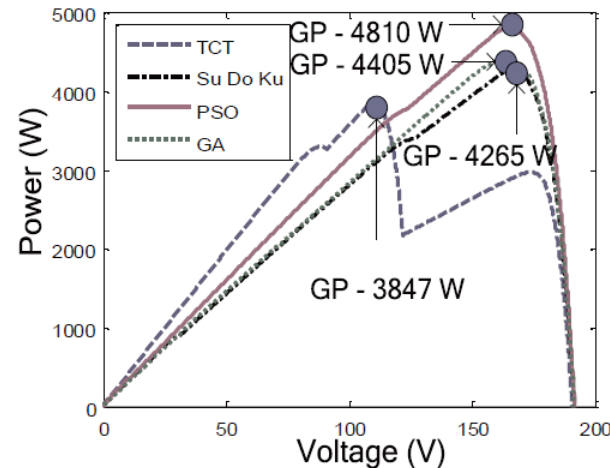
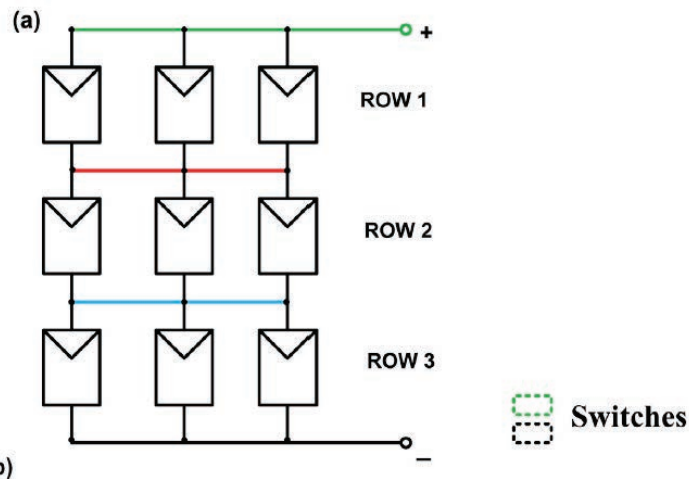
Nid d'abeille



Cas d'ombrages aléatoires, simulation

Les interconnexions de modules

➤ Les systèmes reconfigurables :



Exemple de reconfiguration dynamique

Reconfiguration statique : les panneaux sont mobiles

Nécessite une image de l'éclairément en temps réel, un algorithme d'optimisation et un contrôleur

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.057>

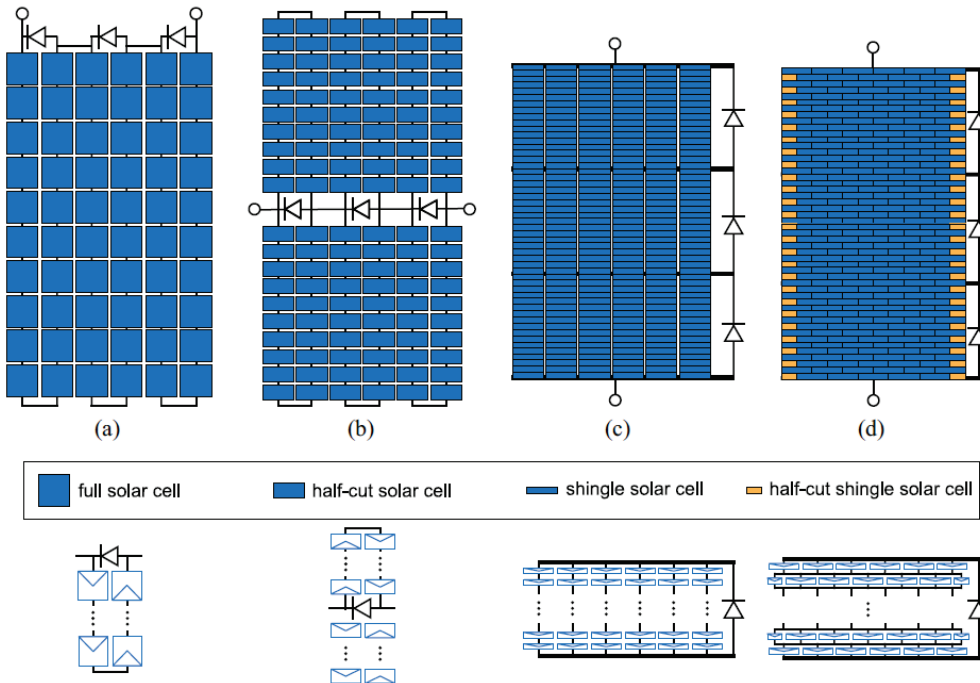


- *Quelques exemples d'intégration du photovoltaïque*
- *Les interconnexions de modules*
- **Les éléments de base d'un système photovoltaïque**
- Les défaillances et le suivi de l'état de santé des systèmes photovoltaïques

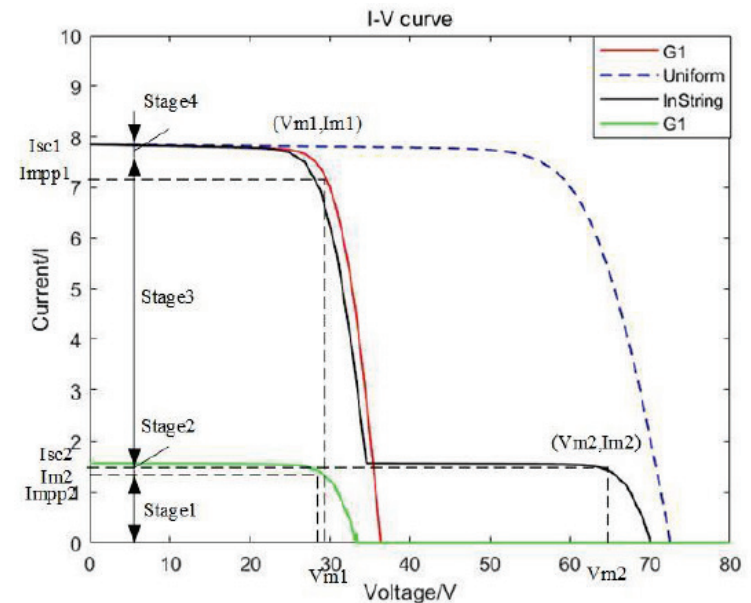
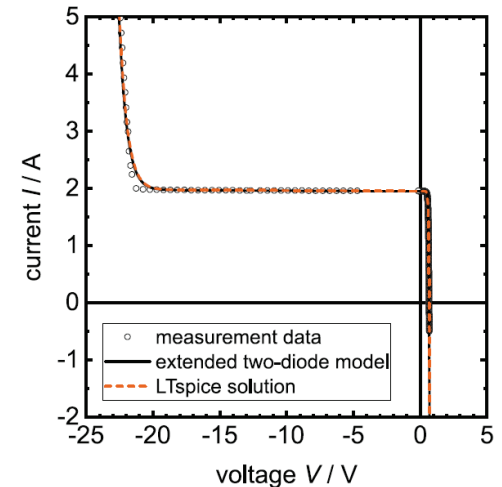
Les éléments d'un système

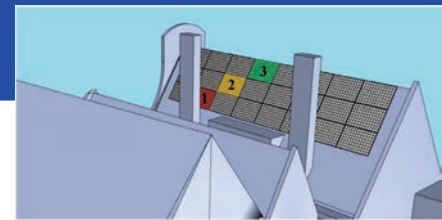
➤ La diode de bypass :

<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2022.3144635>

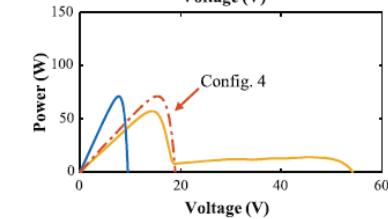
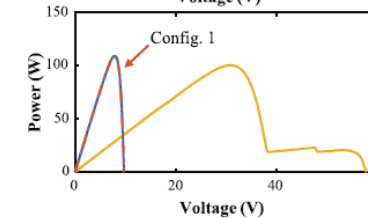
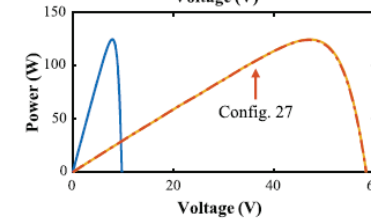
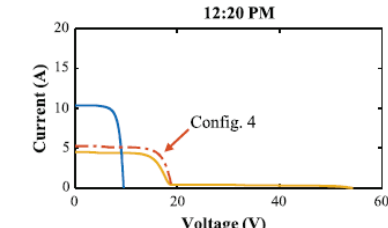
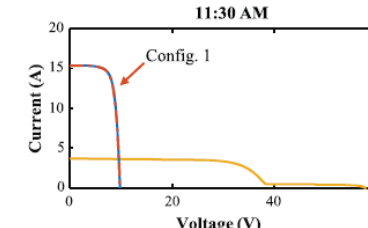
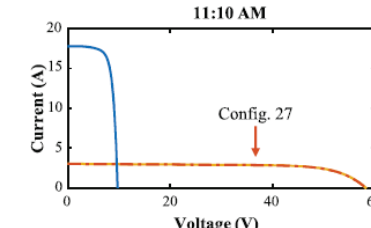
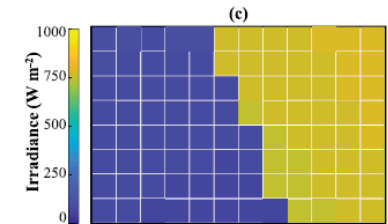
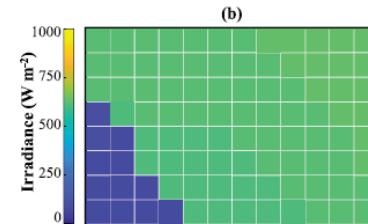
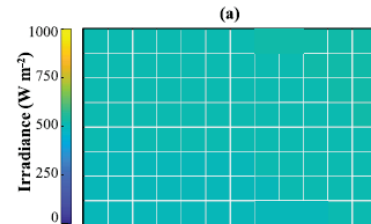
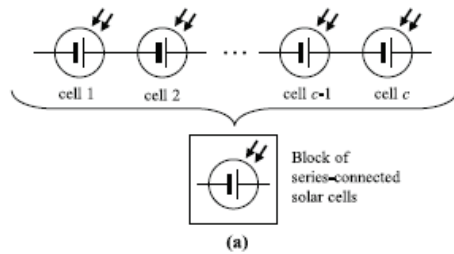


**A venir : 1 diode bypass par cellule,
directement sur le wafer de silicium**





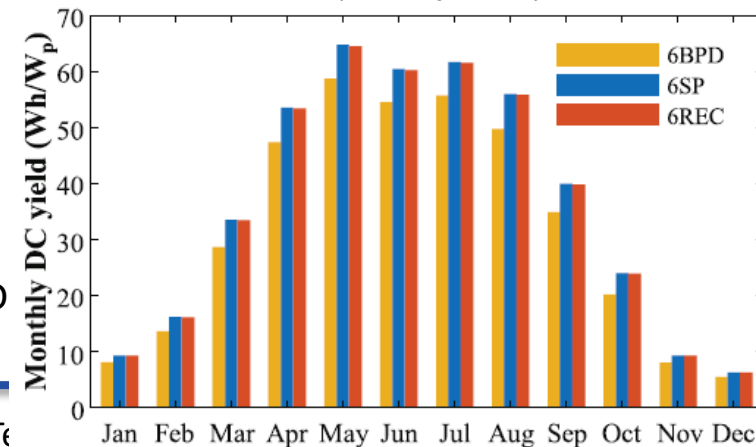
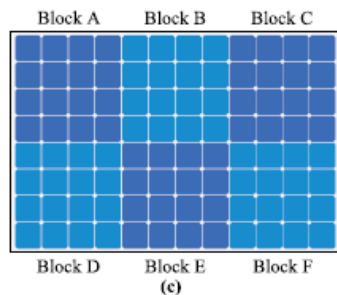
➤ La diode de bypass : Les modules intelligents



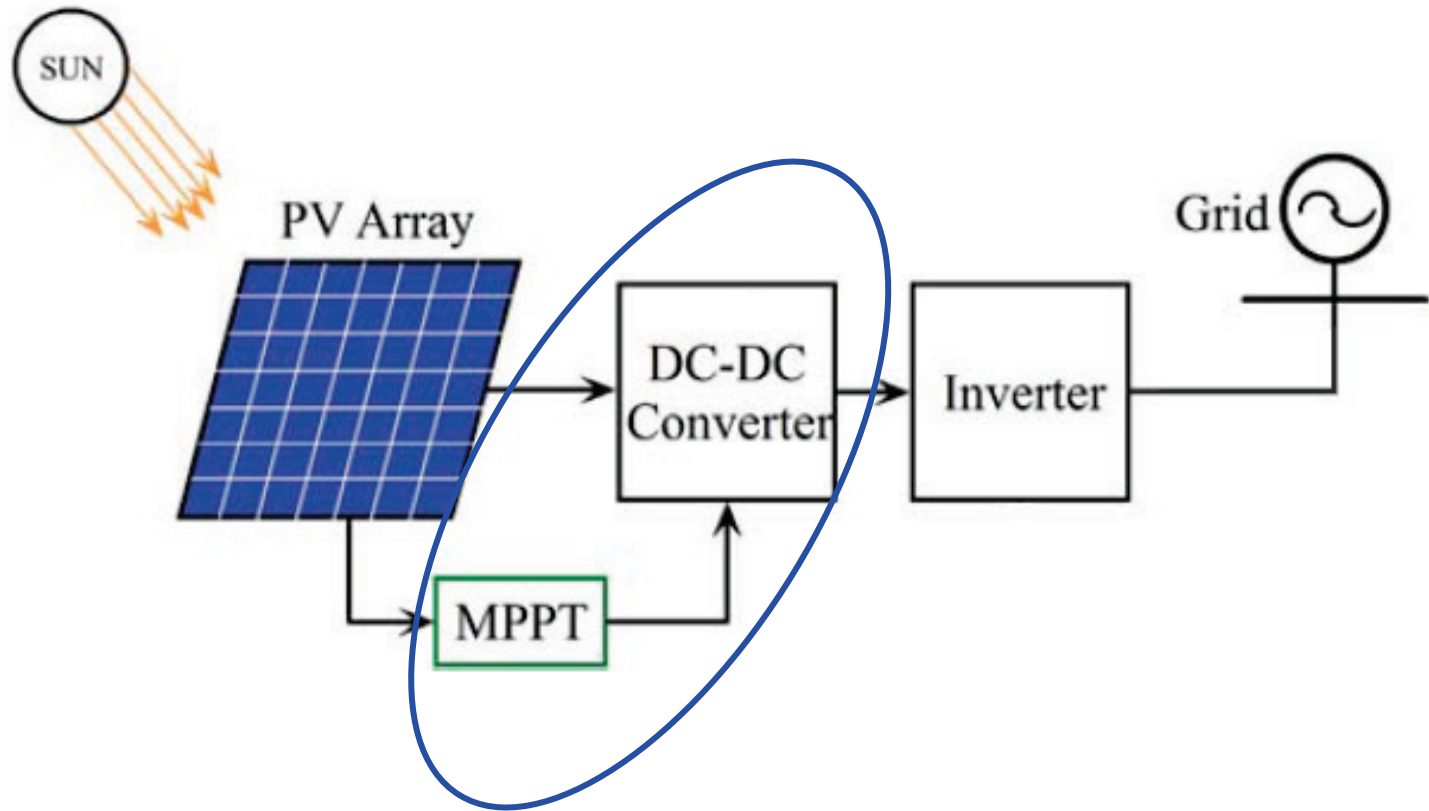
— 6BPD — 6SP — 6REC

<https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.010>

- 96 cellules disposées en 6 blocs
- 27 configurations électriques SP
- Ombrage pendant 32% du temps
→ +12,7% d'énergie qu'avec 6 BPD

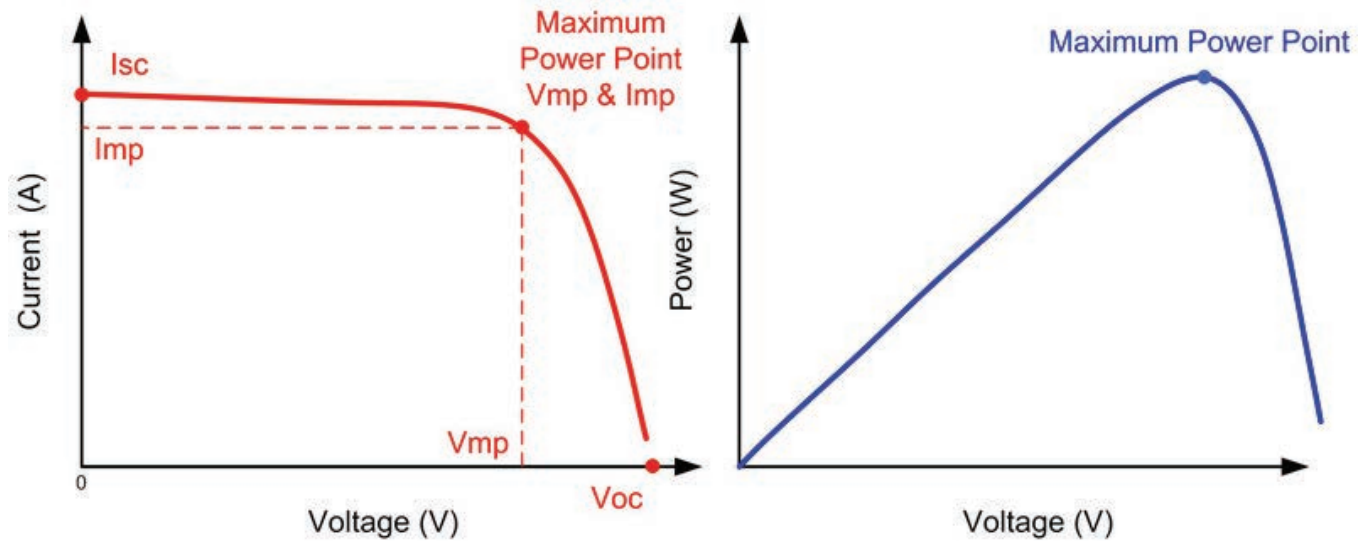


Les éléments d'un système



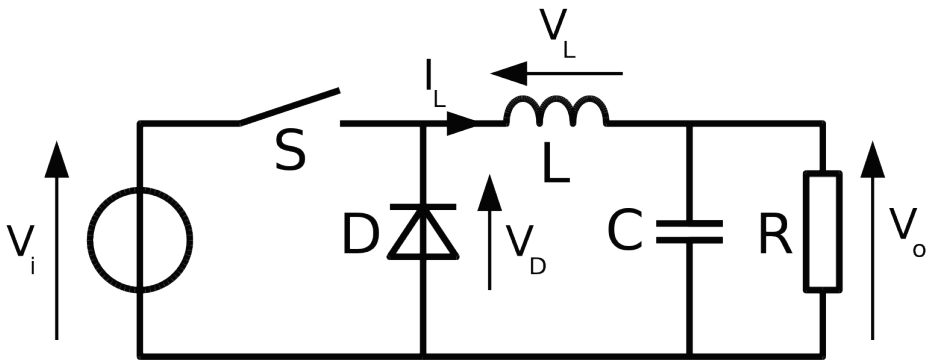
Les éléments d'un système

- Le Suivi du point de puissance maximale :

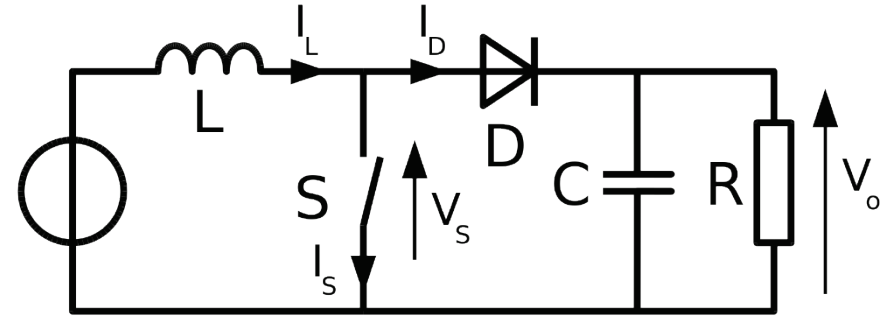


Les éléments d'un système

- Le Suivi du point de puissance maximale :

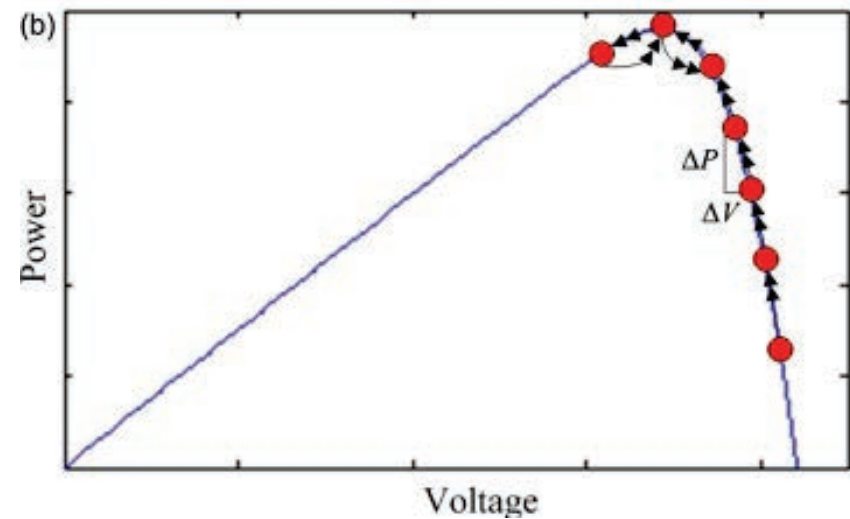
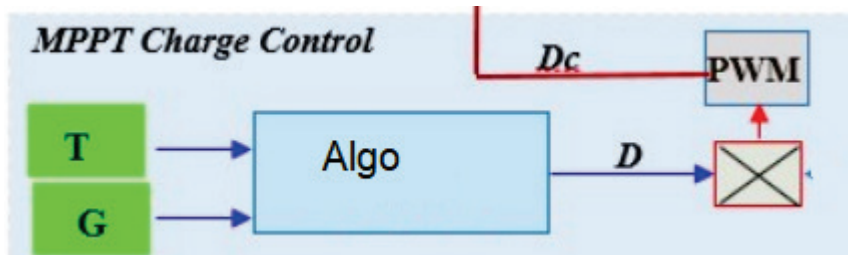


Montage abaisseur de tension

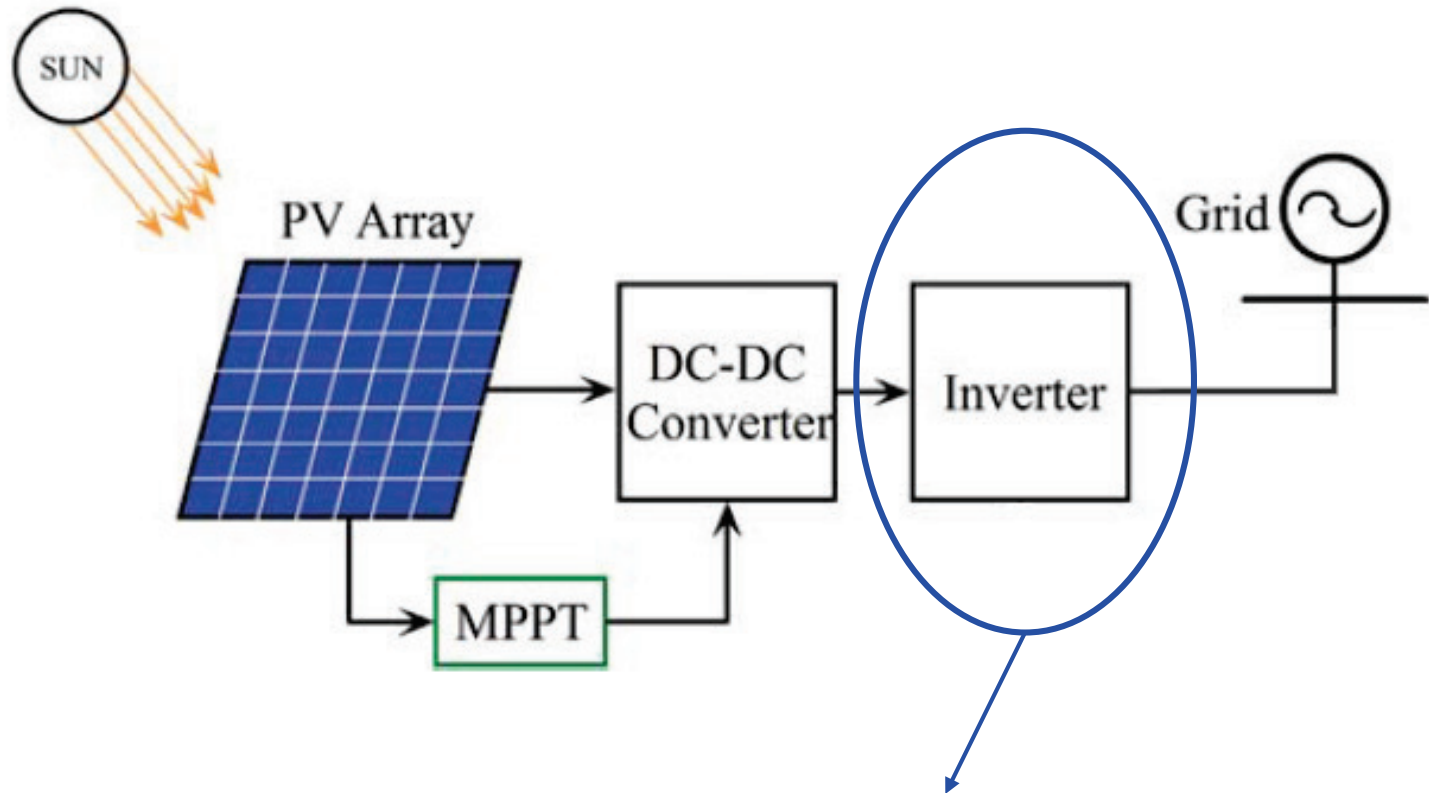


Montage élévateur de tension

Perturb & Observ



Les éléments d'un système



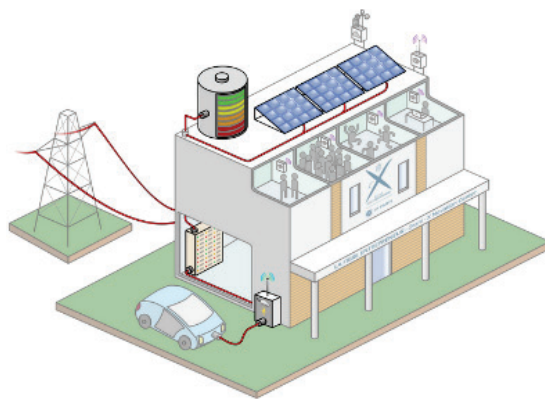
- String : pour une chaine de panneaux
- Multistring : pour plusieurs chaines de panneaux
- Mini : pour un panneau

Les éléments d'un système

➤ Le stockage :



Dashboard du bâtiment Drahi-X



Mesure

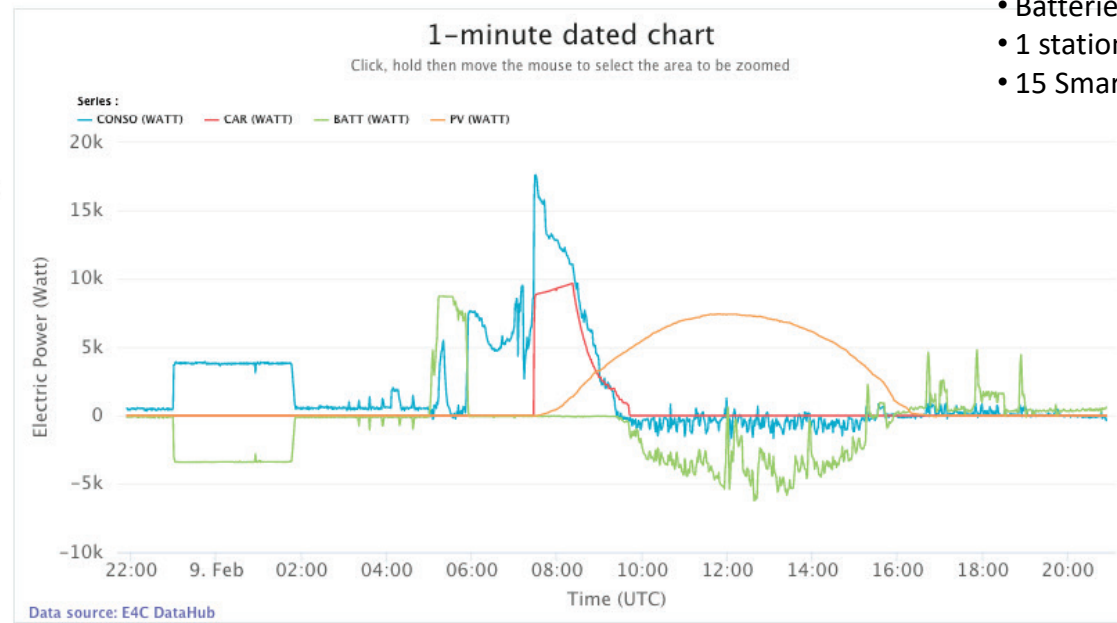
Production de la ferme photovoltaïque (PV),
Consommation électrique de la zone d'étude (CONSO),
Batterie (BATT), Borne de recharge de véhicule électrique (CAR)

Temps réel

AFFICHER



- PV : 16.7 kWc
- Batteries : 30 kWh
- 1 station VH
- 15 Smartmeters

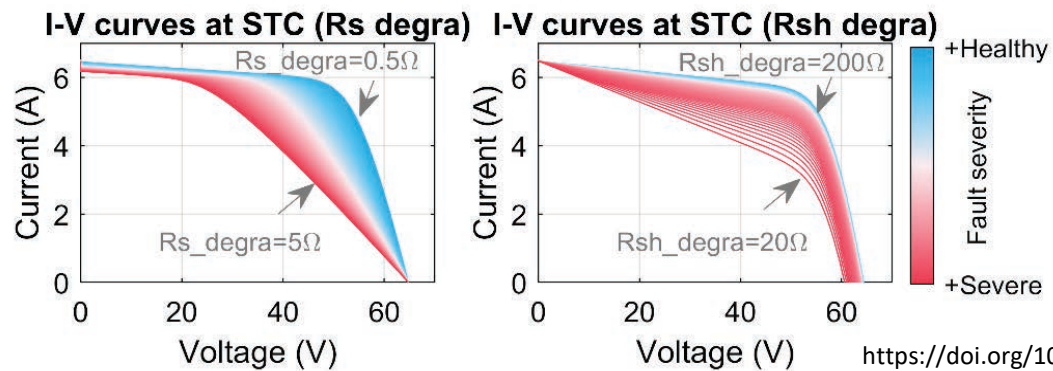
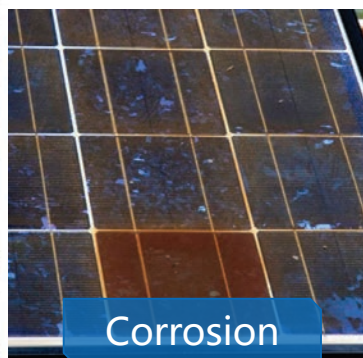
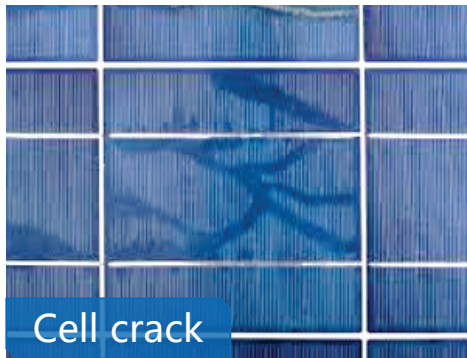




- *Quelques exemples d'intégration du photovoltaïque*
- *Les interconnexions entre modules*
- *Les éléments de base d'un système photovoltaïque*
- **Les défaillances et le suivi de l'état de santé des systèmes photovoltaïques**

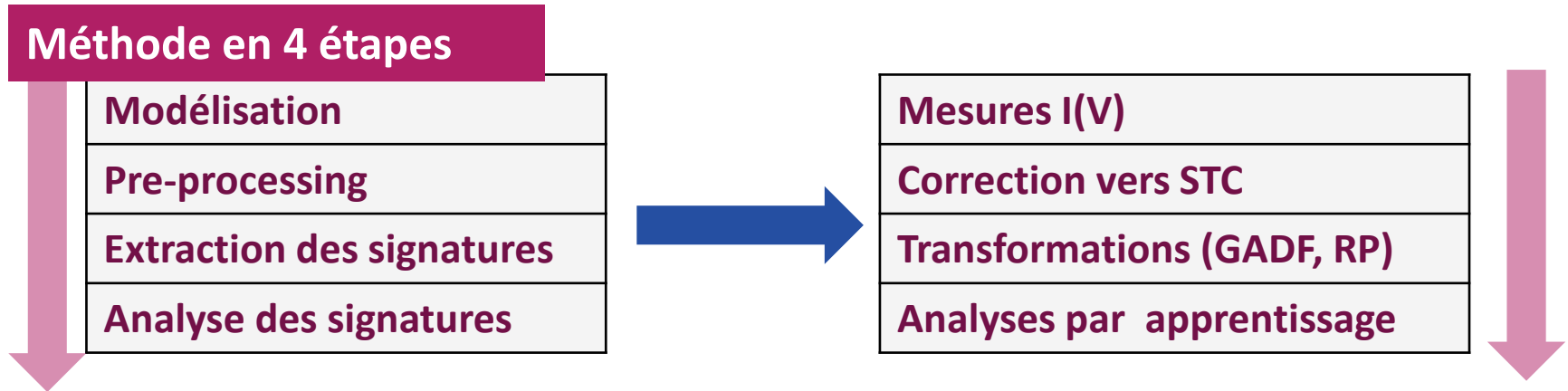
Les défaillances

Review of failures of photovoltaic modules, IEA-PVPS, 2014



<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114785>

- Une méthode de diagnostic :

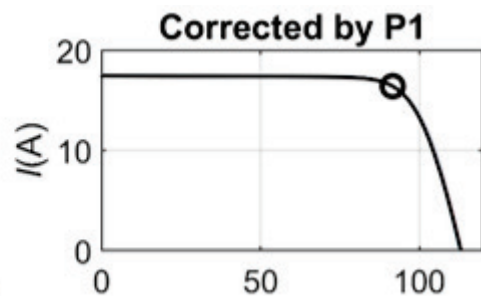
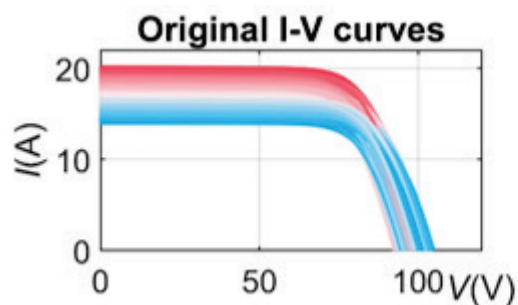
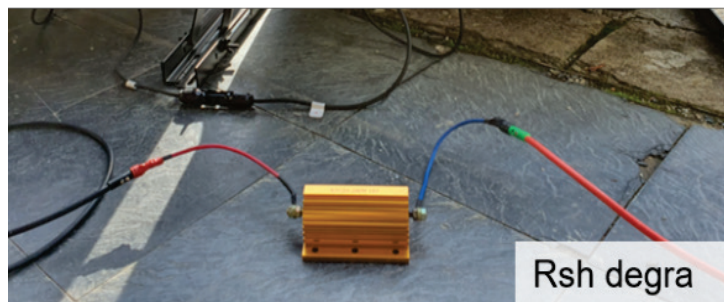


J. Harmouche, et al, IEEE Trans. on Relia., vol. 65, no. 3, 2016.

B. Li, Thèse de doctorat, 2021

Le suivi de l'état de santé

- Une méthode de diagnostic :



Mesures I(V)

Correction vers STC

Transformations (GADF, RP)

Analyses par apprentissage

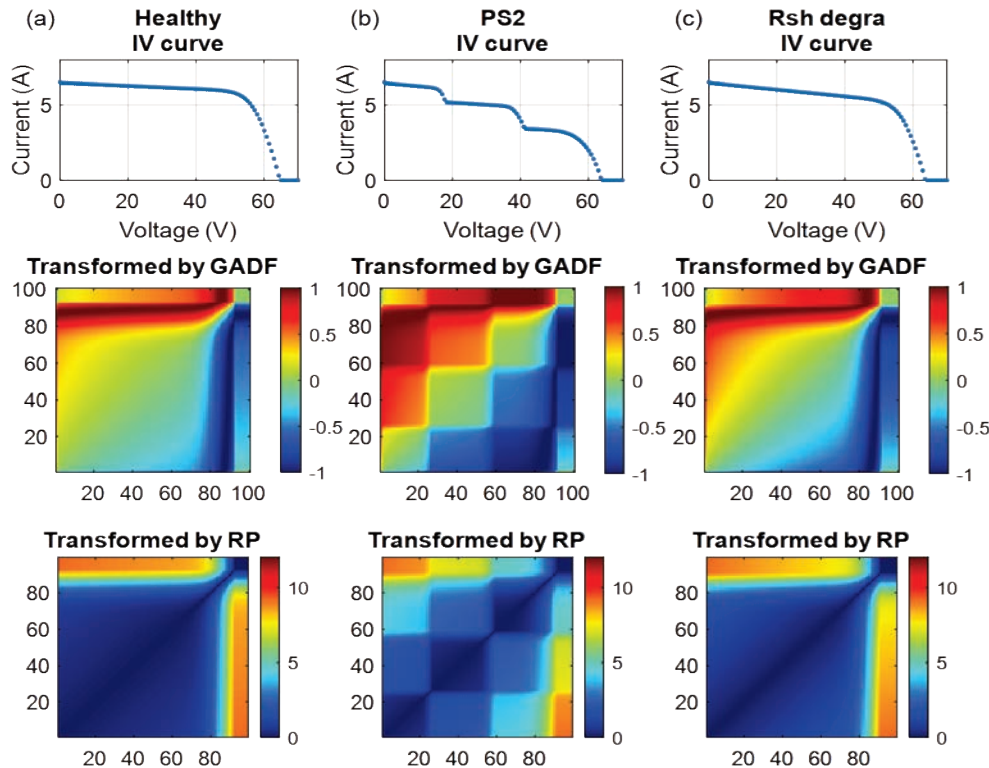
Mesures I(V)

Correction vers STC

Transformations (GADF, RP)

Analyses par apprentissage

➤ Une méthode de diagnostic :



Mesures $I(V)$

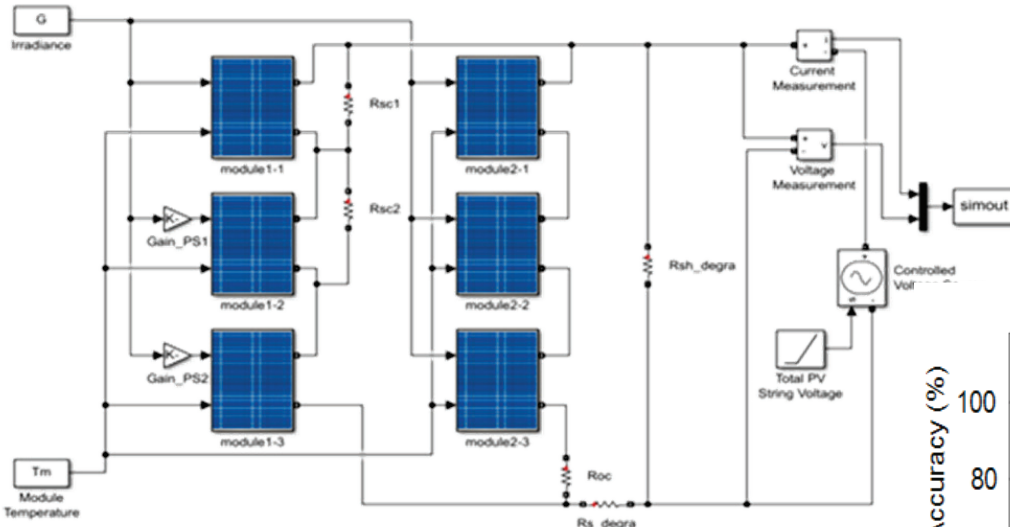
Correction vers STC

Transformations (GADF, RP)

Analyses par apprentissage

Le suivi de l'état de santé

➤ Une méthode de diagnostic :

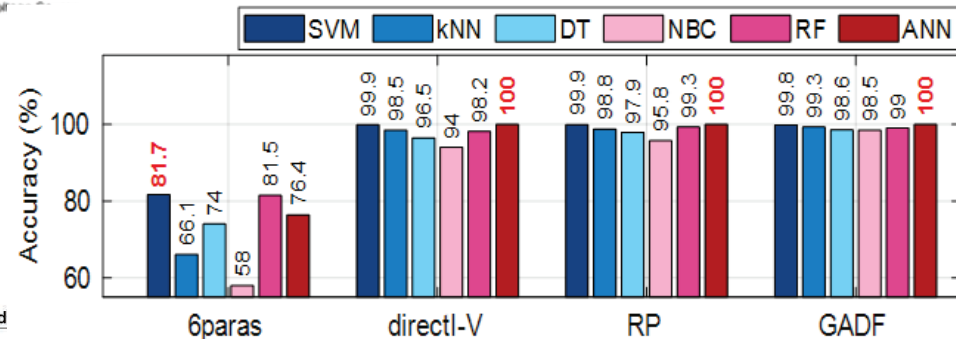


Mesures I(V)

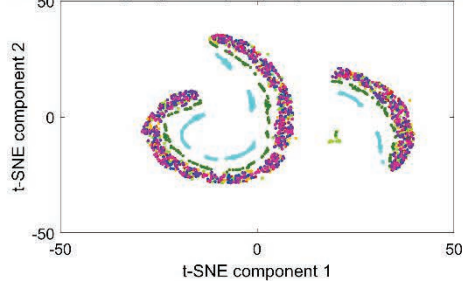
Correction vers STC

Transformations (GADF, RP)

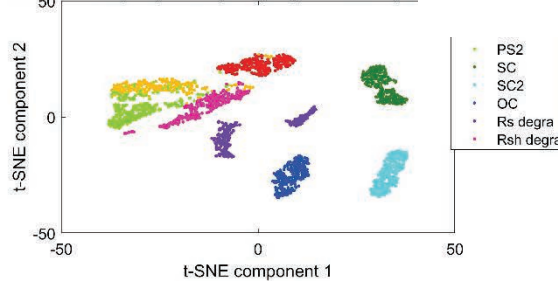
Analyses par apprentissage



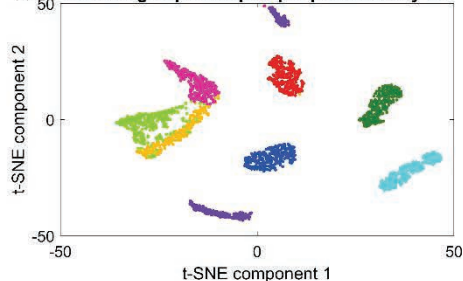
(a) t-SNE of group 0 samples pre-processed by 6paras



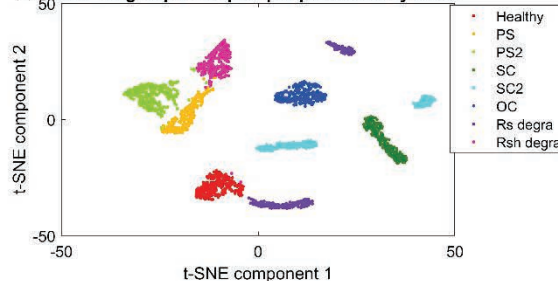
(b) t-SNE of group 0 samples pre-processed by d



(c) t-SNE of group 0 samples pre-processed by RP



(d) t-SNE of group 0 samples pre-processed by GADF



6paras (accu:81.71%)

	Healthy	PS	PS2	SC	SC2	OC	Rsh degra	Rsh degra
Healthy	261	19	18				2	
PS	9	158	75				1	21
PS2		87	118				27	68
SC				297		3		
SC2					300			
OC						298	2	
Rsh degra	1	17	3				267	12
Rsh degra	1	7	28				2	262

87.0%	13.0%
52.7%	47.3%
39.3%	60.7%
99.0%	1.0%
100.0%	
99.3%	0.7%
89.0%	11.0%
87.3%	12.7%

	Healthy	PS	PS2	SC	SC2	OC	Rsh degra	Rsh degra
Healthy	96.0%	54.9%	48.8%	100.0%	100.0%	98.7%	83.2%	89.3%
PS	4.0%	45.1%	51.2%			1.3%	16.8%	30.7%

Conclusion

- Les modes d'intégration du photovoltaïque sont multiples
- Les systèmes photovoltaïques sont complexes
- Adaptable à toutes les situations
- Suivi de l'état de la production

Les systèmes Plug&Play

Les installations solaires en kit



Les modules AC

Des modules à brancher directement sur la charge





COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Merci !



Fondation
Bettencourt
Schueller

Reconnue d'utilité publique depuis 1987

