

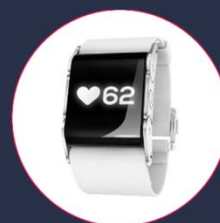
Progrès dans les technologies solaires silicium et pérovskites/silicium

Laurie-Lou Senaud, Antoine Descoeur, Jonas Geissbühler, Gabriel Christmann, Nicolas Badel, Patrick Wyss, Jun Zhao, Christophe Allebé, Antonin Faes, Jonathan Champiaud, Loann Baume, Gizem Nogay, Agata Lachowicz, Adriana Paracchino, Marion Dussouillez, Soo-Jin Moon, Arnaud Walter, Brett Kamino, Florent Sahli, Xin Yu Chin, Matthieu Despeisse, Quentin Jeangros, Bertrand Paviet-Salomon, Christophe Ballif

20e Congrès photovoltaïque national – 29-30 mars 2022 – Bern

Présentation du CSEM

- CSEM – notre **mission**:



2

- **Développement** et **transfert** de technologies de renommée mondiale au secteur industriel - en Suisse, en priorité - afin de renforcer son **avantage concurrentiel**
 - o Accords de coopération avec des **entreprises établies**
 - o Encourager la création de **start-ups**

Sustainable energy

The central circular diagram is titled "Sustainable Energy" and features a central leaf icon with a lightning bolt. It is divided into four quadrants: "Energy Harvesting" (top), "Energy Storage" (right), "PV & Solar Buildings" (bottom), and "Digital Energy" (left). The entire slide is branded with the CSEM logo in the bottom left corner.

3

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Développement des technologies photovoltaïques

Plateforme sustainable energy pour les technologies PV:

- **Soutenir le déploiement à l'échelle TW** de l'énergie photovoltaïque, principalement en Europe, en développant des **technologies avancées et innovantes** pour surpasser les produits PV actuels en termes de:
 - o Efficacité
 - o Coûts de production
 - o Fiabilité
 - o Esthétique
 - o Durabilité

The collage includes: "Plating de cuivre" showing a copper surface being treated; a "SOLAR MODULE" with a green checkmark; a cross-section diagram of a tandem cell with layers labeled "Tandem c-Si/PK", "Ag", "LiF, CeO₂, SnO₂, ITO", "Couches d'interfaces a-Si:H(i)", "a-Si:H(i)", "a-Si:H(n)", and "TCO", with an efficiency label ">30%"; and "Building Integrated Photovoltaics" showing solar panels integrated into building facades.

4

→ Trouver les marchés de niche où la Suisse peut jouer un rôle

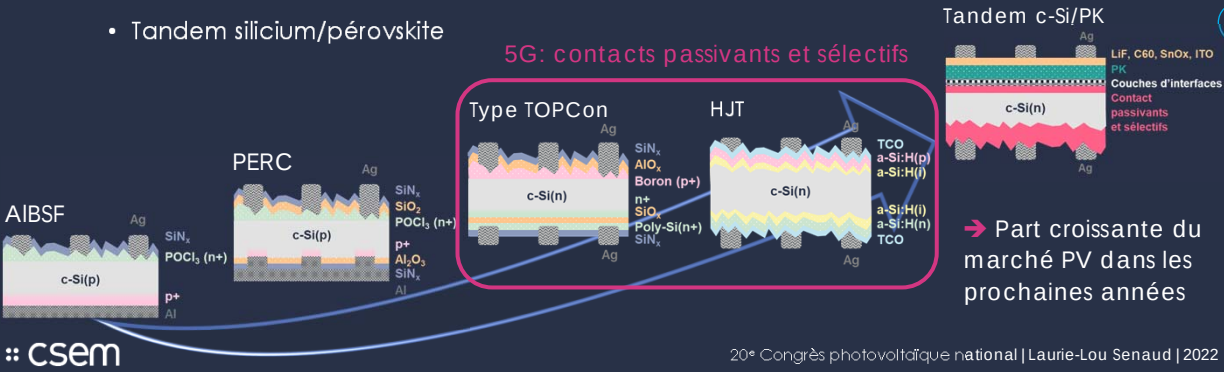
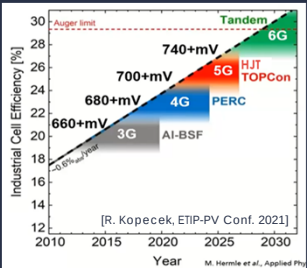
20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Technologies PV silicium et silicium/pérovskite

Contenu:

- Cellules solaires à base de silicium^[1]:
 - Technologie à hétérojonction de silicium (HJT)
 - Technologie de type TOPCon
- Cellules solaires à base de pérovskite (PK):
 - Tandem silicium/pérovskite

[1] C. Ballif et al., Nature Reviews Materials, 2022-03-07
DOI : 10.1038/s41578-022-00423-2.



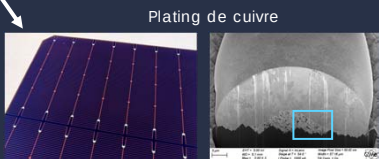
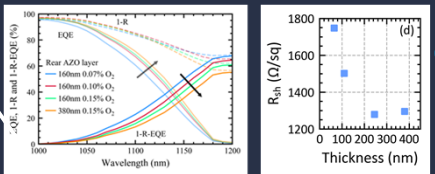
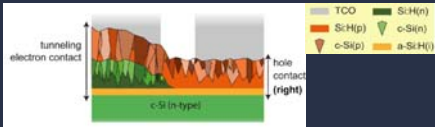
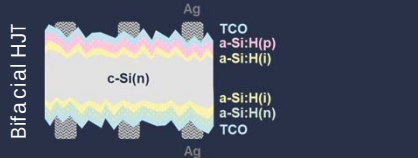
Cellules solaires HJT

- CSEM & EPFL pionniers dans le développement HJT
- Développement des matériaux:
 - Siliciums hydrogénés amorphes et multicristallins
 - TCOs faible absorption et haute conductivité
 - Métallisation haute conductivité et faible ombrage

→ Aujourd'hui la technologie HJT a démontré des rendements > 25 % sur des lignes pilotes



- Ligne de production à grande échelle en Europe (Allemagne) → production actuelle jusqu'à 1.4 GW



:: Csem

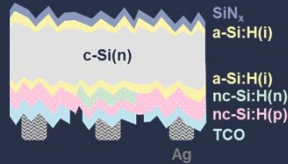
20e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Cellules solaires HJT IBC

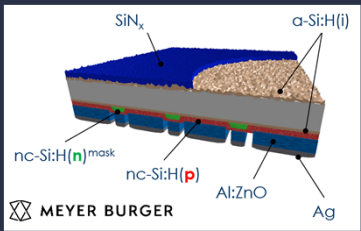
- Contact en face arrière (IBC): solution pour aller plus haut en **efficacité** et améliorer l'**esthétique**
- Solution IBC commercialisée par **SUNPOWER®** avec la technologie de type TOPCon → procédés complexes
- CSEM & EPFL ont **inventé** et **breveté** une approche d'intégration **intelligente** et **simple** des contacts HJT dans les dispositifs IBC appelé «**tunnel IBC**»^{[1][2]}
- Développements actuels avec **MEYER BURGER**
→ Cellules solaires sans argent ni indium

[1] A. Tomasi, Nature Energy 2, 2017
[2] B. Paviet-Salomon, Solar Energy 175, 2018
[3] D. Lachenal, Solar Energy Materials & Solar Cells 200, 2019

HJT tunnel IBC



Potentiel d'efficacité > 26 % en seulement 9 étapes de fabrication^[3]



:: CSEM EPFL

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

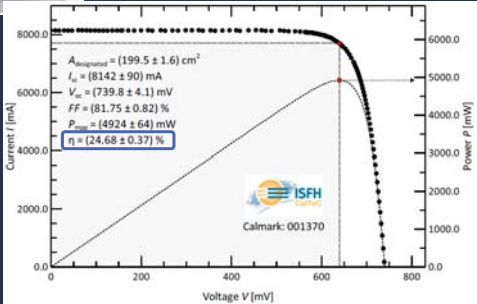
Cellules solaires HJT tunnel IBC – module

- Cellule IBC laminée avec **HJT tunnel-IBC** + **SmartWires®**:



Cellule IBC laminée = mini-module

Efficacité certifiée de 24.7 % en mini-module
→ Parmi les records mondiaux^[1]



:: CSEM

- Première Mondiale: module **60 cellules HJT tunnel IBC** avec glass/backsheet:



- ✓ Preuve de concept validée
- ✓ Esthétique

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Cellules solaires type TOPCon

- Technologie de type TOPCon:
Mise à niveau des lignes de production PERC
→ utilisation de systèmes déjà en place
- Défis: étape de déposition du poly-Si(n) pas encore clairement maîtrisée et implémentable
→ Différenciateur clé au CSEM: dépôt par PVD

Réalisation récente:

- Cellule solaire type TOPCON certifiée à 22,8 % d'efficacité avec un procédé PVD dopé ex-situ

Efficacité (%)	Aire (cm ²)	J _{SC} (mA/cm ²)	V _{OC} (mV)	FF (%)	P _{MPP} (mW)
22.82	244.36	40.64	697.34	80.53	5577



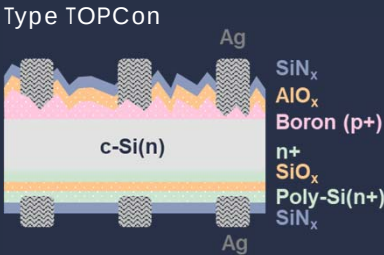
:: CSEM

These activities are supported by SFOE in the frame of the projects "DELAPS" (2021-2023E) and "IPRECISE" (2021-2024E)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

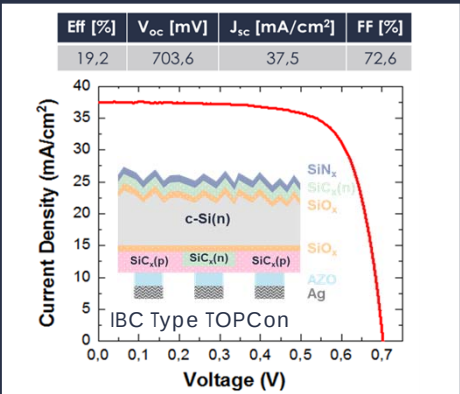
Swiss Federal Office of Energy SFOE



- ✓ Potentiel pour > 25 % sur taille industrielle à bas coûts (dopage in-situ PVD CSEM)
- ✓ Brevet clé acquis par le CSEM

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Cellules solaires tunnel IBC type TOPCon



- Intégration de la technologie TOPCon en configuration tunnel IBC ultra simplifiée
- Cellule solaire avec 19,2 % d'efficacité démontrée
 - ✓ Preuve de concept de cellules solaires avec dépôts PECVD et métallisation à basse température
 - ✓ Compatible avec les traitements à haute température

- Grand intérêt actuel pour cette technologie: plusieurs entités (CSEM, ISFH, ISC, Megasol, ...) font des développements

→ Développement d'un procédé de déposition uniquement par PVD

:: CSEM EPFL

These activities are supported by SNSF in the frame of the project "SHAMAN" (2020-2023E)



FNRS
SWISS NATIONAL SCIENCE FOUNDATION

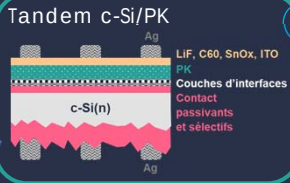
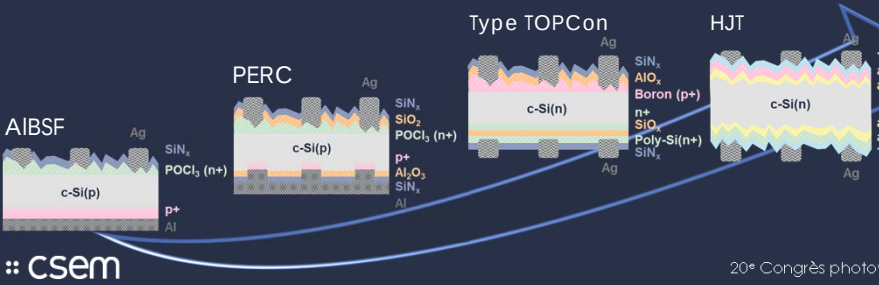
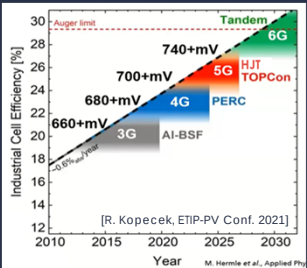
20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Technologies PV silicium et silicium/pérovskite

Contenu:

- Cellules solaires à base de silicium^[1]:
 - Technologie à hétérojonction de silicium (HJT)
 - Technologie de type TOPCon
- Cellules solaires à base de pérovskite (PK):
 - Tandem silicium/pérovskite

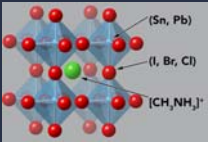
[1] C. Ballif et al., Nature Reviews Materials, 2022-03-07
DOI : 10.1038/s41578-022-00423-2.



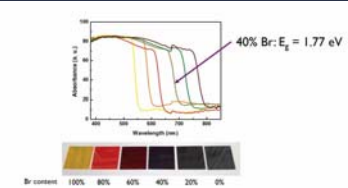
→ Futures technologies pour dépasser les 30 % d'efficacité cellule

Cellules solaires tandem silicium/pérovskite

- Pérovskite (PK) = composé hybride organique-inorganique
- Absorption de la lumière **largement ajustable**
- Candidat idéal pour un dispositif tandem:
 - Répartition spectrale de l'absorption de la lumière
 - Déposition à **basse température** → compatibilité avec les procédés des cellules solaires à base de silicium
- Tandem c-Si/PK: 2-terminaux et 3-terminaux

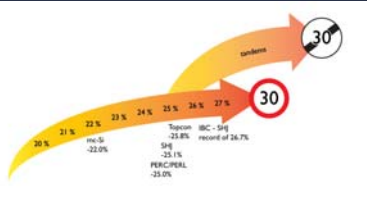
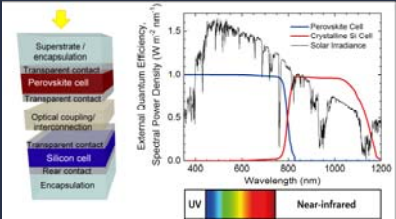
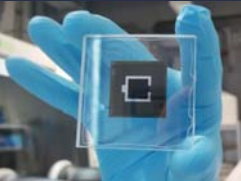


<https://aastech.com/science/2016/01/layered-perovskite-on-silicon-could-boost-pv-efficiencies-to-30-percent/>



<https://www.solarpowerworldonline.com/2015/04/the-perfect-marriage-silicon-and-perovskite-solar-cells/>

Tandem 2-terminaux



csem EPFL

Cellules solaires tandem silicium/pérovskite

- Tandem 2-terminaux:

LiF, C60, SnOx, ITO
PK
Couches d'interfaces
Contact passivants et sélectifs
c-Si(n)

Sur c-Si plat 4 cm²

Efficacité: 28.2%

Sur c-Si texturé 4 cm²

Efficacité: 26%

Sur c-Si plat 100 cm²

Efficacité: 22.3%

[1] Présentation orale à la Silicon PV, Konstanz, Germany, 28-30 mars 2022

13

★ ★ ★

Développements continus:

- Optimisation des matériaux PK et des couches d'interfaces
- Méthodes de dépôt de PK sur **silicium texturé** et sur **grande surface**

→ Objectifs: dépôts sur des tailles industrielles de wafers c-Si et texturés

11 CSEM EPFL

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Cellules solaires tandem silicium/pérovskite

- Tandem 3-terminaux:

LiF, C60, SnOx, ITO
PK
Couches d'interfaces
a-Si:H(i)
nc-Si:H(n)
nc-Si:H(p)
TCO

Objectif: **S'affranchir** de la dépendance spectrale et **augmenter le rendement annuel** (+10% estimé vs 2-terminaux)

Développements:

- Optimisation des **couches d'interfaces** et de la **compatibilité** des couches **HJT** et **PK**
- Connexions et circuits électriques adaptés pour **extraire la puissance maximale**

→ Optimisations ardues hardwares et softwares

14

★ ★ ★

Meilleur résultat au niveau mondial dans ce domaine

These activities are supported by Innosuisse in the frame of the project "AdAstra" (2021-2023)

Innosuisse - Swiss Innovation Agency

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Résultats récents:

Tandem 3-terminaux c-Si/PK avec **24.6 % d'efficacité** sur 25 cm²

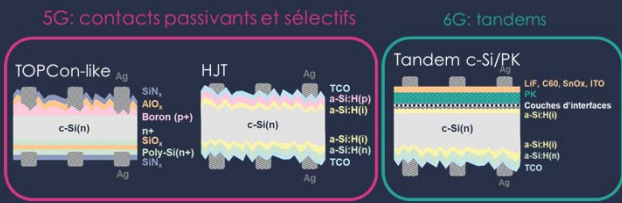
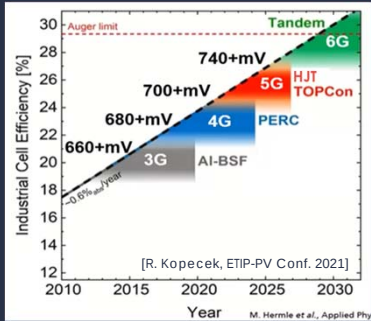
Eff (%)	V _{oc} (mV)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)
24.6	1828	18.1	72.94

Aire: 25 cm²

11 CSEM

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Perspectives et conclusion



:: csem

Missions et accomplissements du CSEM:

- Développements technologiques en **avance de phase** sur la 3G, 4G et 5G et **aujourd'hui sur la 6G**
- Transfert des technologies 3G, 4G et 5G à l'industrie
- **Optimisation de nouvelles solutions plus performantes pour la 5G** → transferts industriels
- **Résultats records** sur les technologies **6G** et développements de **méthodes industrielles**

- Tunnel IBC HJT
- Dépôt PVD pour type TOPCon

- 2-termiaux de **100 cm²** et dépôt sur c-Si **texturé**
- 3-termiaux avec efficacité de **24.6%**

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022

Merci pour votre attention!



Partenaires:



- Laurie-Lou Senaud
- lls@csem.ch
- +41 32 720 5129



:: csem

20^e Congrès photovoltaïque national | Laurie-Lou Senaud | 2022