

Solaire PV : Agilité technologique face à la transition énergétique

Daniel Mugnier, Président AIE PVPS et Directeur délégué Solaire PLANAIR France

33^{ème} Congrès SFT2025, Chambéry

www.iea-pvps.org

Introduction



1992 : 1^{ère} installation PV raccordée au réseau de France (Lhuis - 01)



- 0,9 kWc (15 modules de marque Kyocera)
- 1,38 kVA (1 onduleur de marque SMA)
- Environ 15-20€/Wc



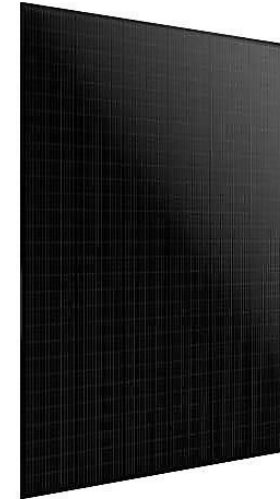
2025... après une révolution

Un panneau photovoltaïque de 450 Wc...

.... coûte environ 35 à 50€

... et un kit de l'ordre de 3 kWc coût fourni posé 2€/Wc

PVPS



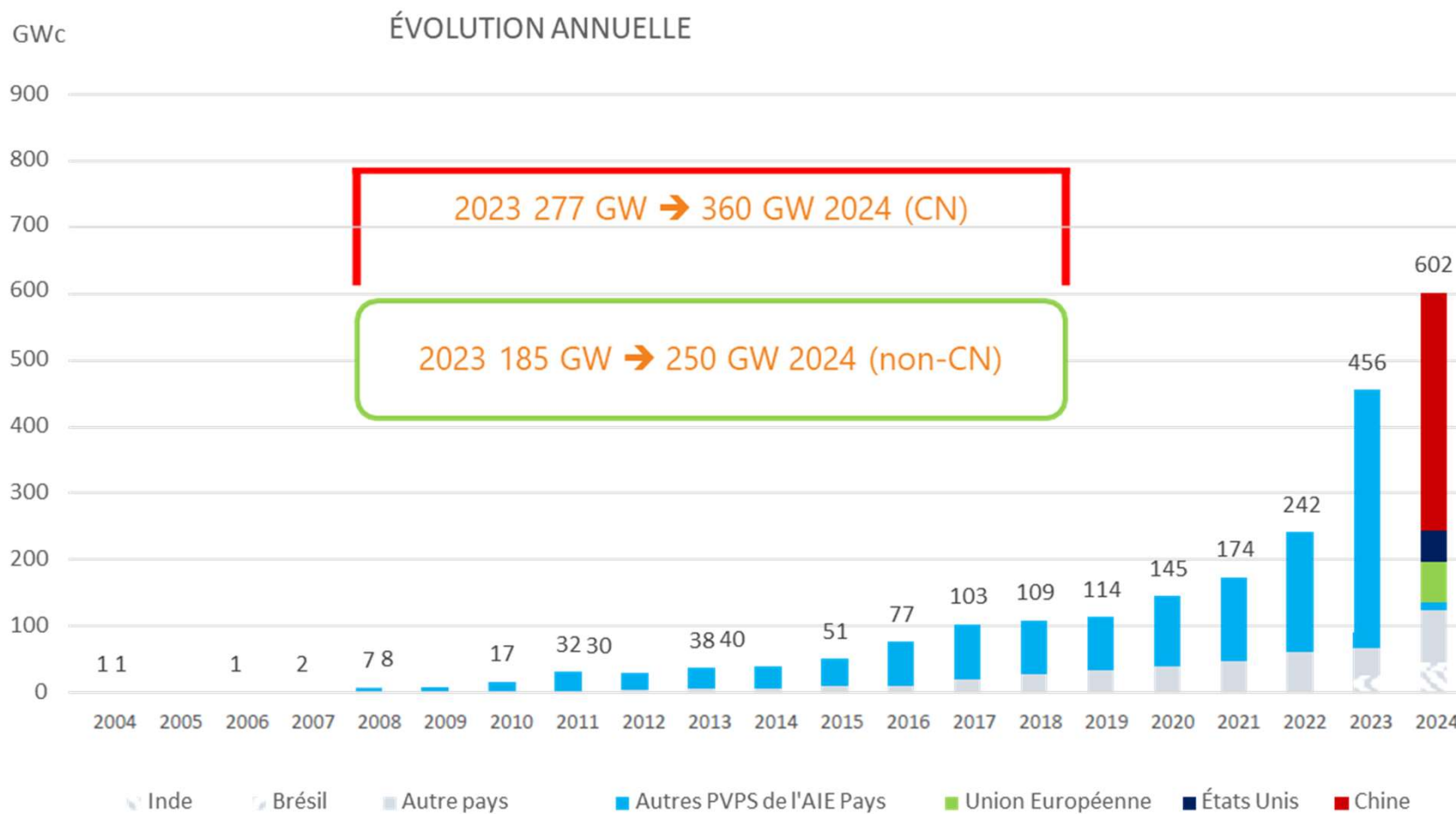
Source : Allosolar

www.iea-pvps.org

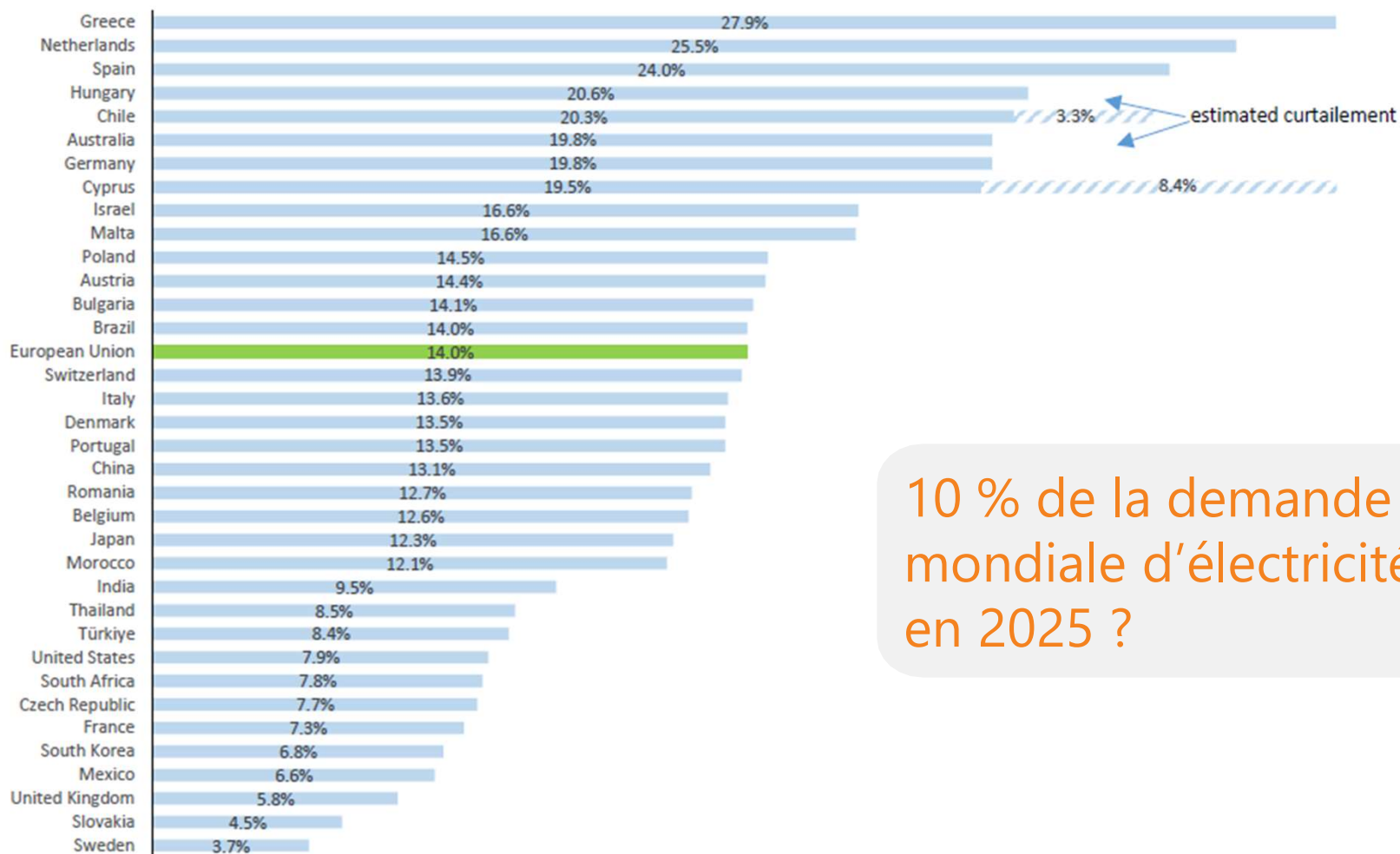
Données de marché à l'échelle internationale



Le marché mondial du solaire photovoltaïque



Le solaire dans la demande d'électricité

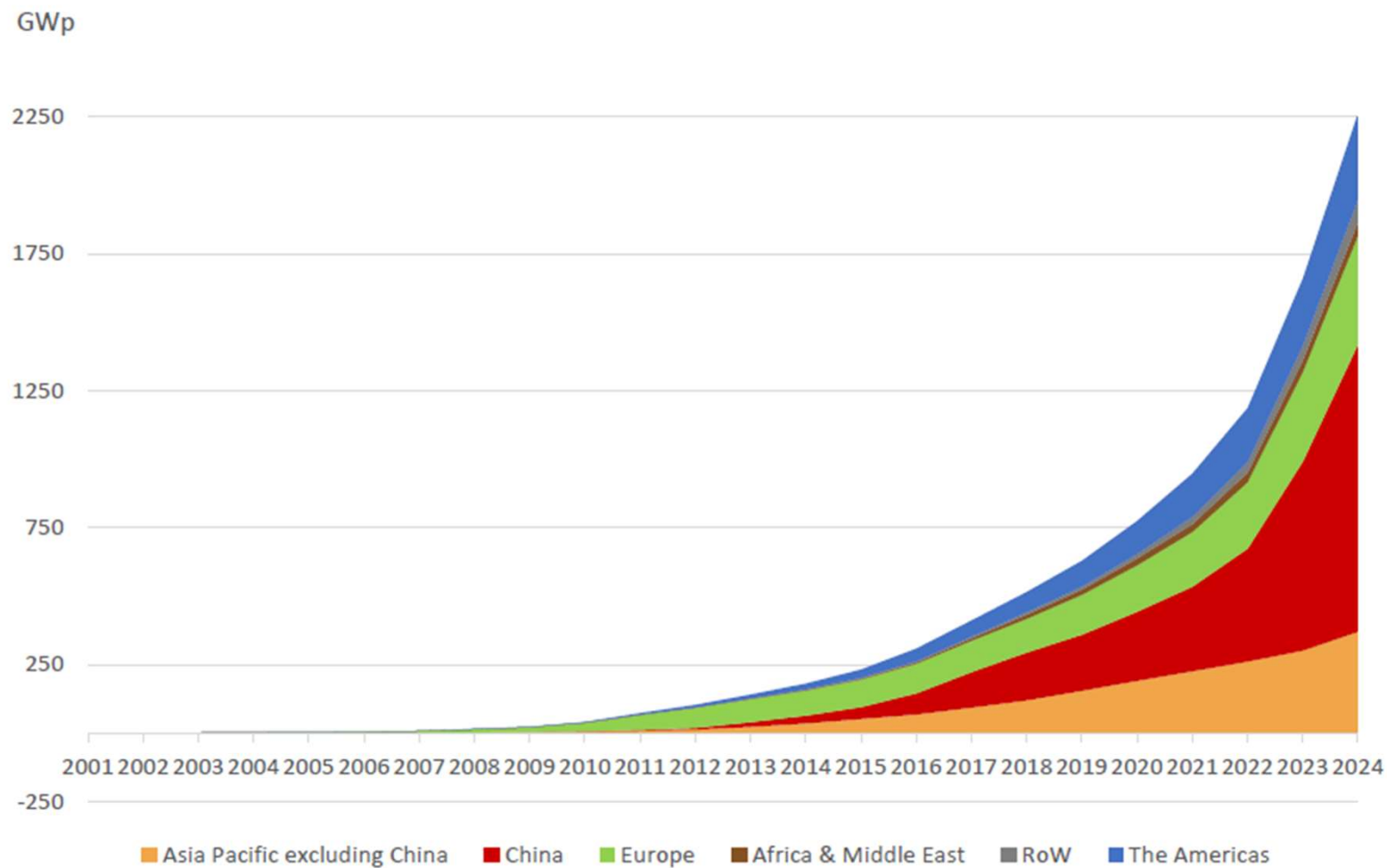


10 % de la demande mondiale d'électricité en 2025 ?

La répartition mondiale

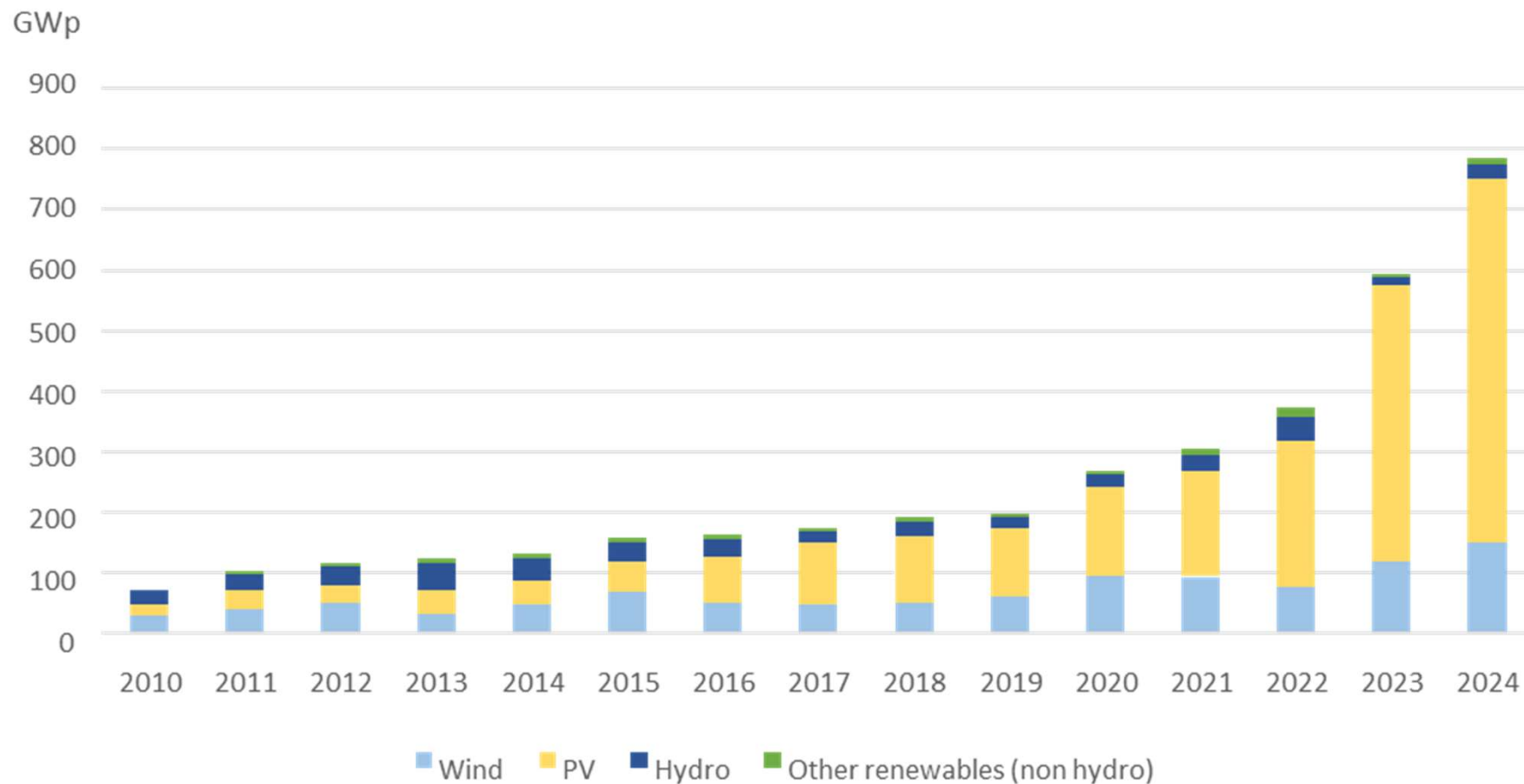


PVPS



Source : IEA PVPS

Le solaire domine le déploiement des EnR





Quelques chiffres

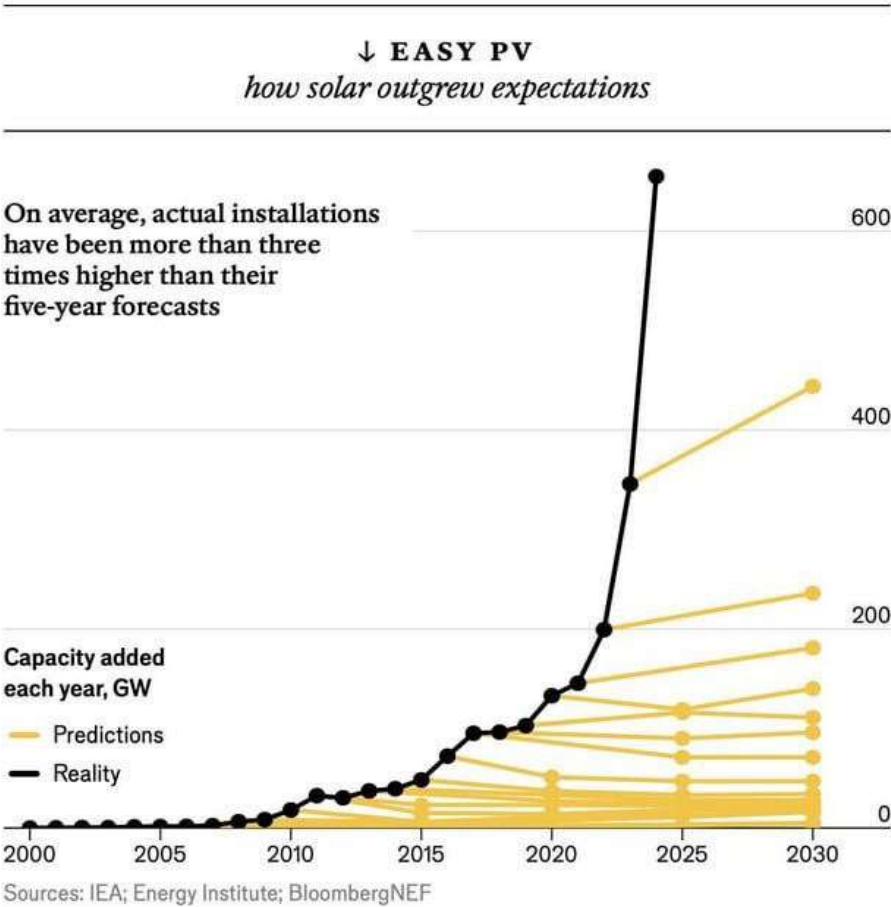
10%
**De la demande mondiale
d'électricité fin 2024**

1000 GWc par an
**Vers 2030, ce qu'on
installera**

500+ GW par an
**Ce qu'on installe chaque
année (et probablement
un peu plus)**

3000 GW par an
**Ce dont nous
aurons besoin**

PVPS



Quelques chiffres



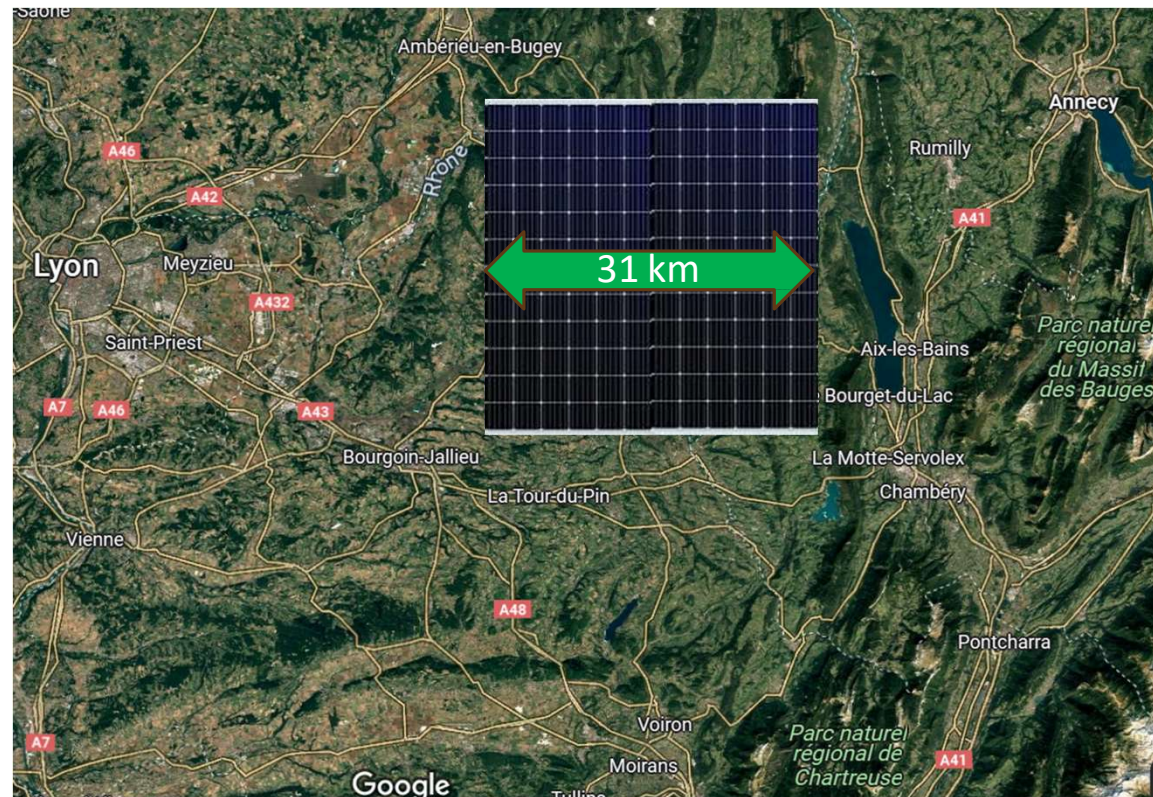
500 GWc par an
Cela représente...

1 milliard de
modules produits et
installés chaque
année...

PVPS

Mais aussi...

Une superficie de l'ordre de 1 000 km²

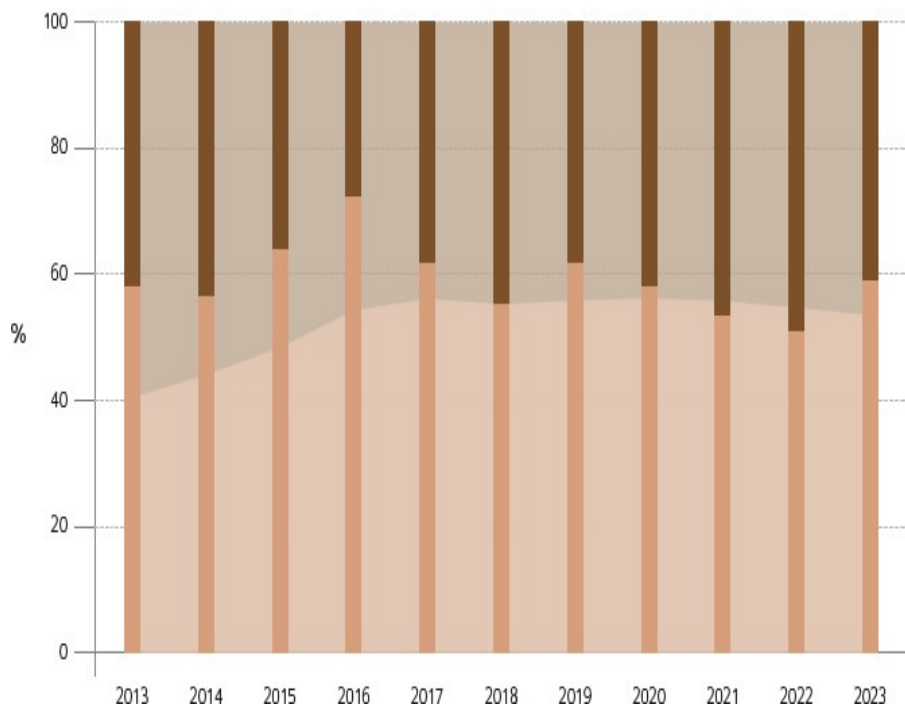


Source : IEA PVPS

Un marché segmenté entre les installations en autoconsommation et des fermes solaires

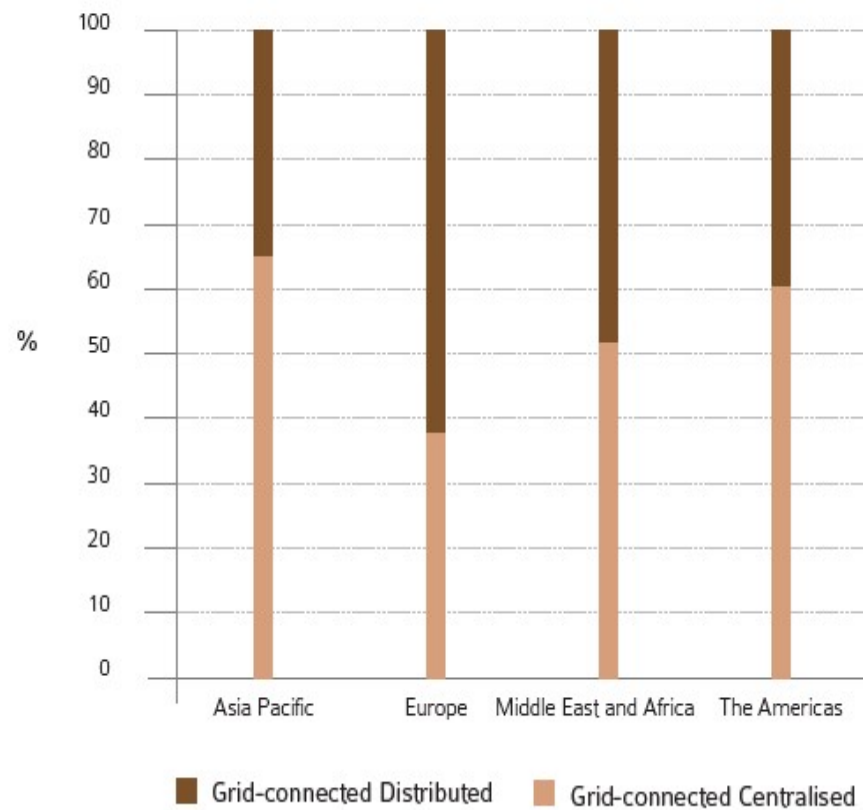


ANNUAL SHARE OF CENTRALIZED AND DISTRIBUTED GRID-CONNECTED INSTALLATIONS 2013-2023



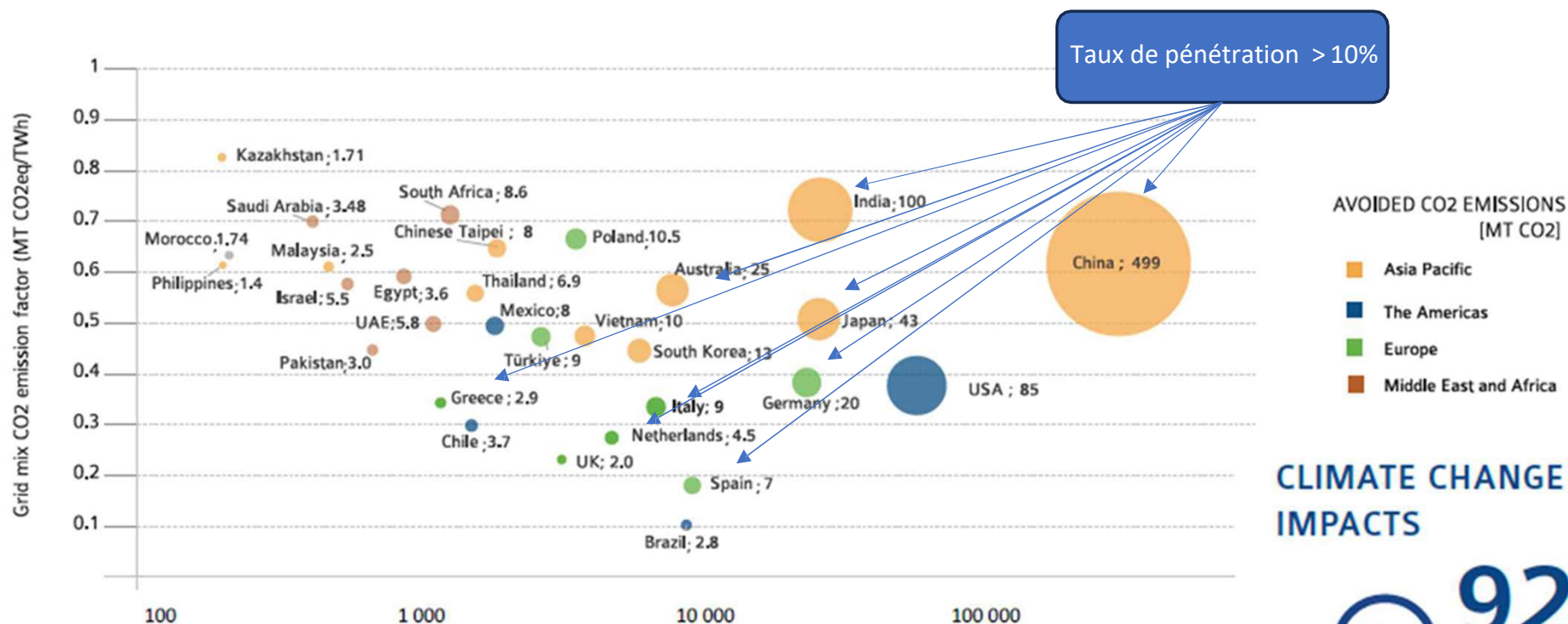
PVPS

ANNUAL GRID-CONNECTED CENTRALIZED AND DISTRIBUTED PV INSTALLATIONS BY REGION IN 2023



Source : IEA PVPS

Emissions de CO2 évitées par le solaire photovoltaïque



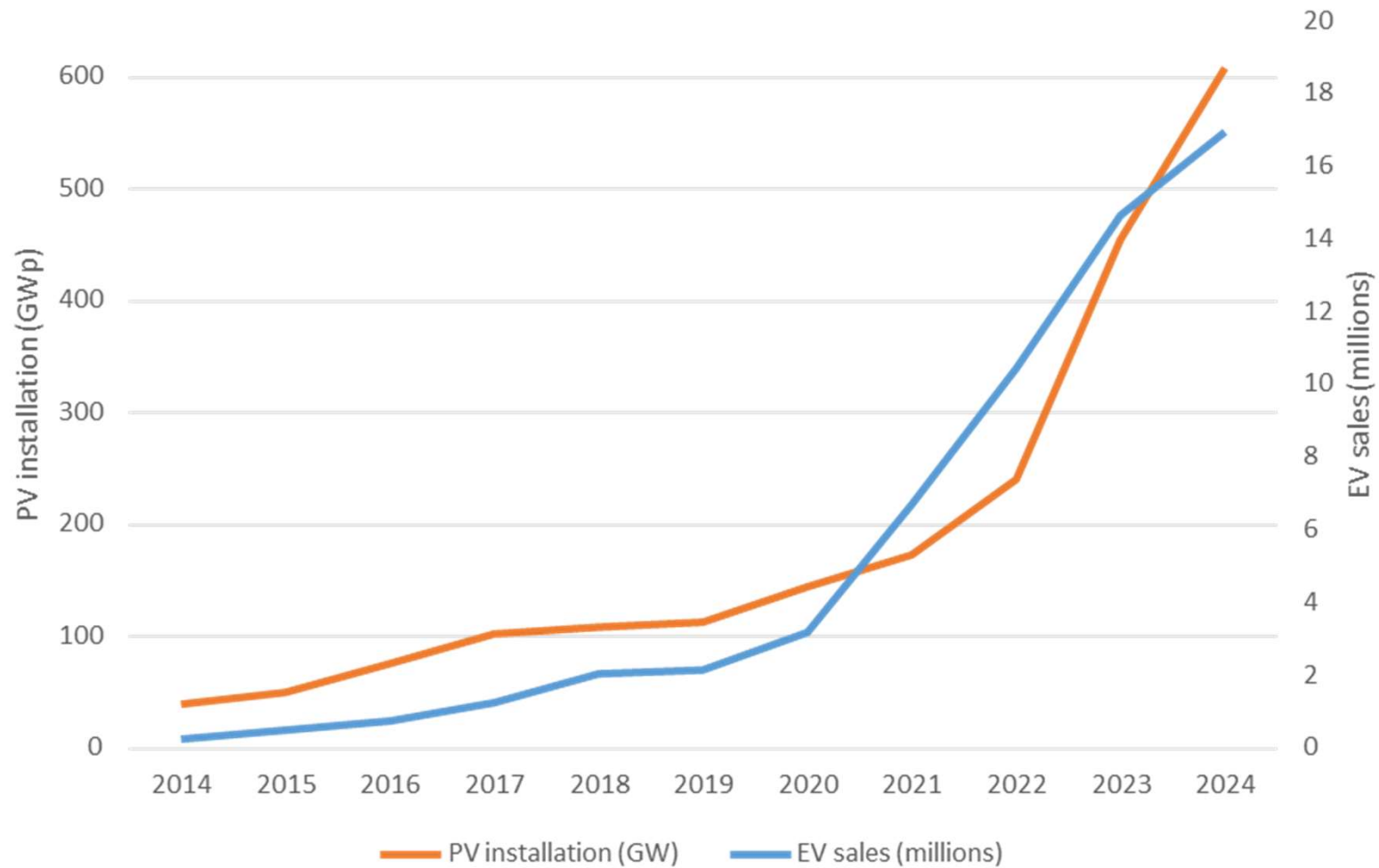
Emissions de CO2 si le PV remplace la base dans tous les pays

CLIMATE CHANGE IMPACTS

CO₂ **923**
million tons of CO₂
saved in 2023
* method changed from 2022;
now assuming PV replaces
baseload generation

Source : IEA PVPS

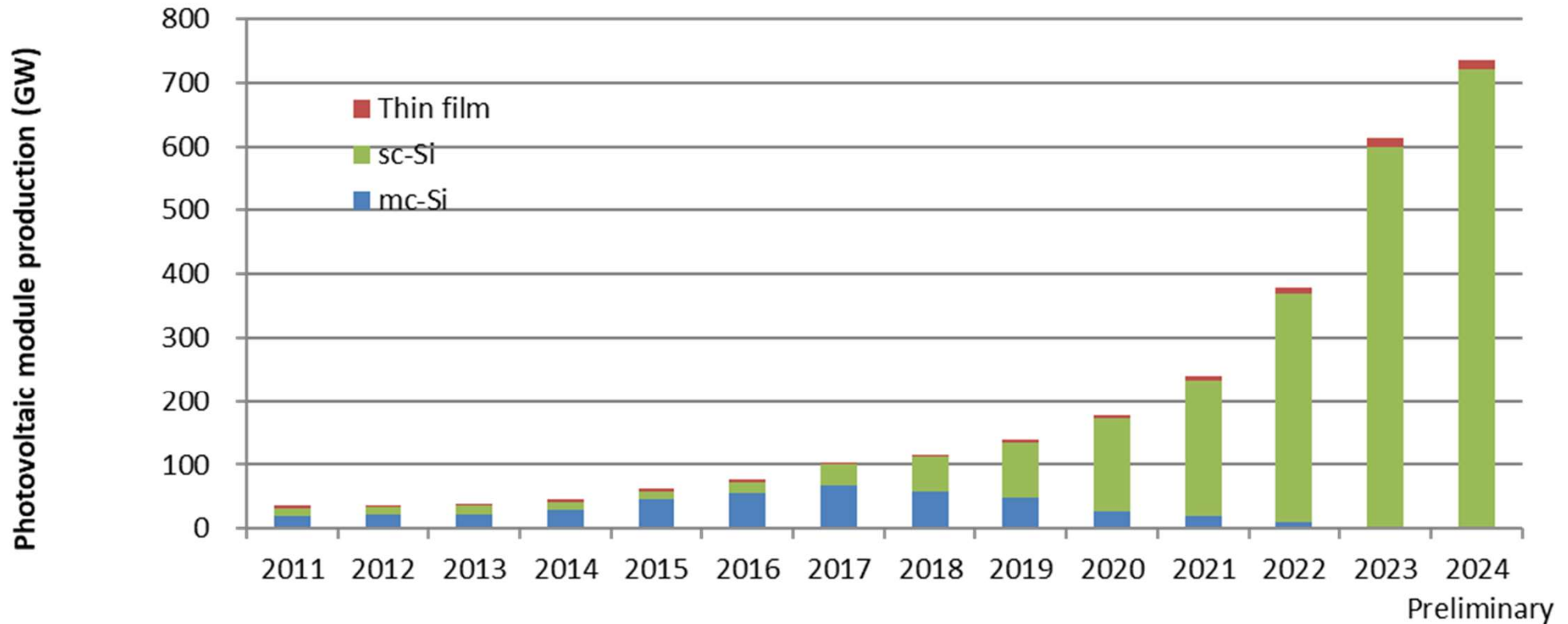
Les ventes de véhicules électriques sont plus rapides que celles de véhicules photovoltaïques, mais les deux sont croissance



Evolutions technologiques récentes

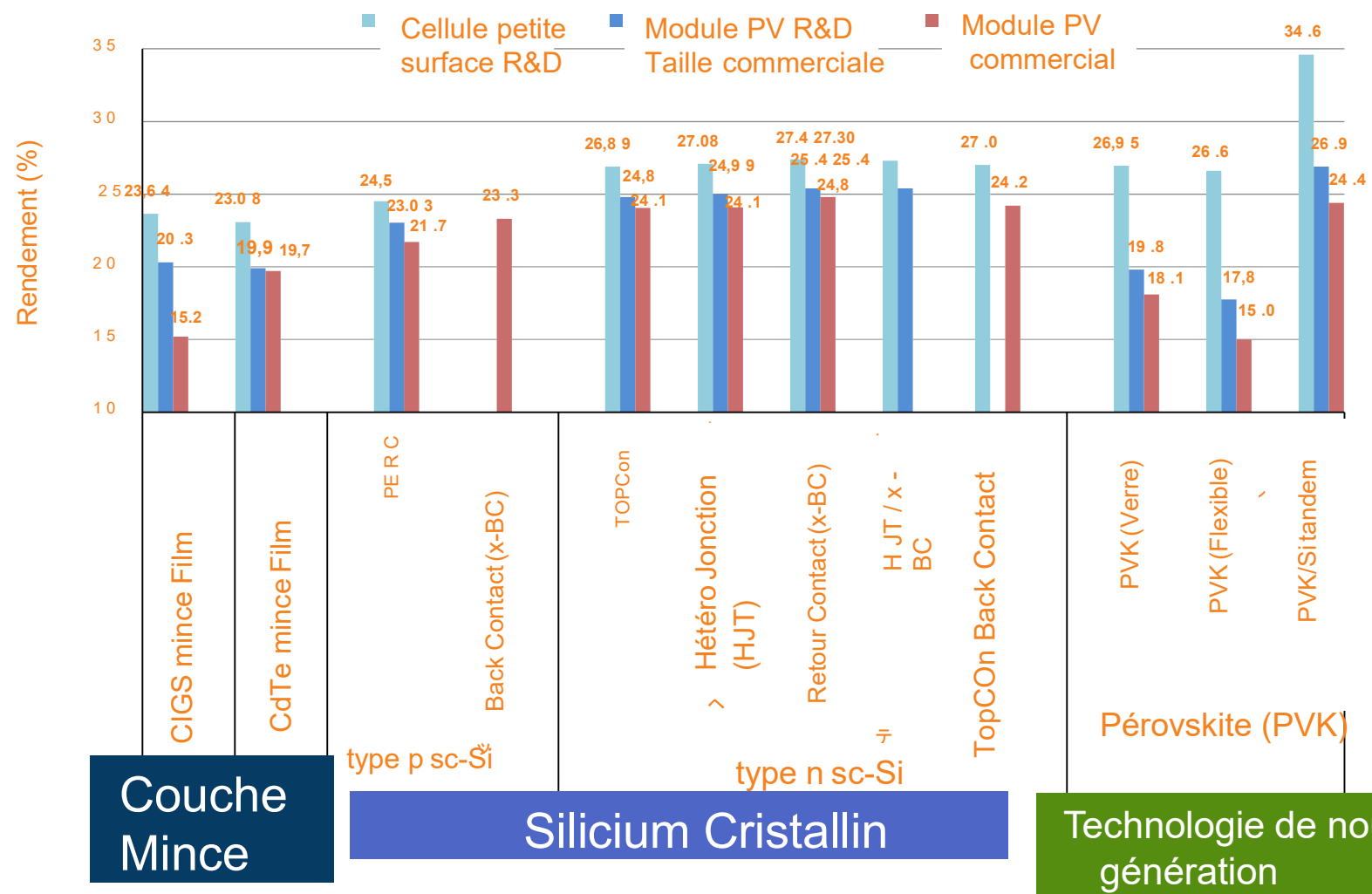


Tendances technologiques



- Le silicium monocristallin (sc-Si) domine le marché
- Les couches minces représentent une petite part d'environ 2 %, principalement des modules PV à couches minces CdTe de First Solaire
- TopCon est devenu le produit phare de 2024

Comparaison des rendements les plus élevés par technologies (2024)



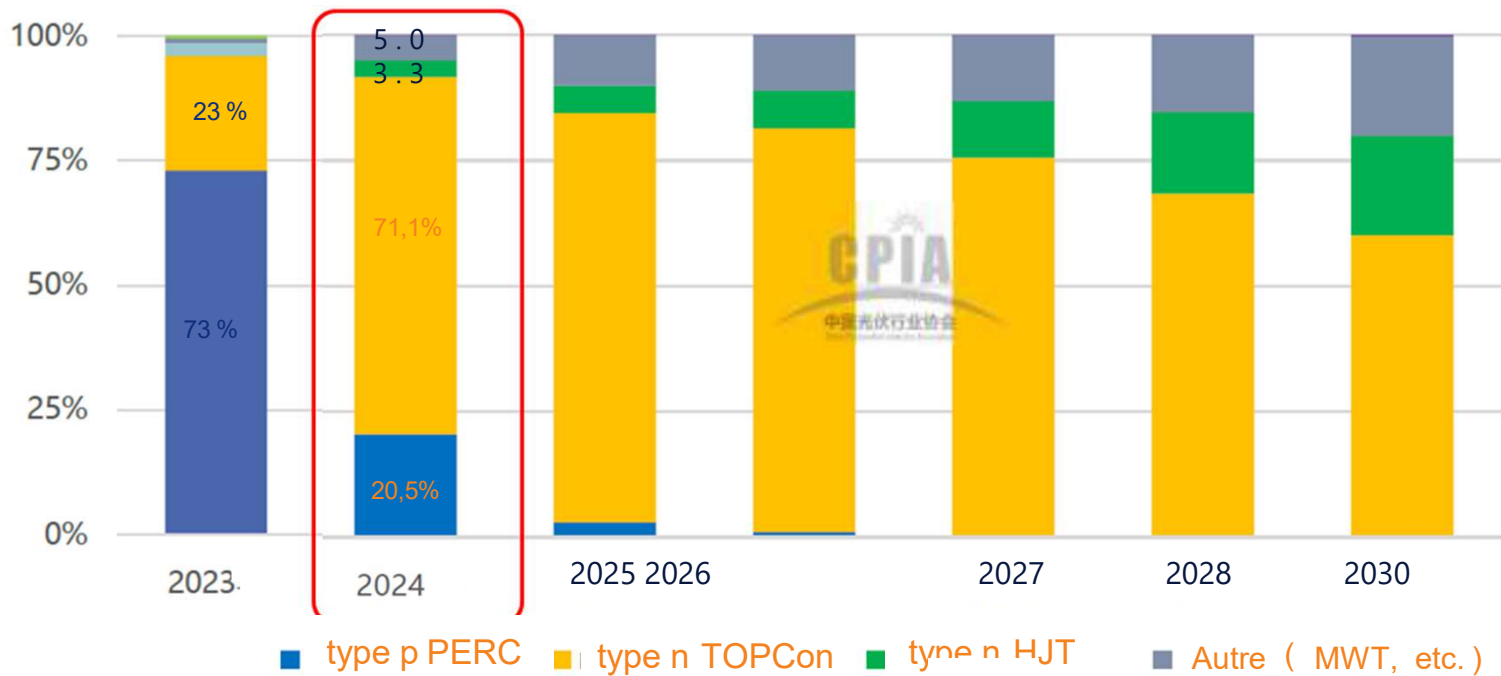
PVPS

Source : RTS Corporation



Part de la technologie des cellules photovoltaïques et perspectives

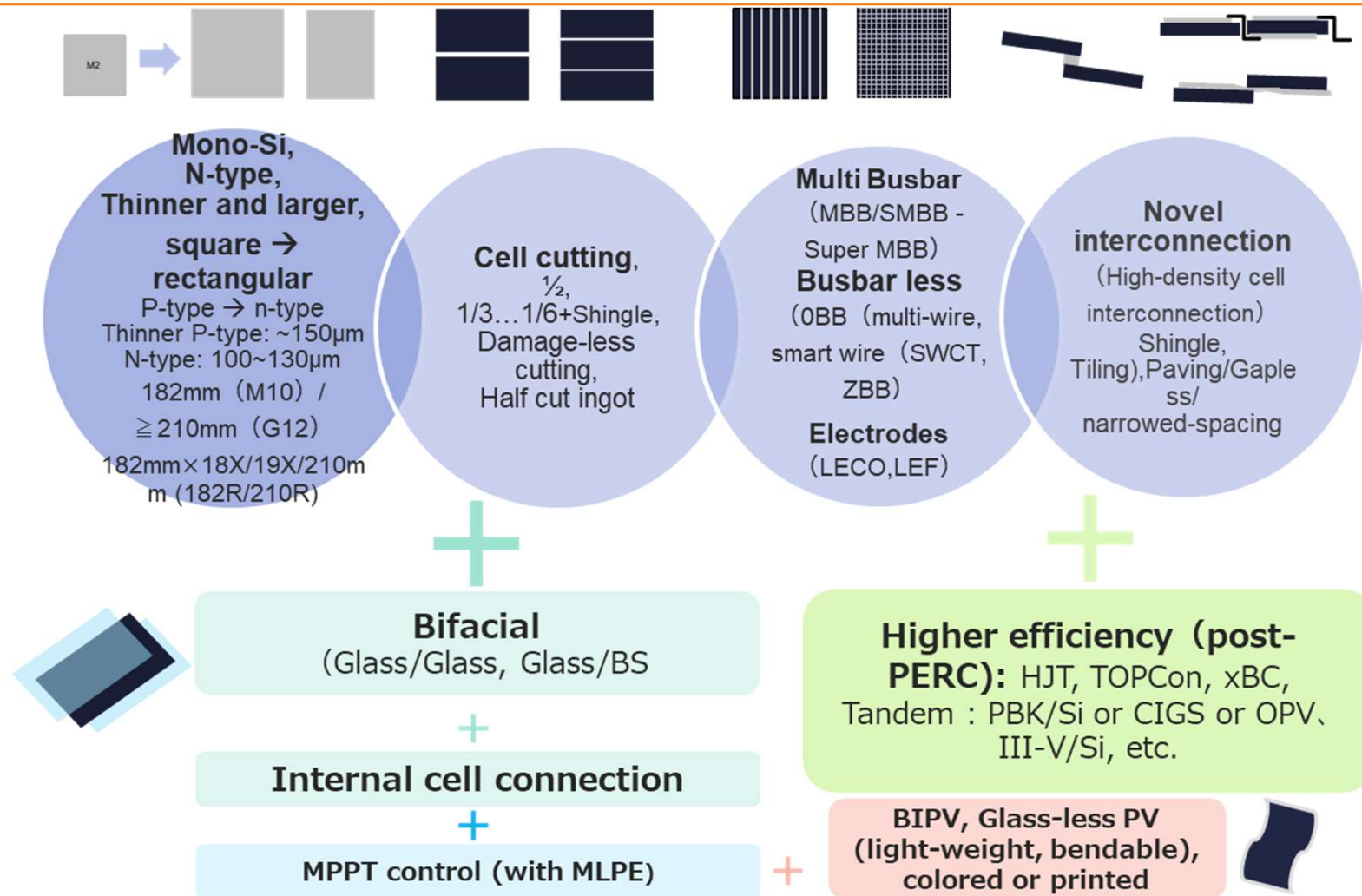
- La plupart des lignes de production de cellules solaires qui ont commencé à fonctionner en Chine en 2024 étaient de technologie....
- Capacité de production en 2024 : TOPCON 833 GW/an, HJT 50 GW/an, XBC 55 GW/an



PVPS

Source : CPIA, Shanghai HIUV New Material, compilé par RTS Corporation

La technologie permet de réduire encore davantage les coûts



Standardisation des wafers rectangulaires



PV PS

- Les principaux fabricants adoptent les wafers rectangulaires, principalement pour les applications à grande échelle PV.
- En décembre 2023, 5 fabricants utilisent des wafers 210R de **182 x 210 mm**
- Wafers également utilisés pour petits modules (54 et 48 cellules) pour applications en toiture
- La largeur du côté court est unifiée à 1 134 mm

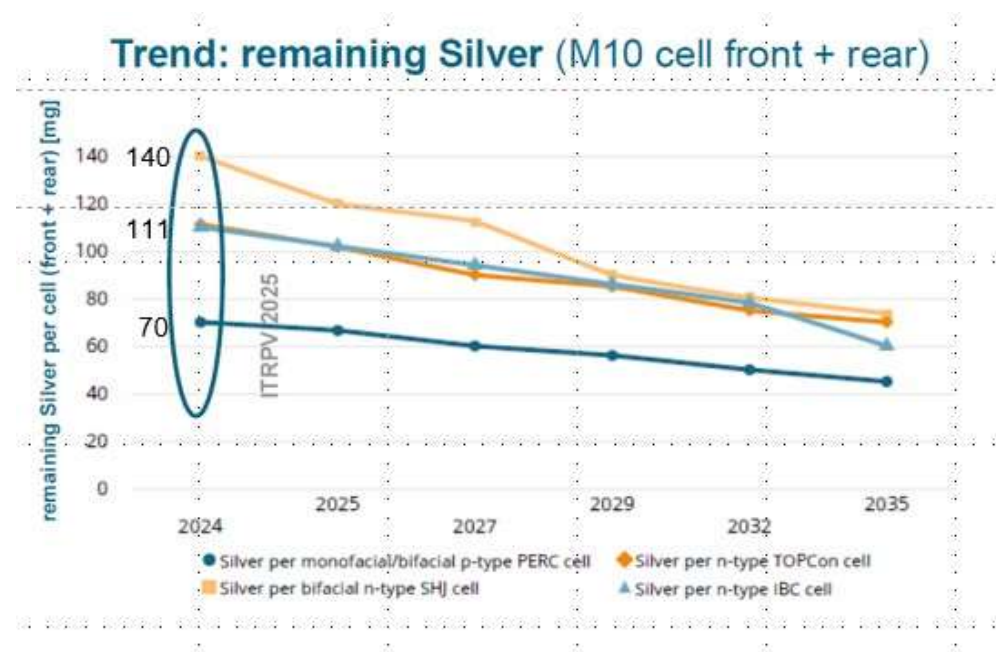
Opportunité de réduction des coûts : consommation d'Argent



- En 2024, l'utilisation estimée de l'argent pour le photovoltaïque représente **environ 20 % de la consommation mondiale** (utilisé pour les connexions électriques)
- La technologie des cellules de type N consomme plus d'argent
 - ⇒ Niveaux de consommation d'argent par principaux fabricants (Tier 1) :
PERC : 7-8 mg/W, **TOPCon : 12-16 mg/Wc**, HJT : 17-20 mg/W
- Le remplacement du cuivre est l'une des solutions



<https://tradingeconomics.com/commodity/silver>



www.iea-pvps.org

Et que se passe-t-il côté français....



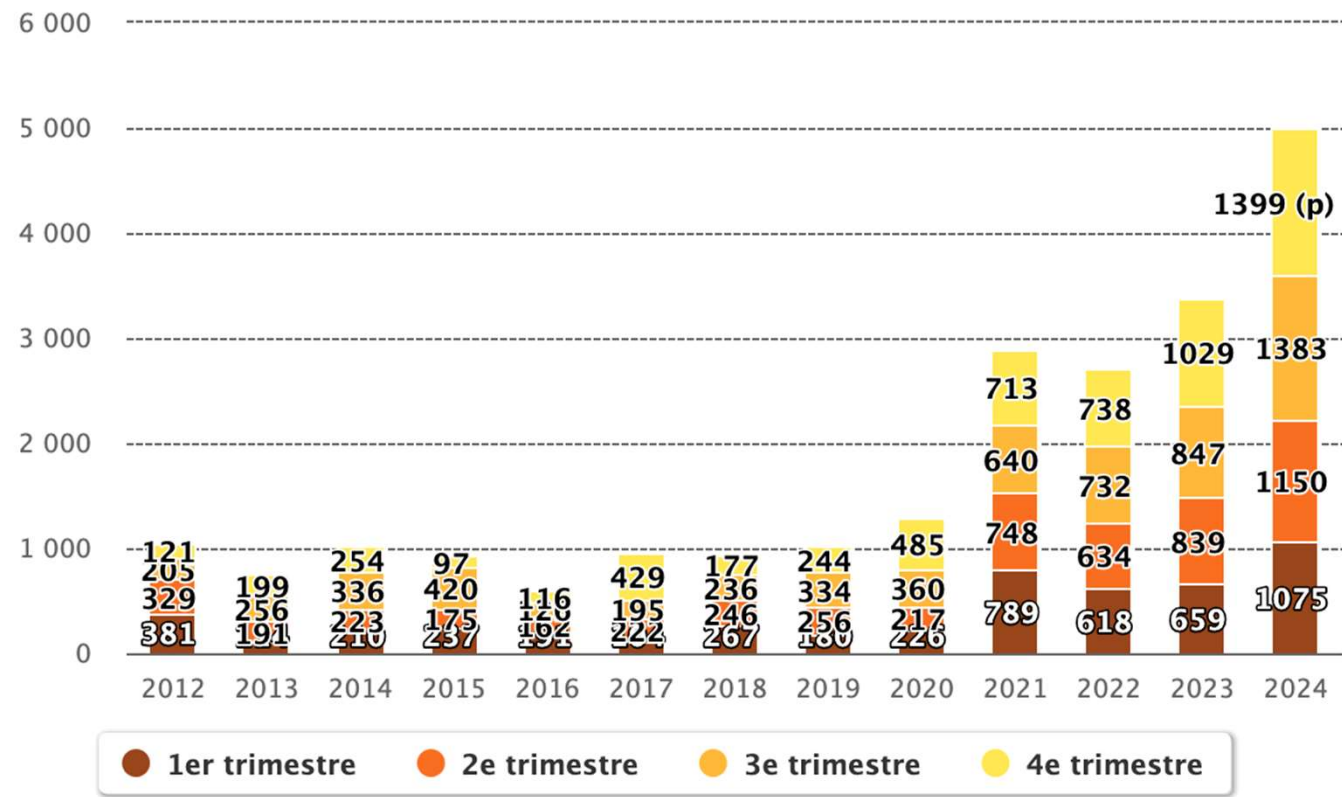
Capacité photovoltaïque raccordée en France à fin 2024



Solaire photovoltaïque : nouveaux raccords

25,3 GW d'ici 2024

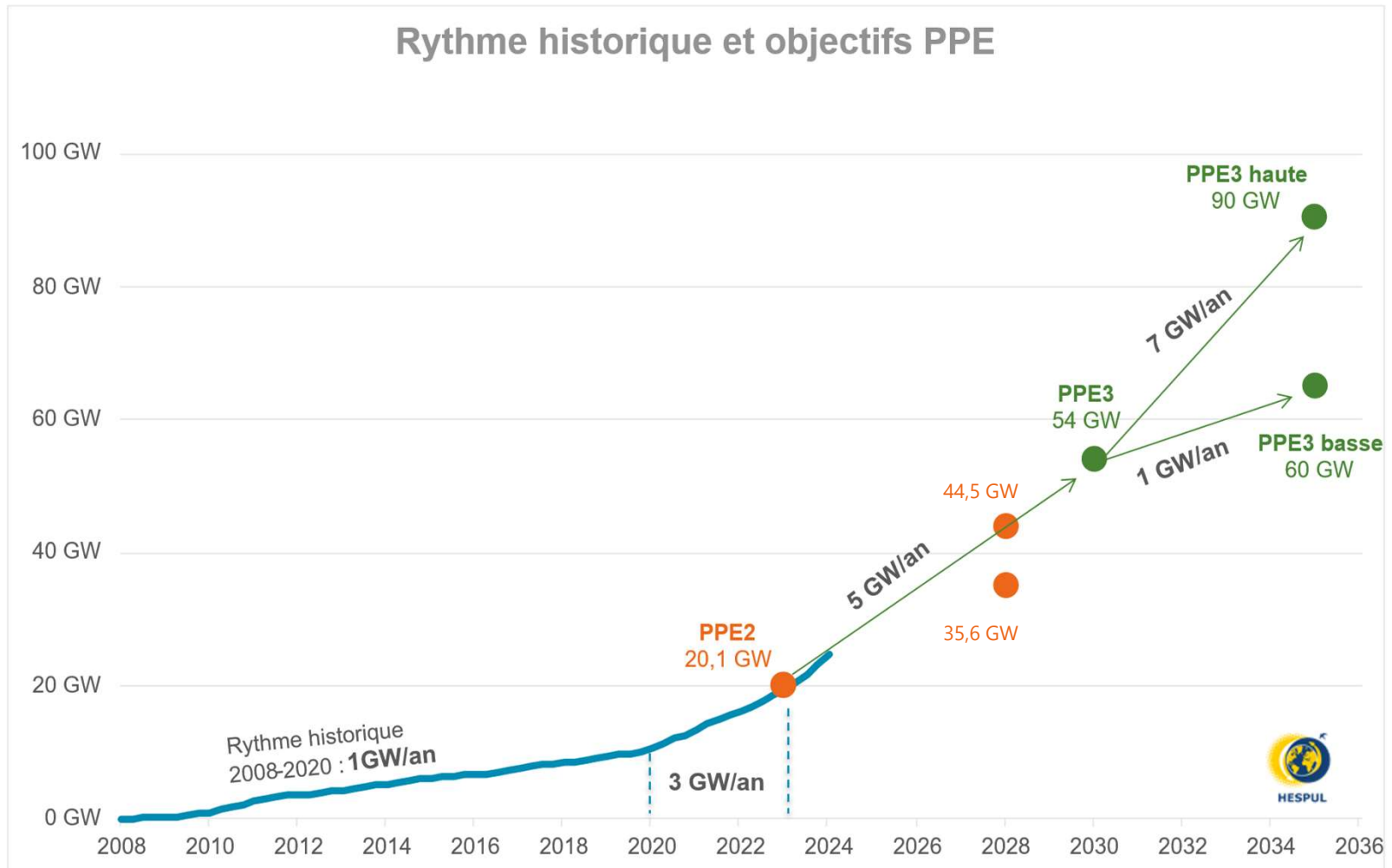
Puissance raccordée par trimestre, en MW



Objectifs de raccordement à 2030 et 2035



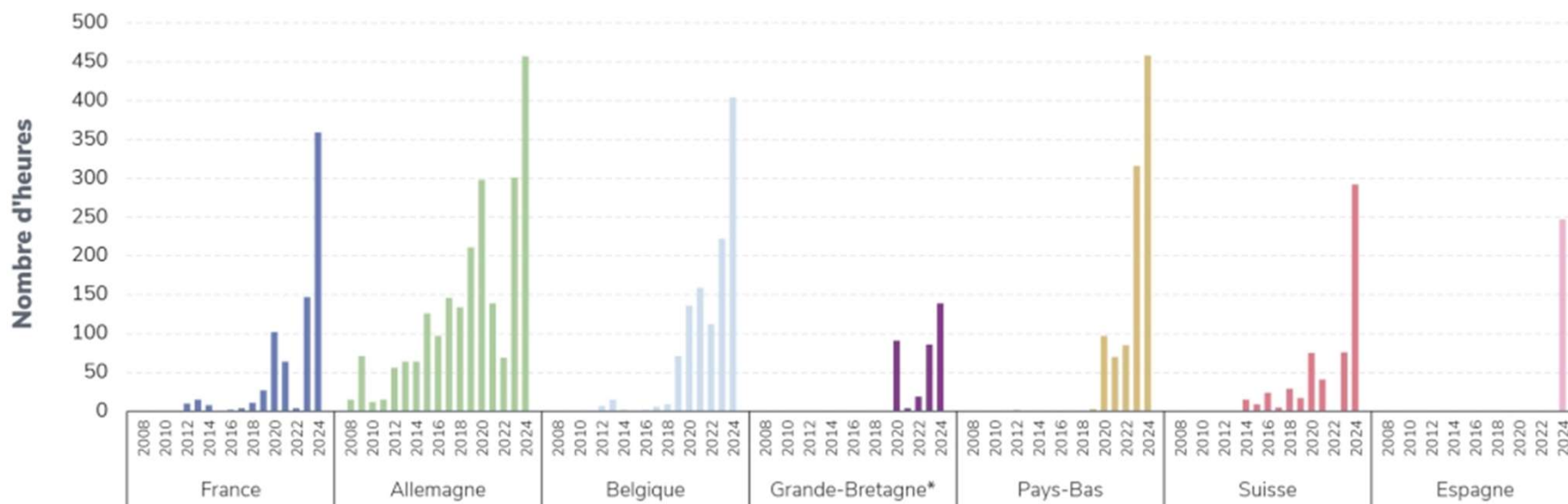
PVPS



Evolution des prix négatifs en France et dans l'UE



Nombre d'heures sur l'année où le prix de l'électricité a été négatif dans une sélection de pays européens



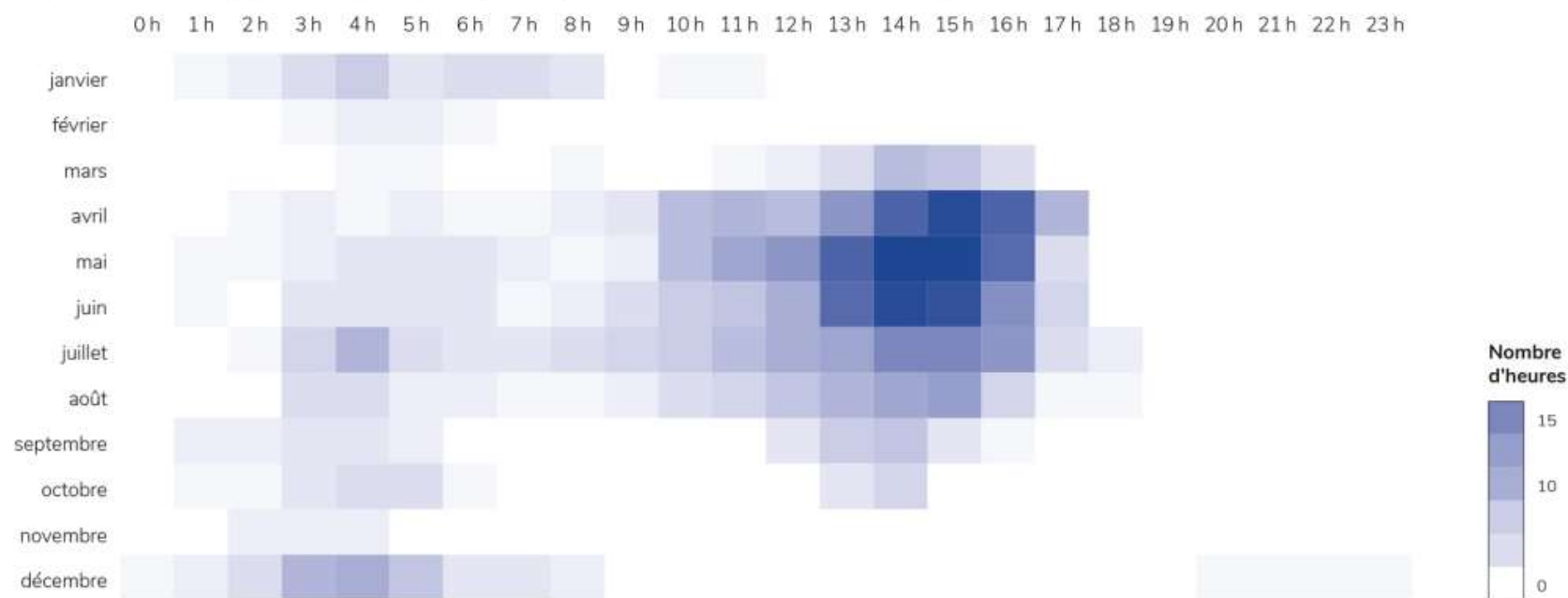
Sources : RTE, bilan électrique 2024, tiré de Epex Spot

- 359 heures à prix négatifs en 2024 contre 147 en 2023
- Prix entre -0,01€/MWh et -1€/MWh = 46% des occurrences en 2024 et prix entre -5€/MWh et -30€/MWh = 30% des occurrences

Répartition des prix négatifs en France



Répartition horaire, par mois, des prix spot négatifs en France au cours de la période 2002-2024

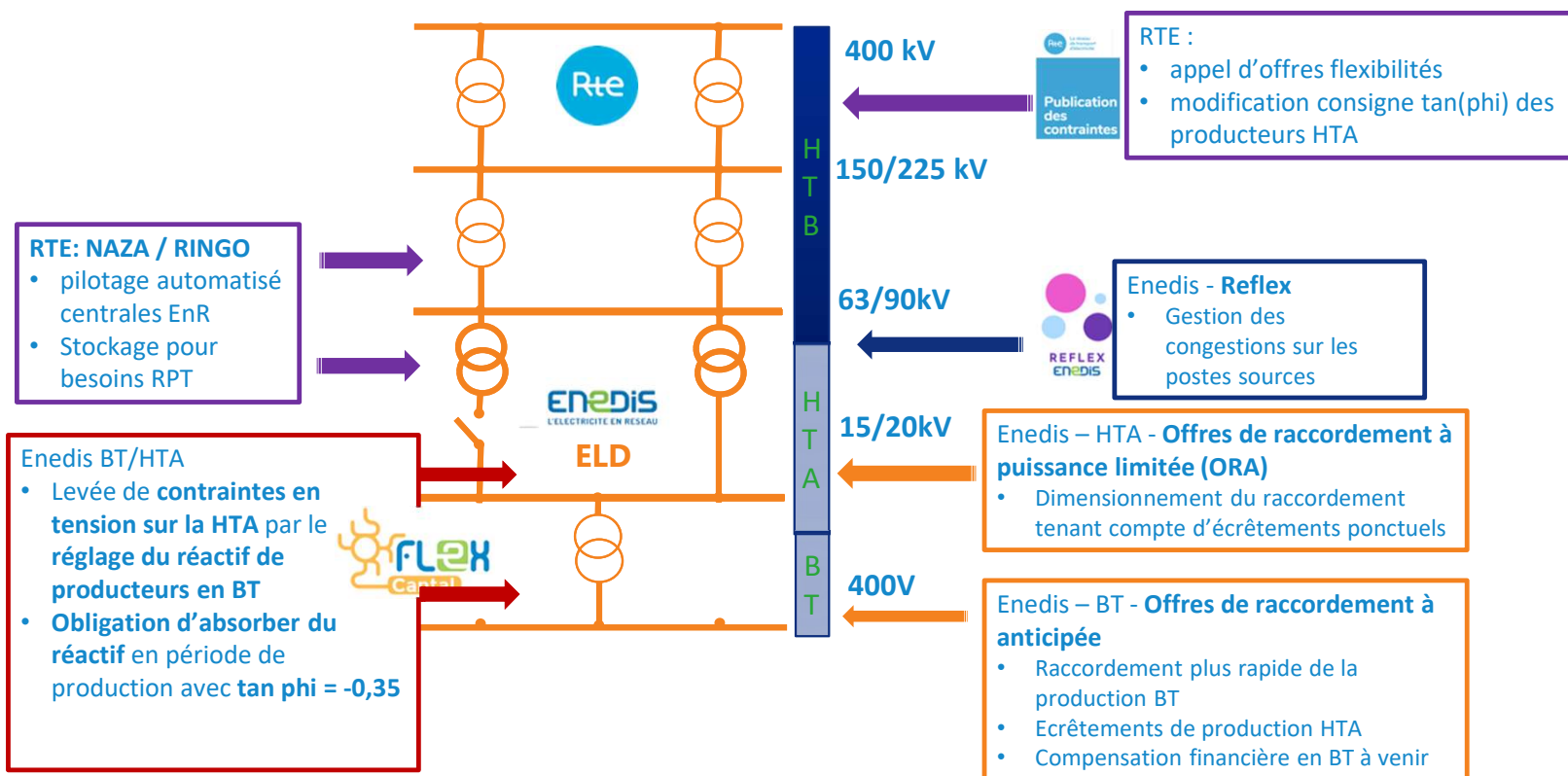


Sources : RTE, bilan électrique 2024, tiré de Epex Spot

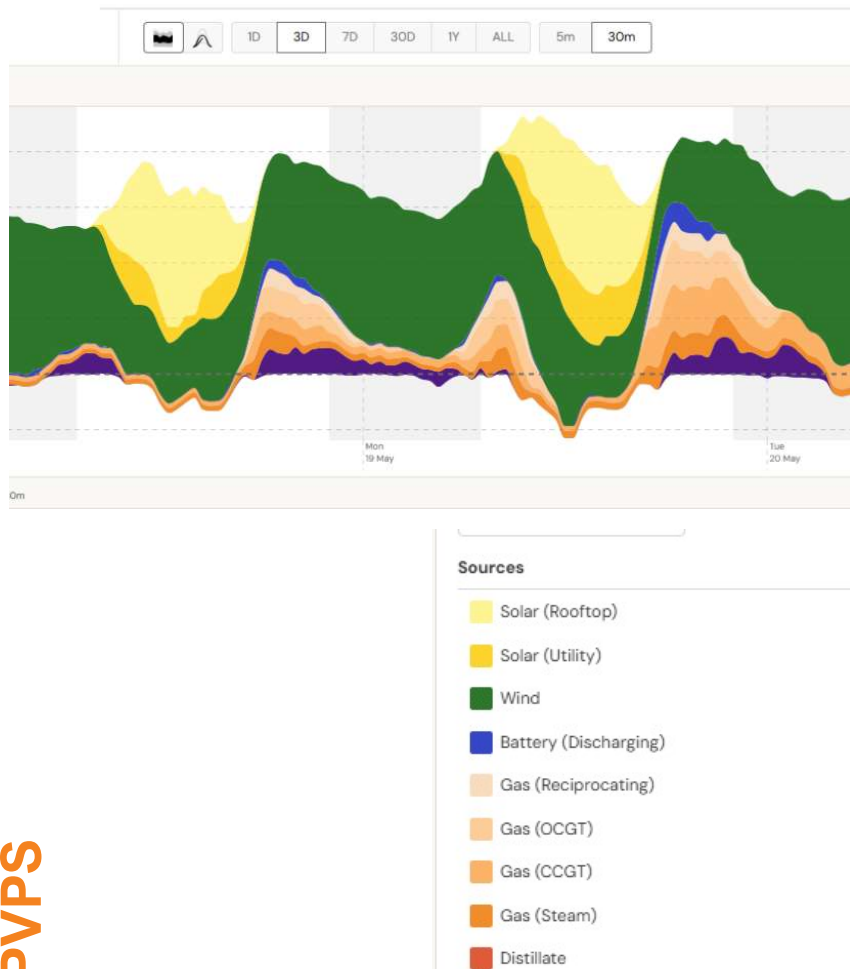
Variations maximales des prix spots au sein d'une journée :

- 14% en 2019
- 34% en 2023

Des expérimentations menées sur différents domaines de tension



Principaux enjeux des 12 derniers mois en Australie



<https://explore.openelectricity.org.au/energy/sa1/?range=7d&interval=30m&view=discrete-time&group=Detailed>

- Prix négatifs de l'électricité en milieu de journée
- Retards dans la construction de nouvelles grandes centrales
- Le programme d'investissement en capacité (9 GW), lancé en 2024, devrait stimuler la reprise du marché
- Croissance des investissements dans les lignes de transport pour soutenir l'interconnexion
- Le programme de soutien pour l'usage de batteries pour aider l'autoconsommation (*behind the meter*)

www.iea-pvps.org

Vers de nouvelles applications....



Nouvelles applications : économiser l'espace, pour un double usage du solaire et du territoire



PV flottant

Eau douce ou salée



PVPS

Source : Becquerel Institute

L'agrivoltaïsme



Combiner production solaire et agricole ...



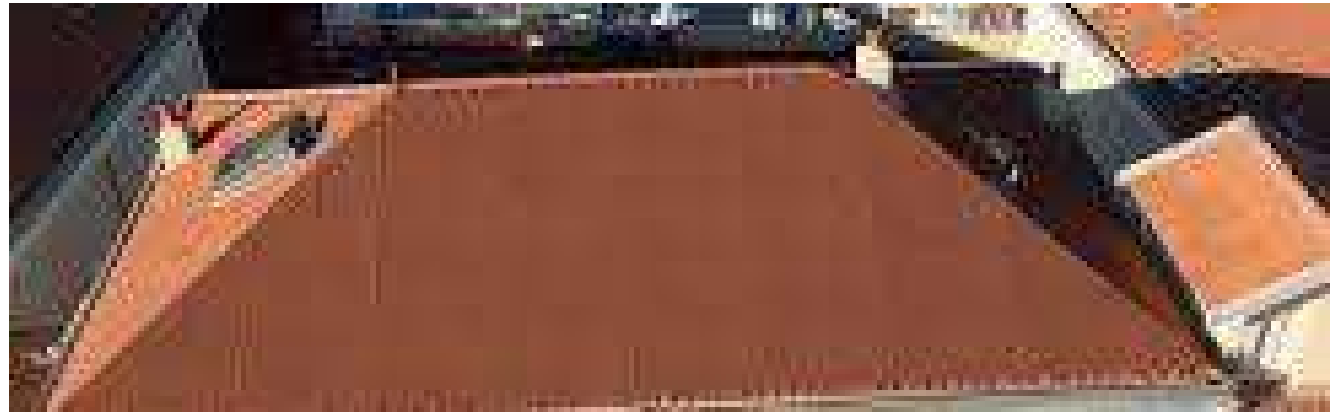
PVPS

Source : Becquerel Institute

L'intégré au bâti: gage d'esthétique



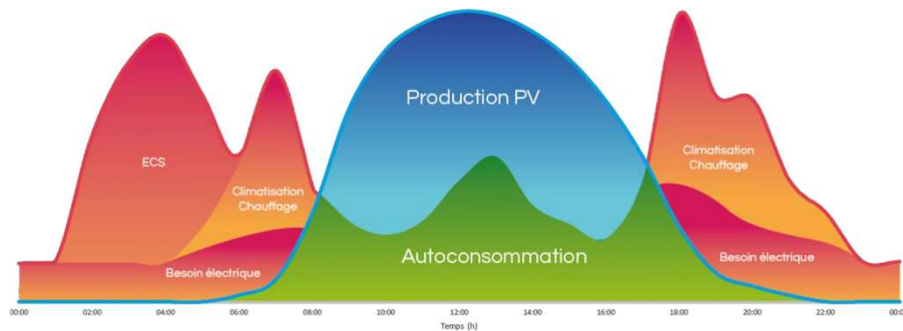
Plus d'esthétique, plus de créativité, le BIPV ou intégré au bâti offre des possibilités infinies



R

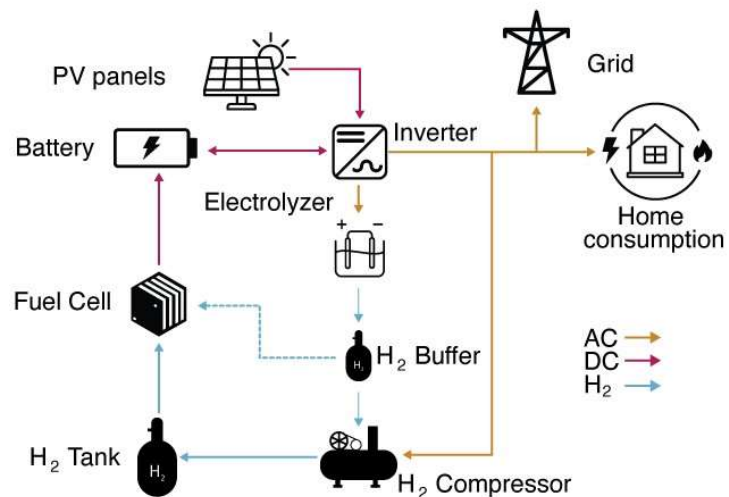
Source : Becquerel Institute

Solaire, stockage et hydrogène



Stockage à court terme (soirée et nuit)

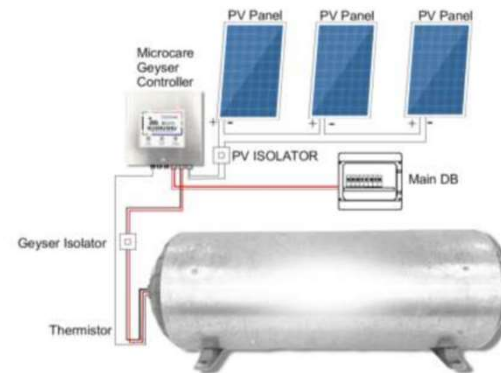
Transformation en e-carburants (H₂...)



Solaire et stockage thermique



* Technologie PV2Heat



* Chauffe eau solaire en autoconsommation

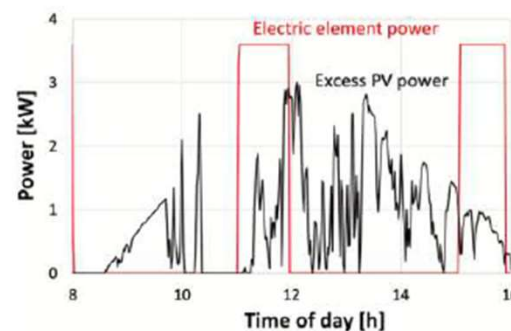
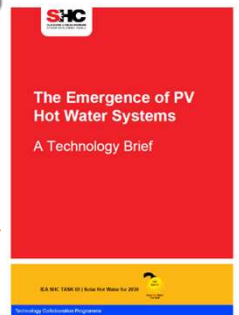
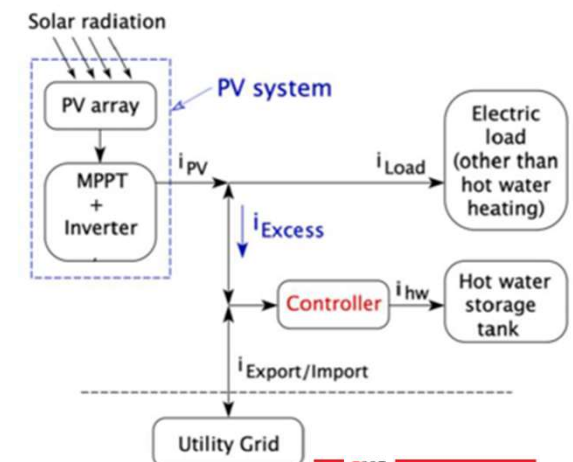


Figure 7. Electric element power (3.6 kW) compared to the available excess PV power when the water heating is only controlled by a tank thermostat (from [8]).



[IEA-SHC-Task69-C.3 23-PV-Hot-Water-Technology-Brief.pdf](#)

* Chauffe eau solaire du réseau



Le bifacial vertical

Challenge : le solaire de midi perd sa valeur

En augmentant son déploiement, le solaire traditionnel dépasse la demande en été
Les prix autour de 12-13h chutent et la valorisation du courant solaire diminue...





Le bifacial vertical

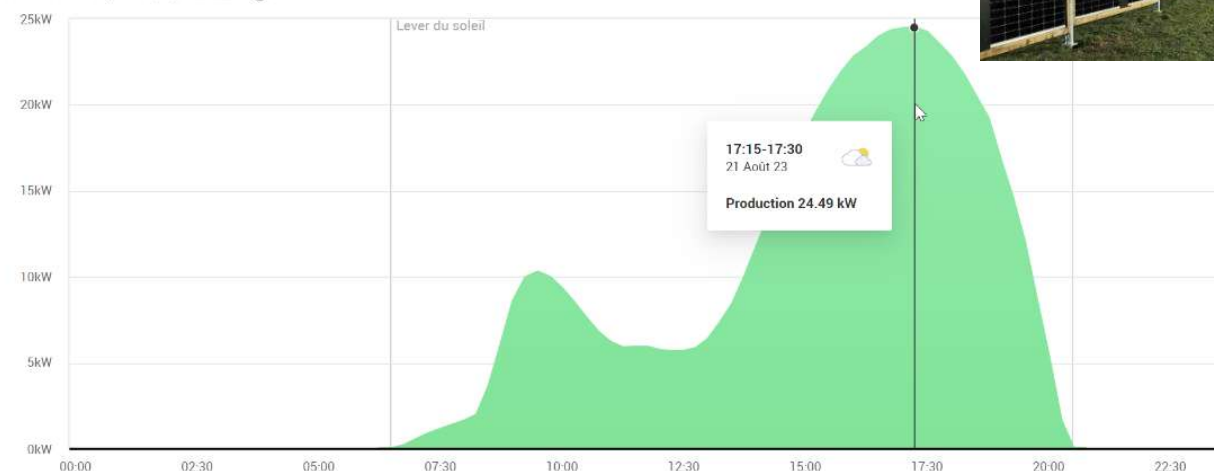
Une technologie complémentaire au solaire en toiture...

Pics production en début et fin de journée en orientation E-O, productible hivernal élevé en orientation S.
Creux en mi-journée quand le soleil est parallèle et qu'il n'y a que le rayonnement indirect.

Complémentaire au PV en toiture

- Exemple ci-contre: le productible annuel dépasse de 6% l'installation PV orientée S du toit, malgré l'ombrage du bâtiment situé à quelques mètres (faible pic du matin)

PUISSANCE DU SITE
Dernière mise à jour 15/01/2024 22:35





Le bifacial vertical

Une clôture modulaire

Conçu pour des modules de dimensions standard

Limitation des pertes liées aux ombrages grâce aux optimiseurs intégrés

Bois local ou acier

Design sobre et robuste

Double fonction: un pare-vue qui se paie tout seul!

Conception électrique brevetée, pas d'exposition des câbles au soleil et sécurité pour les animaux ou passants

PVPS

Source : PLANAIR



www.iea-pvps.org

Le programme PVPS de l'AIE et ses résultats....



IEA PVPS en bref



- 32 ans – fondée en 1993
- 26 pays plus la Commission européenne et 2 sponsors
 - **De plus, le Royaume-Uni** est en train d'adhérer !
- 9 tâches et 1 groupe d'action actuellement actifs
- 34 rapports publiés et 17 événements organisés au cours de la dernière année
- ~400 participants à travers le Comité exécutif et toutes les tâches
- Le mandat actuel s'étend de mi-2023 à mi-2028

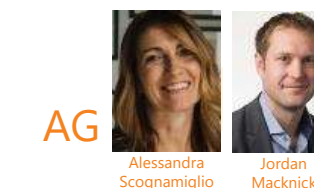
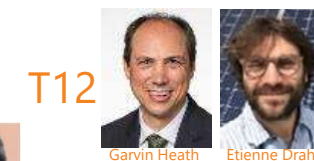
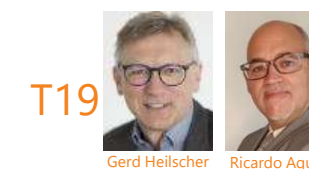
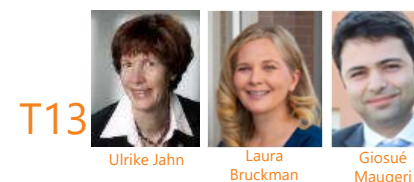
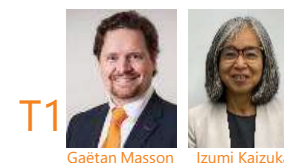


Aperçu des tâches actives et en développement



Tâche: Sujet: En cours d'exécution:

- Tâche 1 « Analyse du marché photovoltaïque » 32 ans
- Tâche 12 « Activités de durabilité PV » 18 ans
- Tâche 13 « Fiabilité et performance PV » 15 ans
- Tâche 15 « PV intégré au bâtiment » 10 ans
- Tâche 16 « Prévisions des ressources solaires » 48 ans *
- Tâche 17 « PV et transport » 7 ans
- Tâche 18 « PV hors réseau et en périphérie de réseau » 5 ans
- AG « Groupe d'action Agrivoltaïque » 0,5 an
- Tâche 19 « Défis de l'intégration au réseau » * **Nouveau** *
- Tâche 20 * « Pôles d'hydrogène et d'énergie verts » * **Nouveau** *



* La tâche 16 a été réalisée au SHC de 1977 à 2017, puis au PVPS. * La tâche 20 collaborera avec les TCP Éolien et Hydrogène.

Activités nouvelles et à venir



• Agrivoltaïque (Groupe d'action)

• Ateliers des parties prenantes

1. États-Unis (hybride) , juin 2024
2. Autriche, septembre 2024
3. Japon , novembre 2024
4. Virtuel, mars 2025
5. Virtuel, à déterminer

• Évaluer les tendances

• Publication d'informations clés

• Normaliser la recherche

• Identifier de nouveaux besoins de recherche

• Intégration au réseau (tâche 19)

1. Objectifs photovoltaïques par rapport aux capacités du réseau
2. Droits et obligations des prosummateurs
3. Numérisation et réseaux intelligents
4. Approbation, mise en service
5. Restriction, puissance ferme
6. Nouveaux onduleurs, formation de réseau
7. Communautés énergétiques, agrégateur
8. Gestion locale de l'énergie
9. Économie d'énergie

• Ateliers, webinaires, wikipedia

• Pôles énergétiques et hydrogène vert (Tâche 20)

- Activité conjointe des TCP Éolien, Hydrogène et PVPS
- Données et conception pour les centrales hybrides éoliennes-solaires-hydrogène
- Meilleures pratiques pour des conditions végétales spécifiques
- Enjeux réglementaires et de marché, défis locaux et sociétaux

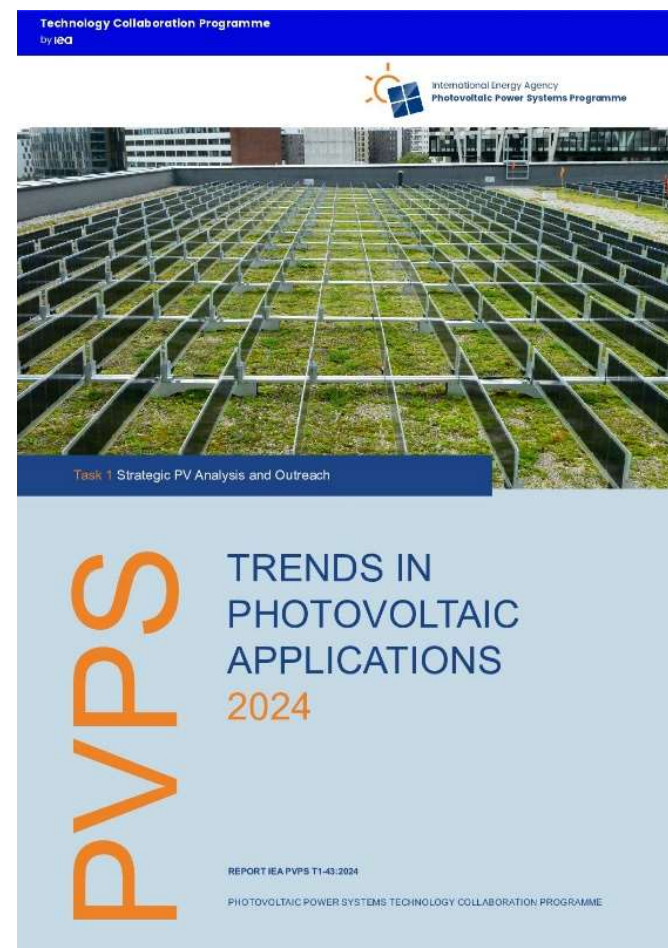
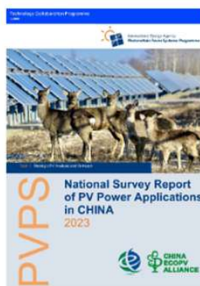
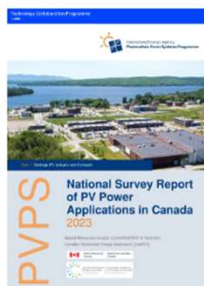
+ Intérêt à faire plus sur l'engagement du public et peut-être Power2Heat et l'utilisation flexible

Faits marquants récents – Tâche 1 (Marché du photovoltaïque)



- Analyse du marché et de l'industrie photovoltaïque mondiale
- Dernier rapport annuel phare « Tendances » d'octobre 2024
- Rapports d'enquête nationaux publiés pour 10 pays l'année dernière.

PVPS



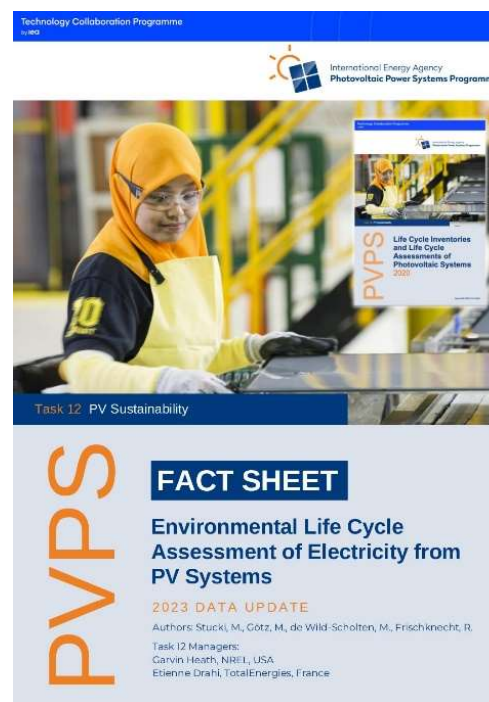
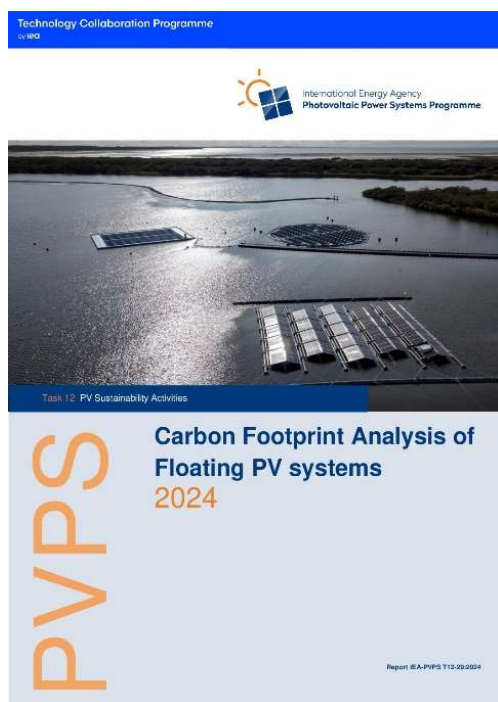
Faits marquants récents – Tâche 12 (Durabilité)



- Analyse de l'empreinte carbone des systèmes photovoltaïques flottants
- Mise à jour de l'ACV environnementale de l'électricité produite par les systèmes photovoltaïques

+ à venir
très bientôt :

PVPS



Rapport d'examen
des normes de
durabilité du
photovoltaïque

Evolution des émissions au fil du temps



	UNITÉ	1996	2003	2007	2014	2016	2020	2021	2023
Émissions de gaz à effet de serre	g CO ₂ eq/Kwh	121	72	76	80	107	43	43	36
Efficacité du module	%	13.6	14.8	14.0	14.0	15.1	19.5	20.0	20.9
Rendement annuel	kWh/kWp	862	882	922	922	882	976	976	976

Calculé pour un système PV résidentiel sur le toit en Suisse utilisant la technologie de module monocristallin.

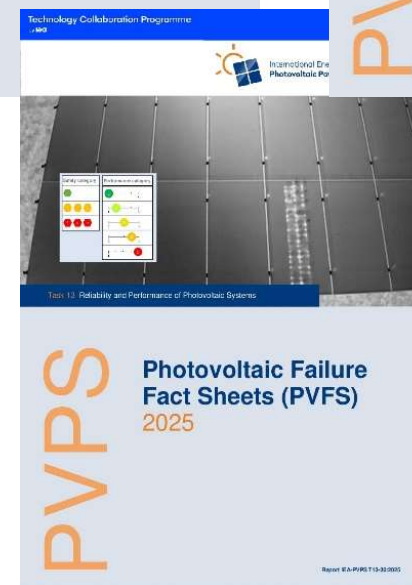
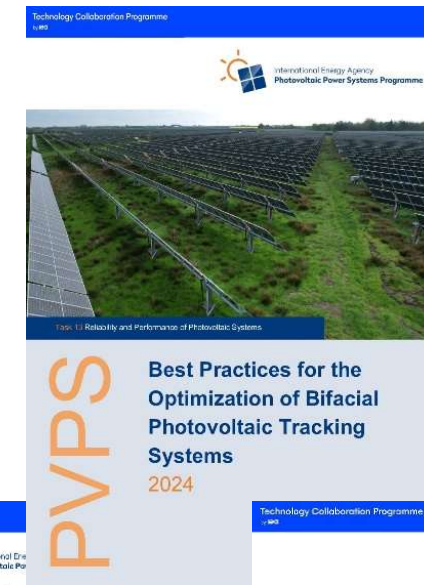
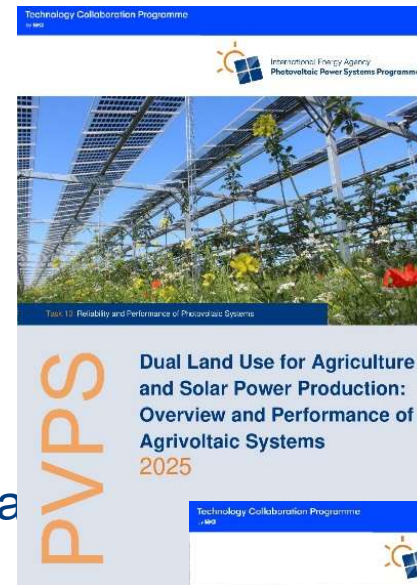
La réduction des émissions est due à l'augmentation de l'efficacité et aux améliorations du processus de fabrication .

Faits saillants récents – Tâche 13 (Fiabilité)



- Publications récentes sur
 - Agrivoltaïque
 - Suivi bifacial
 - Dégradation et défaillance
 - KPI économiques/techniques
 - Optimiseurs de puissance (ombrage)
- Bientôt disponible sur
 - Centrales photovoltaïques flottantes
 - PV et stockage
 - Impacts des phénomènes météorologiques extrêmes
 - Optimisation spécifique au climat

PVPS

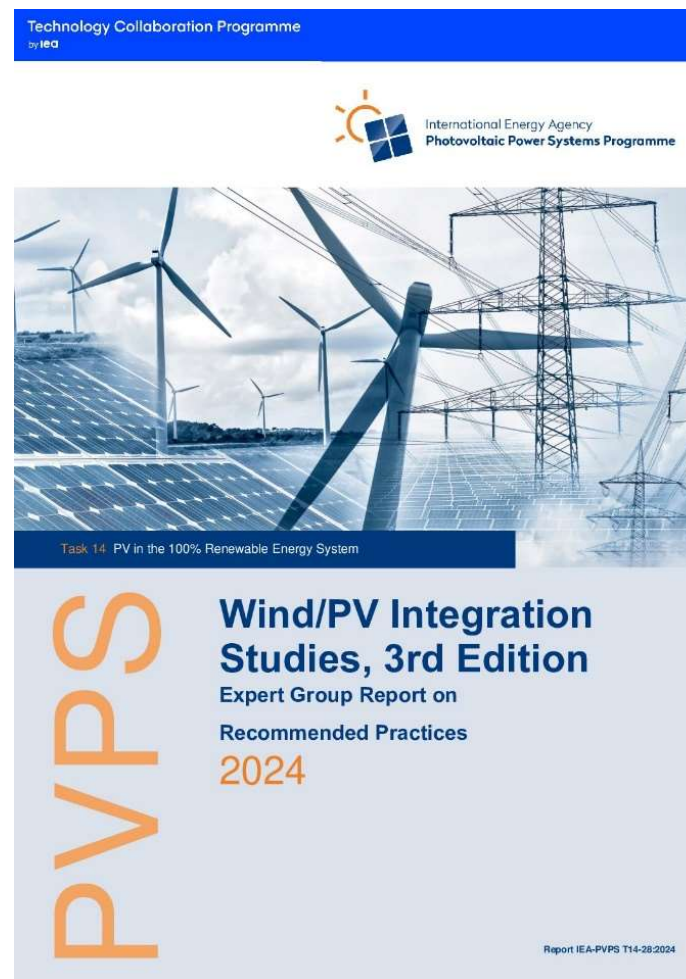


Faits marquants récents – Tâche 14 (Intégration au réseau)



- Rapport conjoint avec l'**AIE Wind**
- Document de référence complet d'environ 200 pages
- Dernier rapport de la tâche 14 !
→ **Les travaux d'intégration PV se poursuivront dans la nouvelle tâche 19**

PVPS

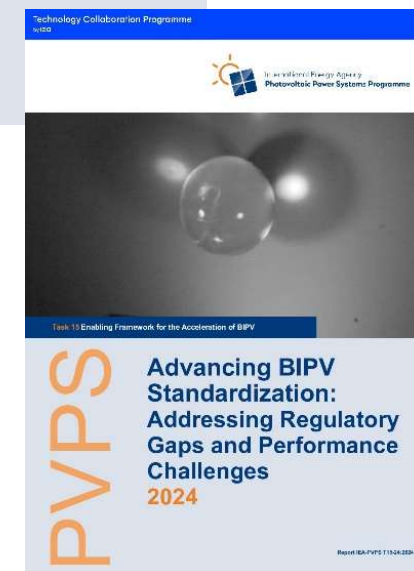
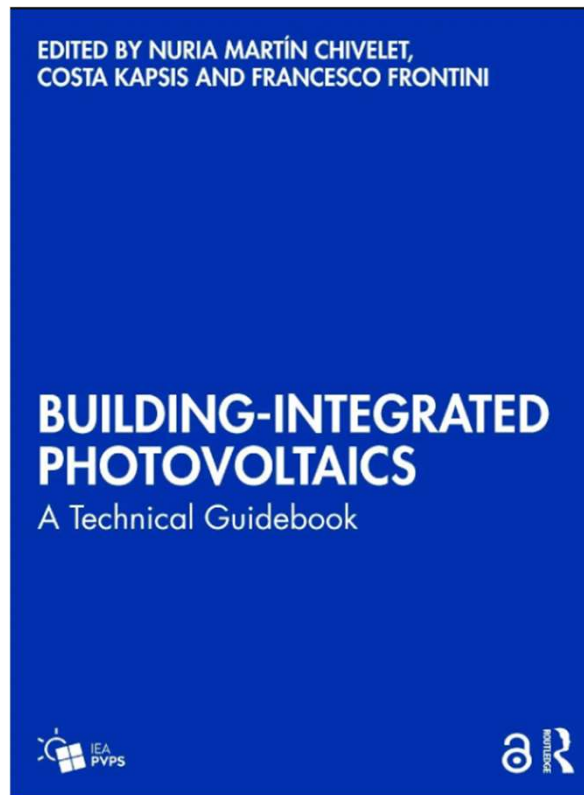


Faits marquants récents – Tâche 15 (BIPV)



- guide **BIPV** en libre accès ,
destiné *aux architectes*
- Analyse TIS du BIPV dans différents pays
- Faire progresser la normalisation du BIPV
- Nouveau plan de travail qui vient de commencer (3ème phase)

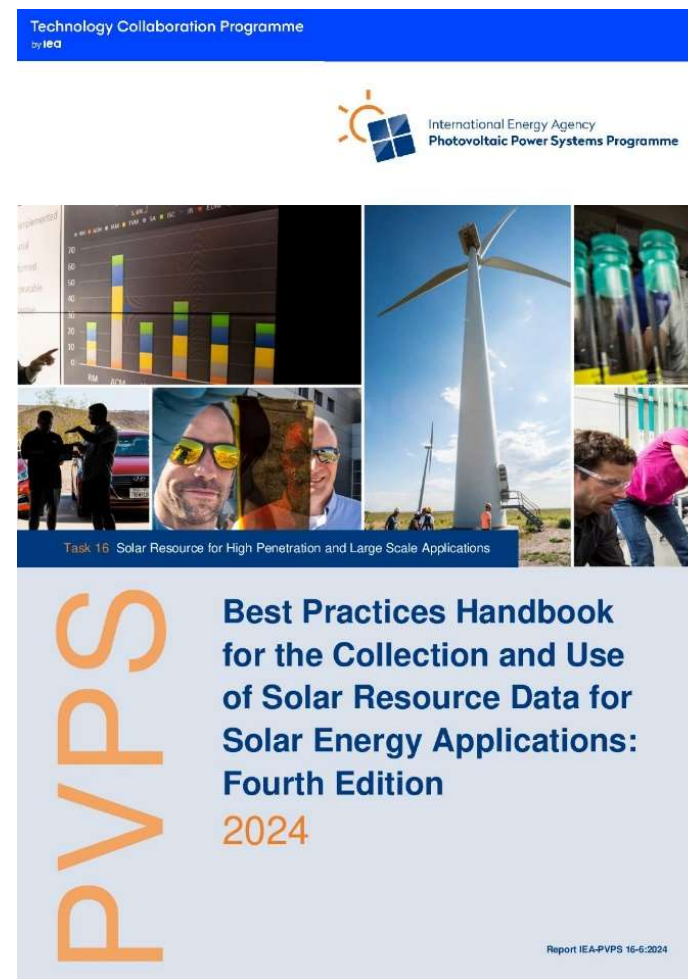
PVPS



Faits marquants récents – Tâche 16 (Ressource solaire)



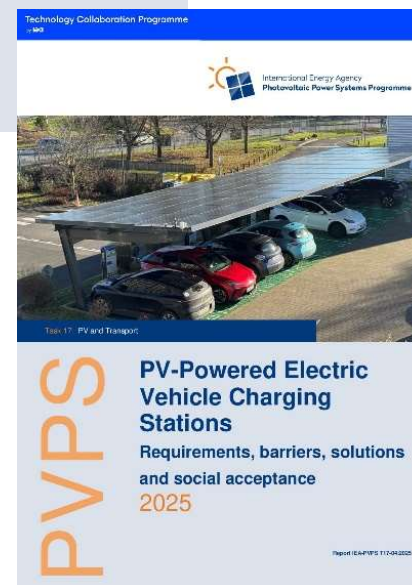
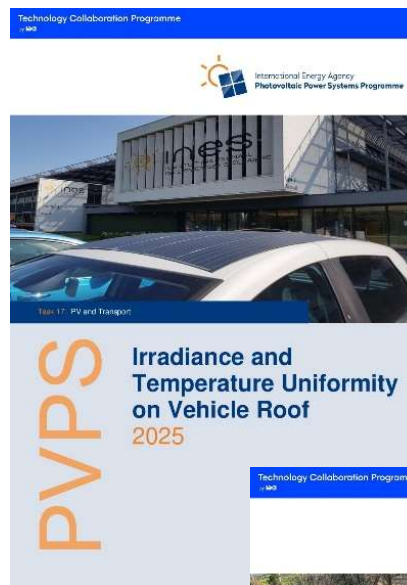
- Mise à jour 2024 du **Manuel des ressources solaires**
- Document de référence technique important
- 500 pages!
- Publication conjointe avec le NREL



Faits saillants récents – Tâche 17 (Transport)



- Aspects d'uniformité du toit du véhicule
- Bornes de recharge pour véhicules photovoltaïques
 - Exigences, barrières, solutions, acceptation sociale



+ à venir
très bientôt :

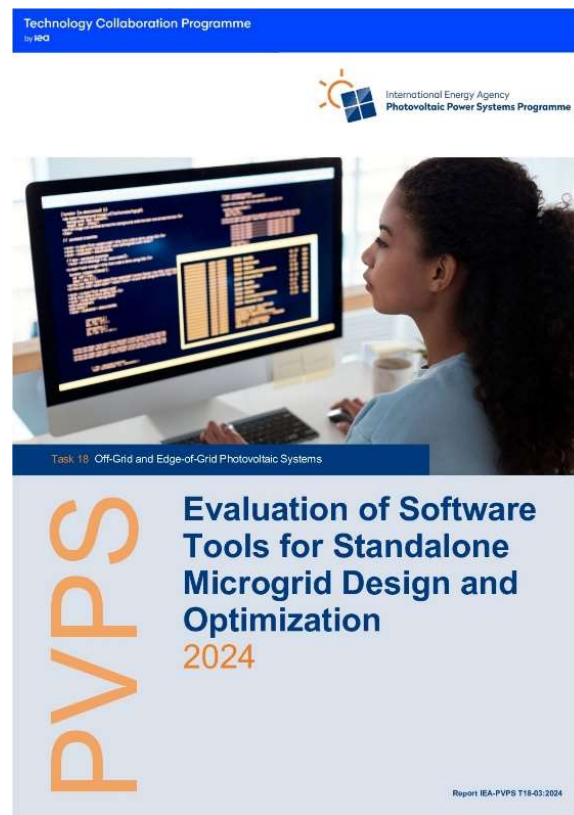
Introduction
possible du
VIPV sur le
marché

Technologie des
véhicules de
tourisme
alimentés par
l'énergie
photovoltaïque

Faits marquants récents – Tâche 18 (Hors réseau)



- Outils logiciels pour la conception de micro-réseaux autonomes
 - Évaluation et comparaison des outils



+ à venir
très bientôt :

Batteries
lithium-ion hors
réseau

Numérisation
dans les
systèmes hors
réseau

Conclusion



- La technologie photovoltaïque est un formidable outil de la Transition énergétique mondiale et française
- Ses potentiels de développement sont encore très grands
- Mais il existe de multiples challenges à relever à la fois au niveau de sa géopolitique mais aussi dans la stratégie de sa valorisation au sein des réseaux électriques
- Le monde de la recherche et de l'ingénierie aura de grandes opportunités pour travailler sur les flexibilités, les stockages et les productions de molécules vertes..

www.iea-pvps.org

Merci !

Daniel Mugnier,
daniel.mugnier@iea-pvps.org



Daniel Mugnier,
daniel.mugnier@planair.fr

