



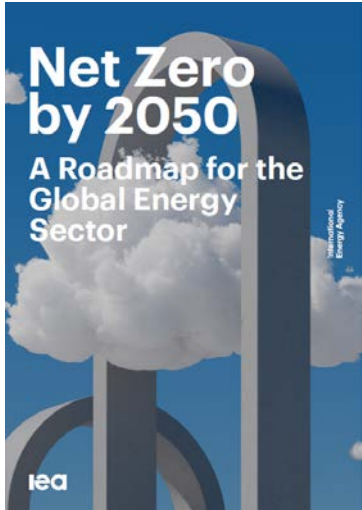
# Hydrogène solaire : avancées technologiques et défis scientifiques

**V. Artero**

*Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux,  
Université Grenoble Alpes, CNRS, CEA Grenoble*  
[www.solhycat.com](http://www.solhycat.com)

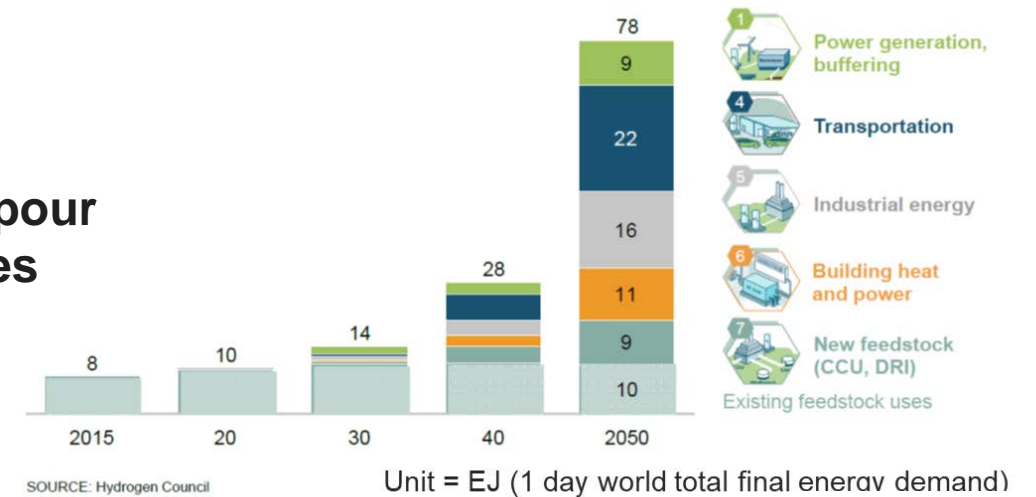


# Pourquoi de l'hydrogène solaire?



## Transition Net Zero Emission en 2050

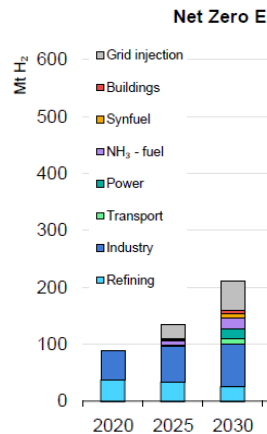
1. Sobriété
2. Electrification massive
3. Développement de l'hydrogène vert pour couvrir 20% des besoins énergétiques mondiaux



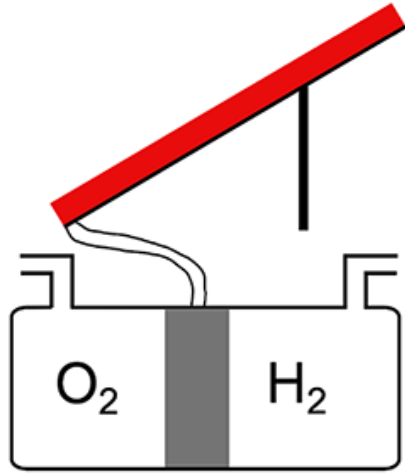
Fortes contraintes sur le réseau électrique qui va devoir s'adapter à un trafic de 2 à 4 fois plus important et à des sources de production d'électricité renouvelables non pilotables



La production d'hydrogène est une solution pour le stockage massif des énergies renouvelable, et notamment de l'énergie solaire, de manière , additionnelle et décentralisée sans impacter le réseau



# Aujourd'hui : des fermes d'hydrogène solaire



PV/electrolyser  
(PV+E)

**TRL 9**

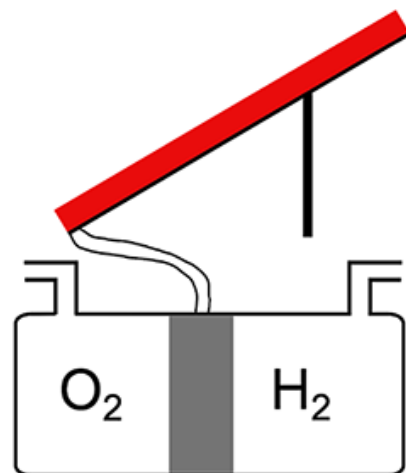
Panneaux photovoltaïques captifs  
(pas de frais d'utilisation du réseau)  
Électrolyseurs alcalins  
(gestion de l'intermittence complexe)

9,5 GW d'énergie solaire et 7,4 GW d'électrolyseurs d'ici 2030

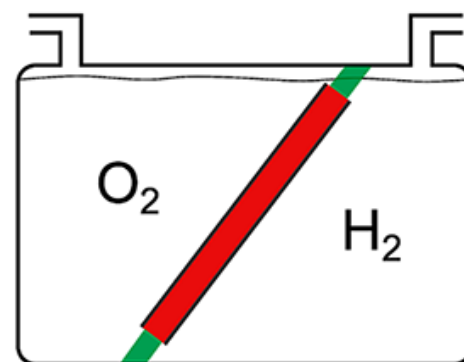
**Coûts d'investissement et de maintenance élevés** qui restreignent cette solution aux vallées de l'hydrogène



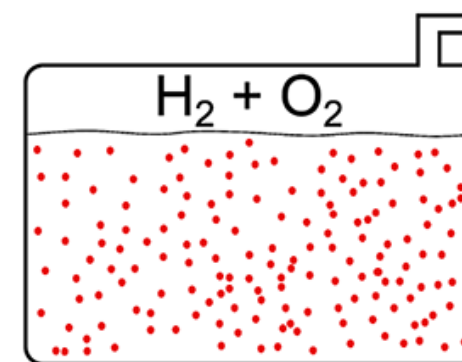
# Un grand choix de technologies, plus ou moins matures



PV/electrolyseur  
(PV+E)



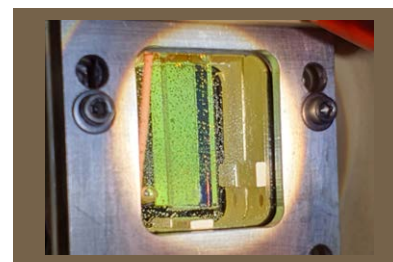
cellules PV+E (IPEC) et  
PEC



Photocatalyseurs et organismes  
photosynthétiques



Crédit: A. Aubert/CEA



TRL 4-6

TRL 2-3

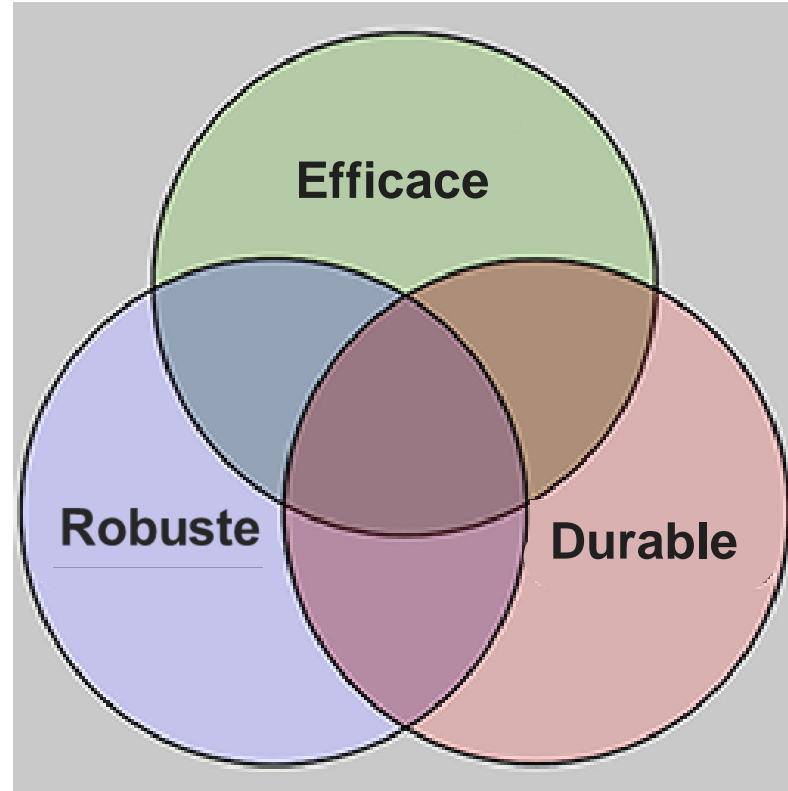
# Efficacité, robustesse et durabilité



5-10 % de rendement de conversion STH pour une rentabilité économique

L'efficacité conditionne l'empreinte au sol

10-20 ans de fonctionnement en conditions ambiante et intermittente



EROI >10

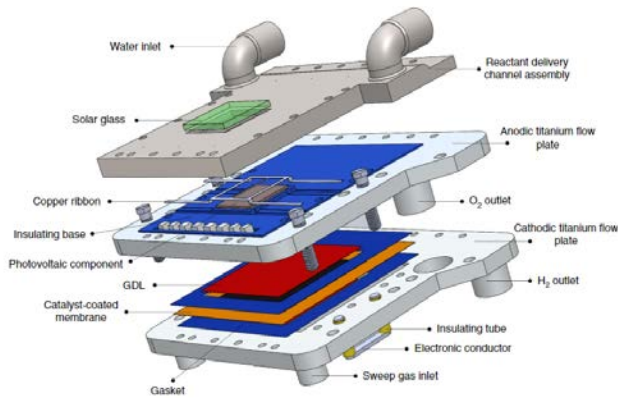
Limiter le recours aux métaux critiques pour un déploiement à grande échelle

- Développement de nouveaux matériaux
- Développement de prototypes à l'échelle

# Prototypes IPEC intégrés

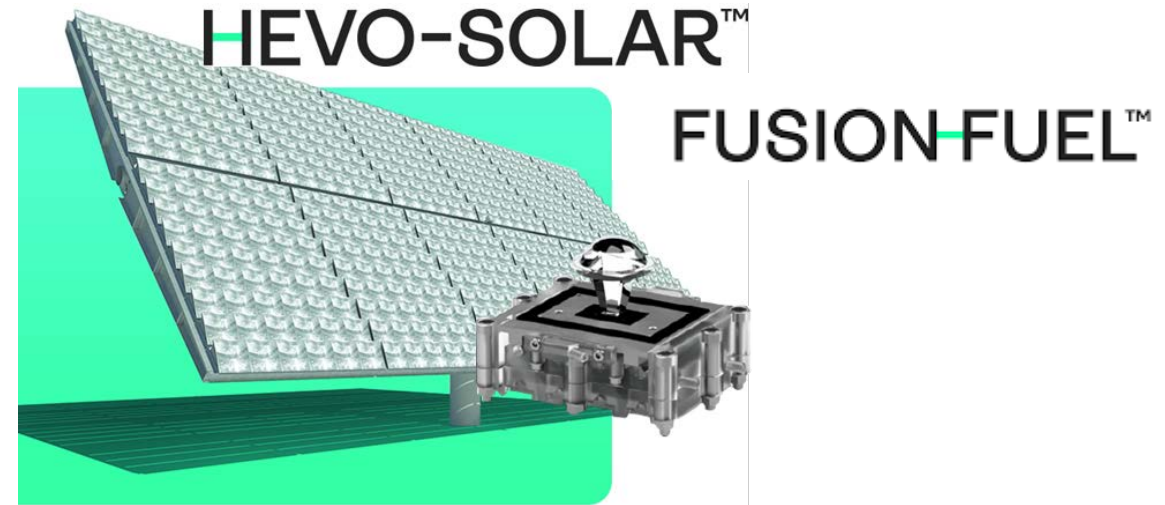


S. Haussener



17% rendement STH

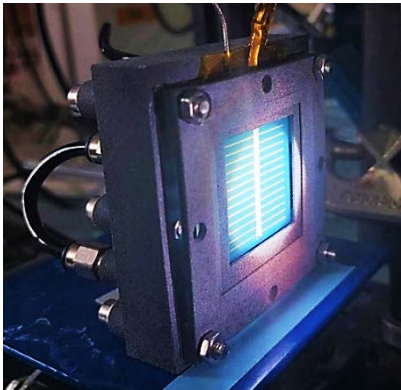
**Cellule solaire III-V sous concentration**  
**Electrolyseur PEM**



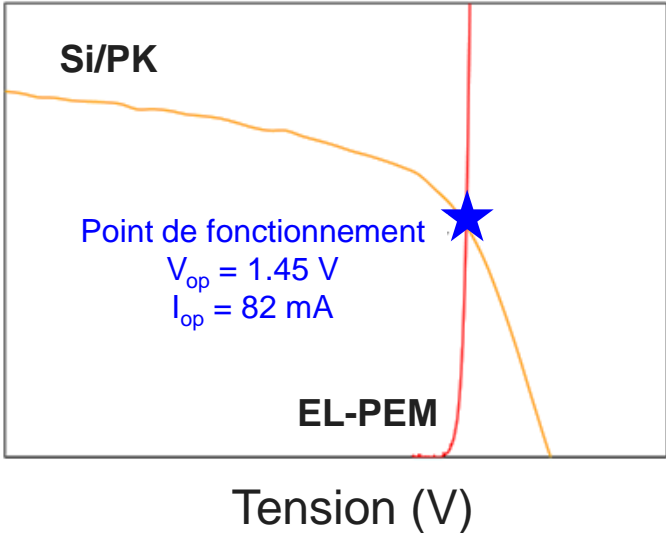
**Cellule solaire III-V sous concentration**  
**Electrolyseur PEM**



# Prototypes IPEC intégrés

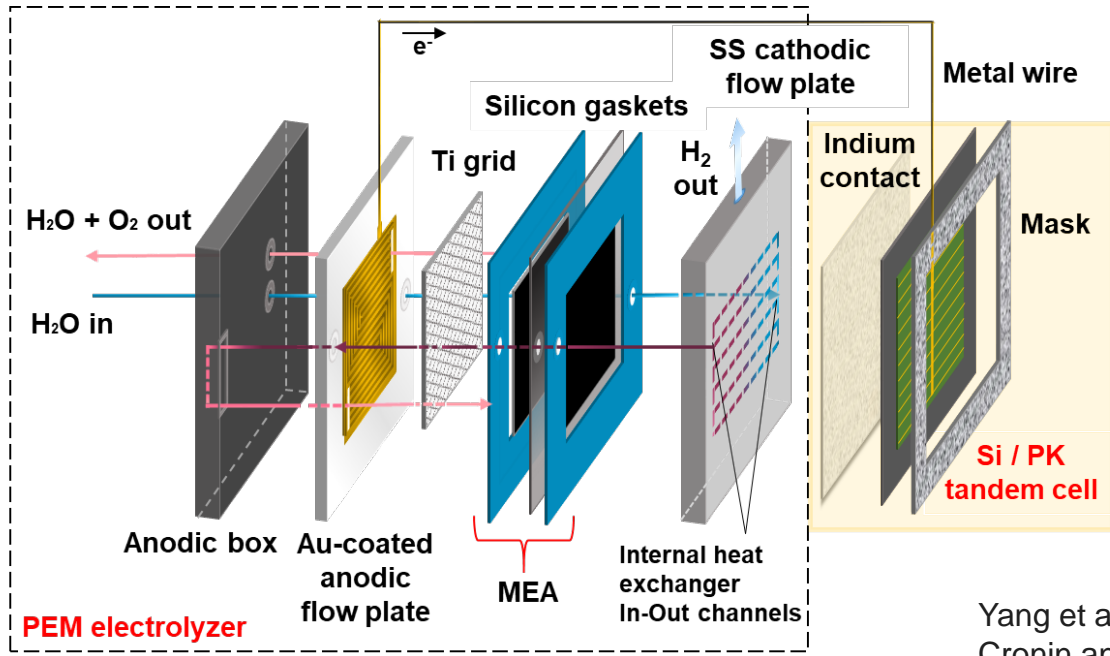


Cellules solaires tandem Si/PK tandem de haute efficacité  
9 cm<sup>2</sup> de surface active

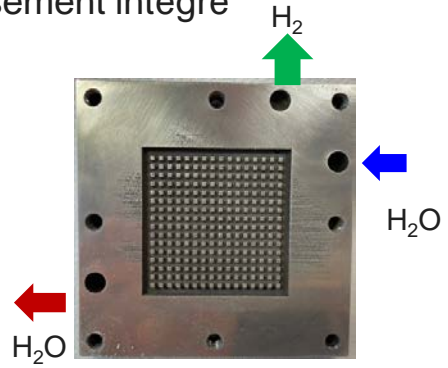


A. Maragno

**STH ~10 % en conditions simulée (1 sun)**



Fabrication additive de la plaque de flux cathodique en acier avec circuit de refroidissement intégré



Crédit M. Pellat (CEA)

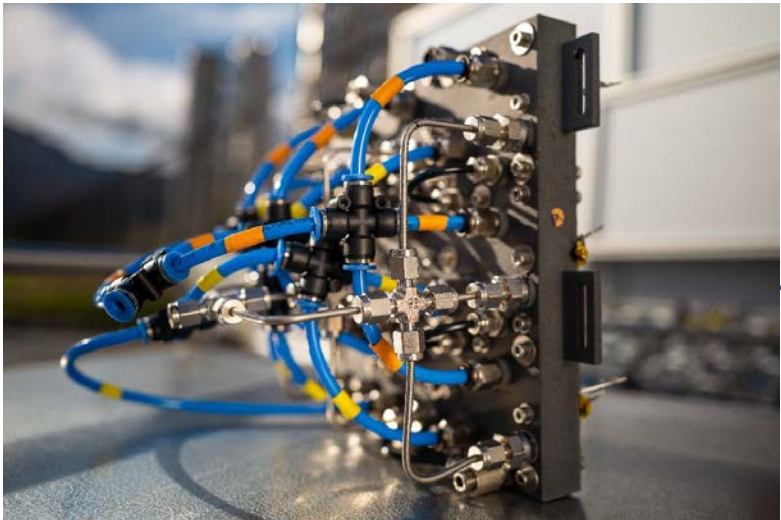


Yang et al. *Applied Energy* 2018, 215, 202  
Cronin and coll. *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7,3026

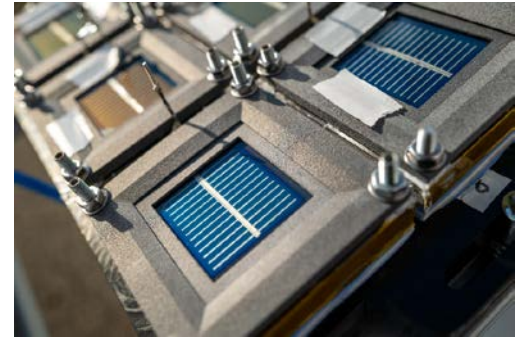
Maragno et al. *manuscript in preparation*



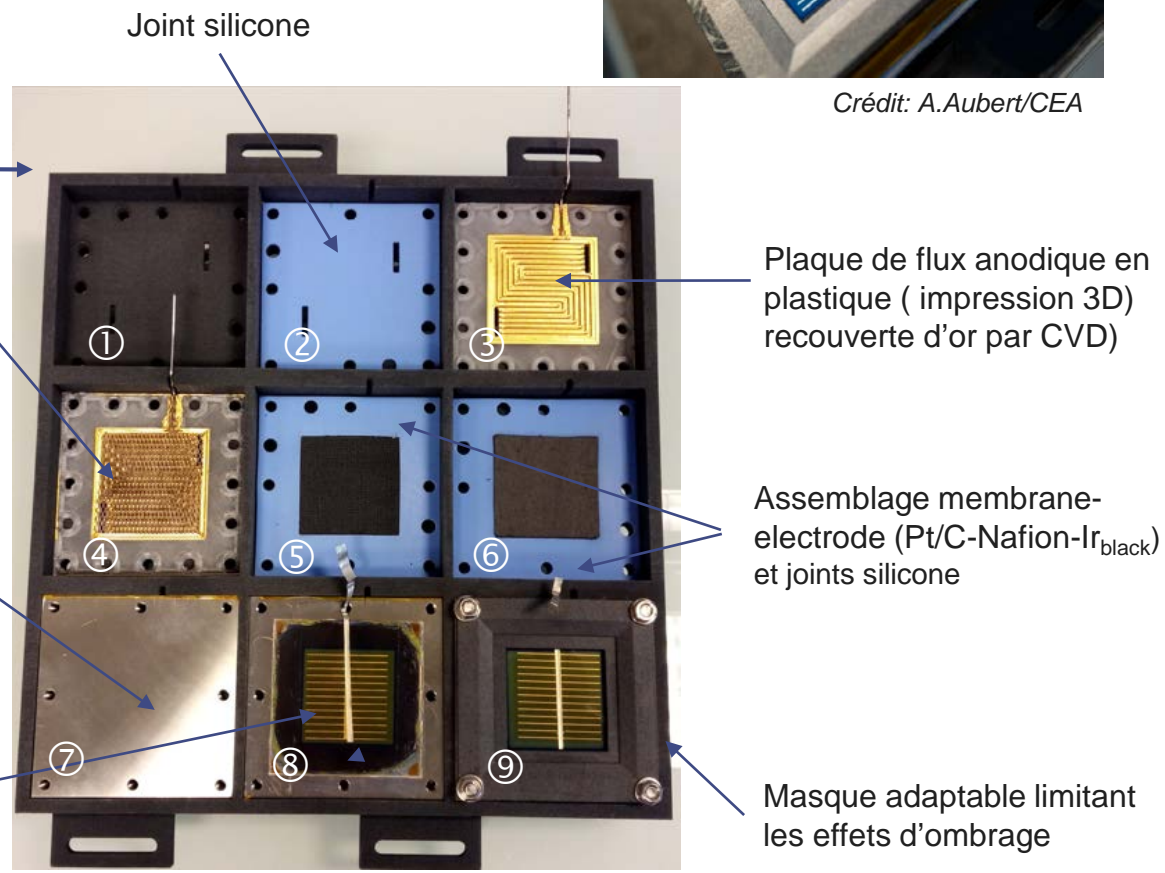
# Préparation de modules de 9 cellules IPEC



Crédit: A. Aubert/CEA



Crédit: A. Aubert/CEA



Crédit: A. Morozan (CNRS)

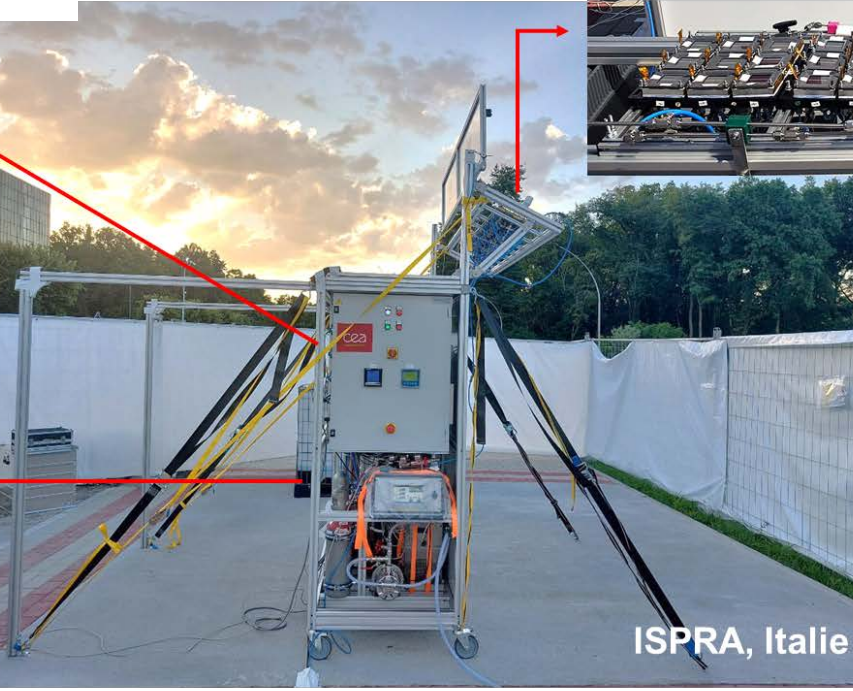
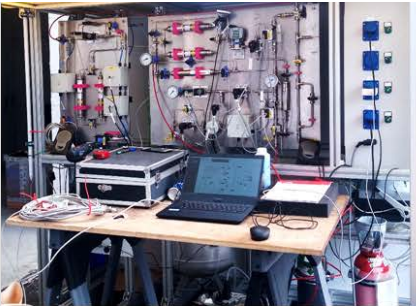
STH = 7.4 % sur 72 h de test continu en extérieur avec 45 cellules IPEC ( ~400 cm<sup>2</sup> )



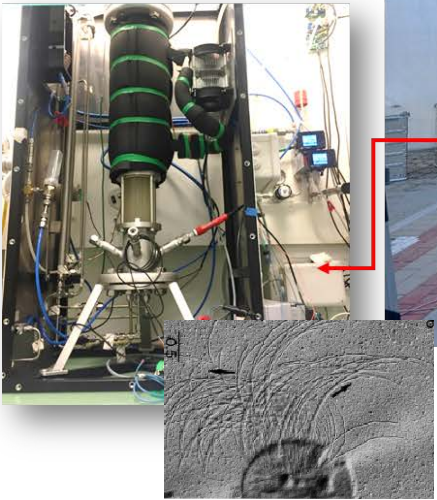
# EASI Fuel European Autonomous Solar Integrated fuel station



Panneau de contrôle



Modules IPEC

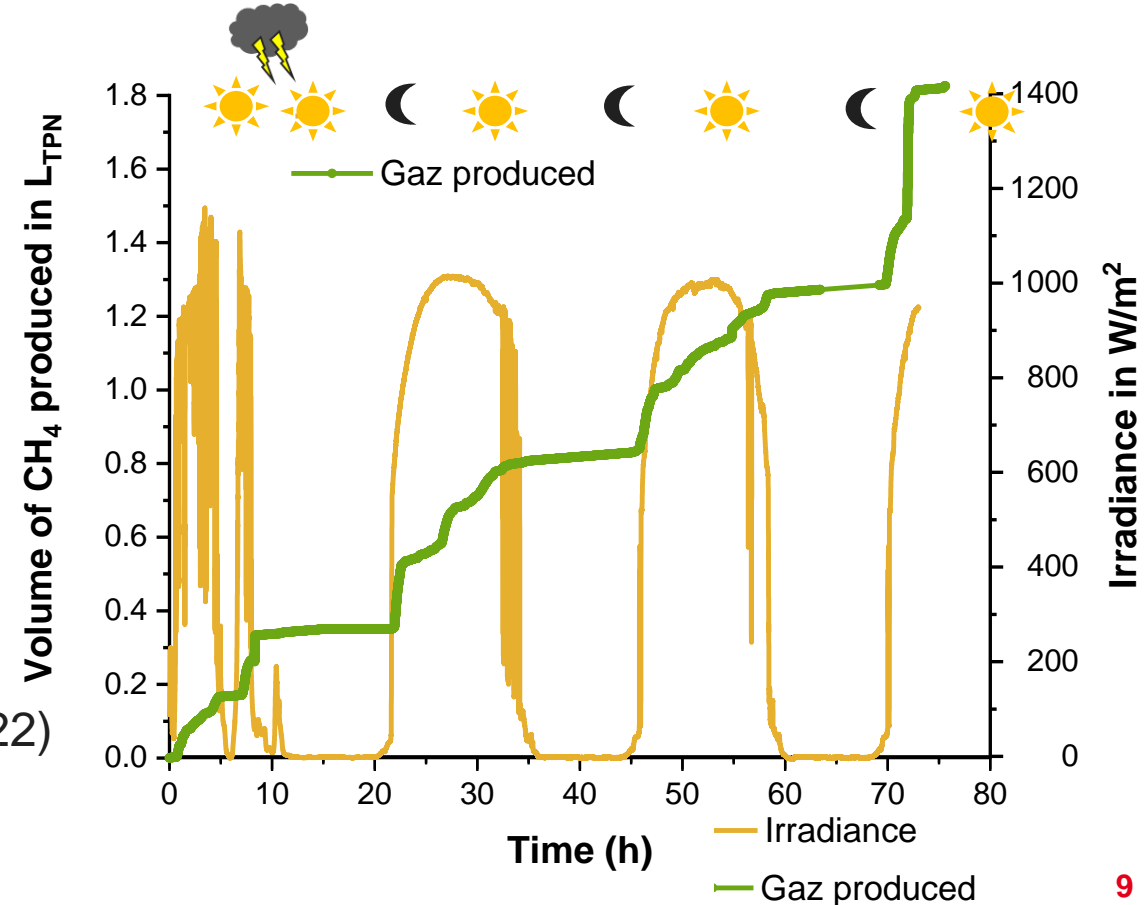


Bioréacteur frugal de méthanation

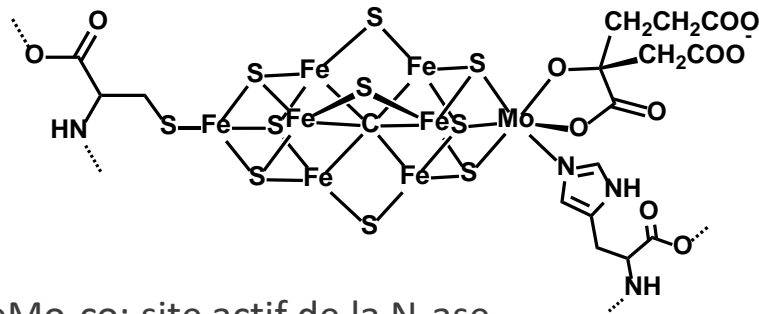
ISPRA, Italie

Crédit CEA

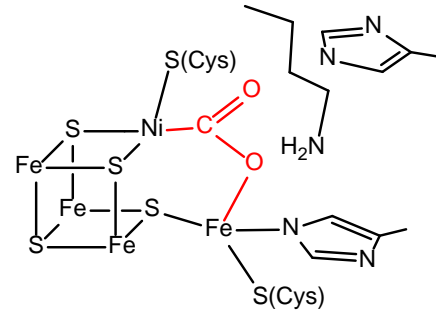
45 IPEC – 400 cm<sup>2</sup>  
72h de test en continu et en extérieur (ISPRA, Juillet 2022)  
1,8 L de méthane produit (>87%)  
Rendement global (STF) : ~5%



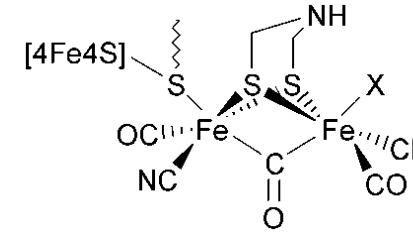
# Les sulfures métalliques pour s'affranchir des métaux nobles en électrocatalyse



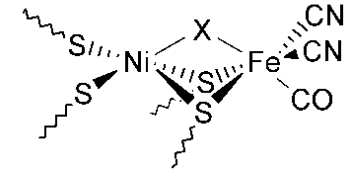
FeMo-co: site actif de la N<sub>2</sub>ase



Site actif de la CODH

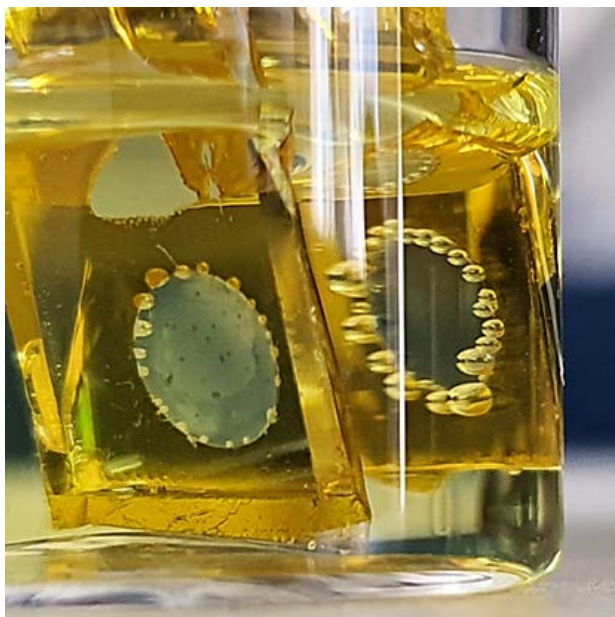


Sites actifs des H<sub>2</sub>ases

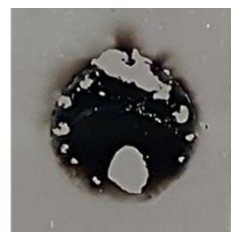
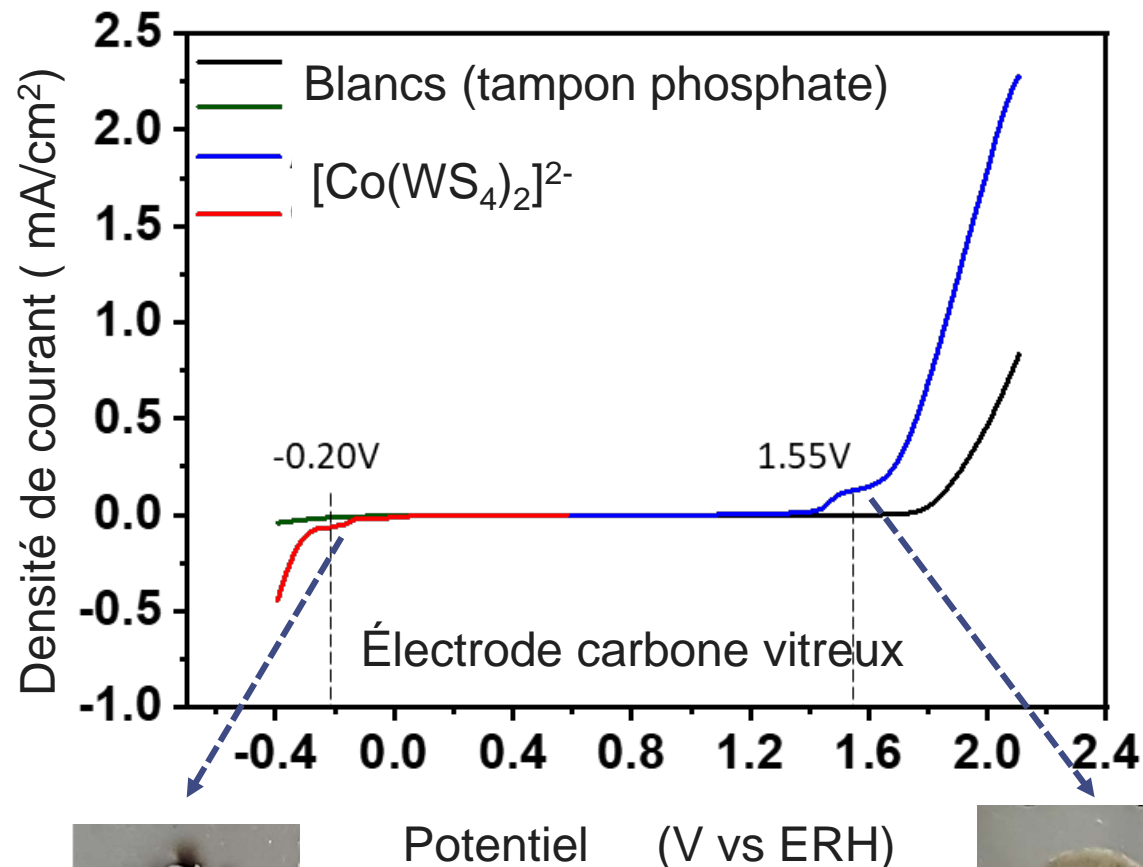


Enzyme	Reaction	Process	Application
Hydrogenase	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	Hydrogen evolution reaction Hydrogen oxidation reaction	Water electrolysis Hydrogen fuel cells
Cytochrome c oxidase or Laccase	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Oxygen reduction reaction	Fuel cells
Formate dehydrogenase	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{HCOOH}$	CO <sub>2</sub> reduction reaction	Co-electrolysis of water and CO <sub>2</sub>
Carbon monoxide dehydrogenase	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	CO <sub>2</sub> reduction reaction	Co-electrolysis of water and CO <sub>2</sub>
Water oxidase (Oxygen-evolving centre of photosystem II)	$2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$	Oxygen evolution reaction	Electrolysis
Nitrogenase	$\text{N}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{NH}_3$	Nitrogen fixation	Ammonia production

# Un seul précurseur pour le dépôt des deux catalyseurs de dégagement d'hydrogène et d'oxygène



**[Co(WS<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]<sup>2-</sup>**  
 Co(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O et (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>[WS<sub>4</sub>]  
 dans  
 0.1 M KPi (pH 7)

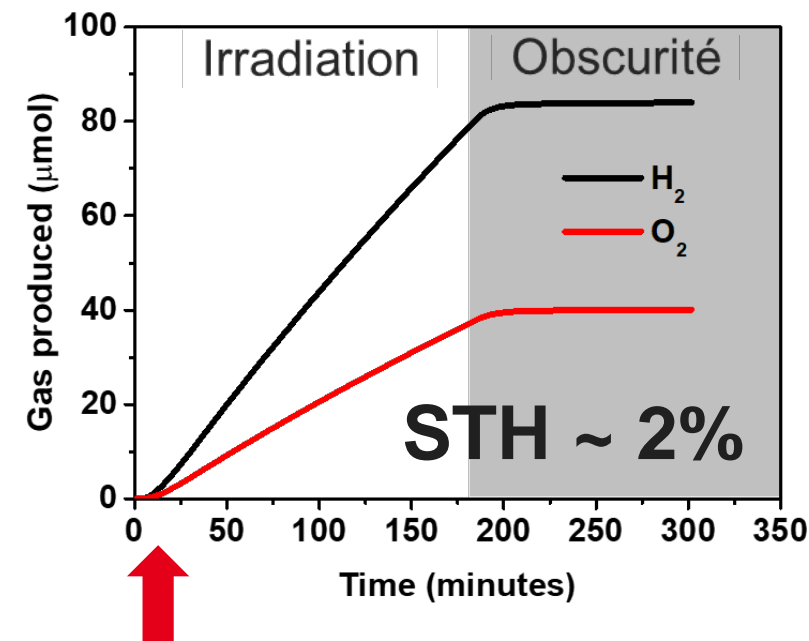
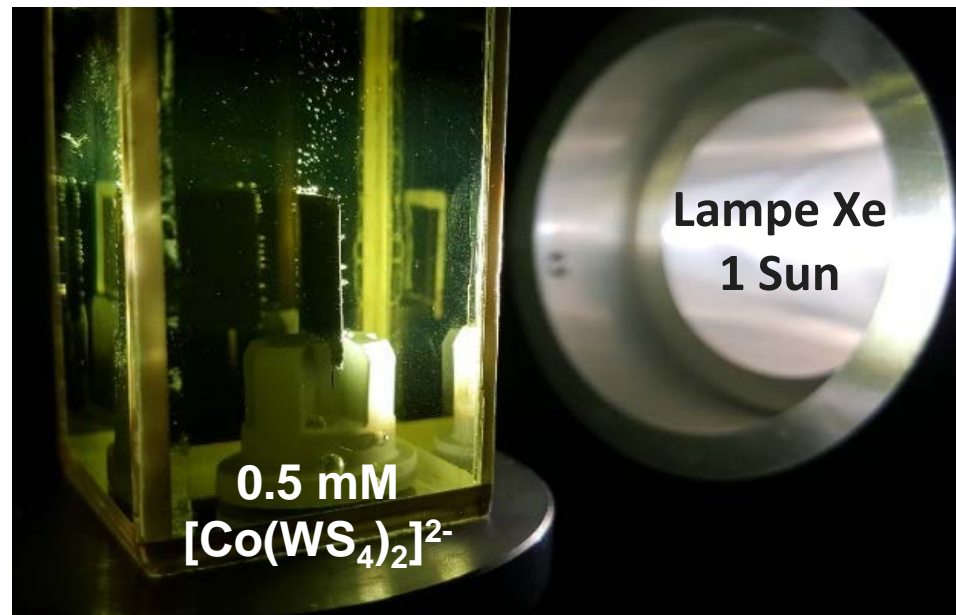
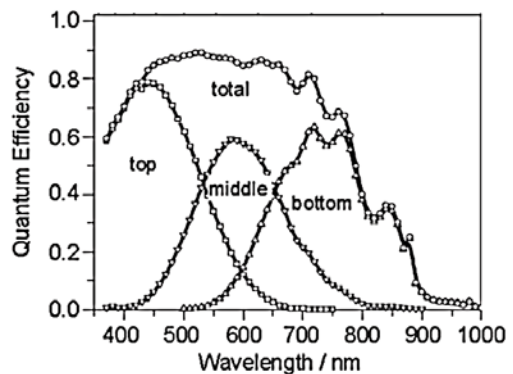
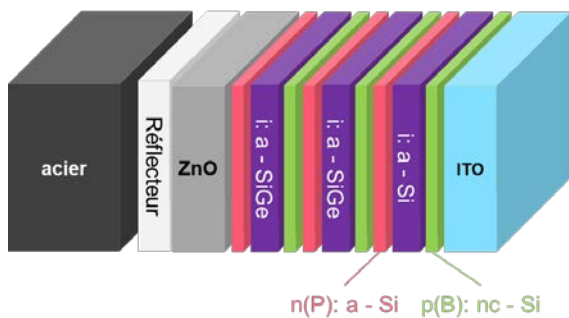


Formation du catalyseur  
 de dégagement d'H<sub>2</sub>:  
 CoWS<sub>x</sub>

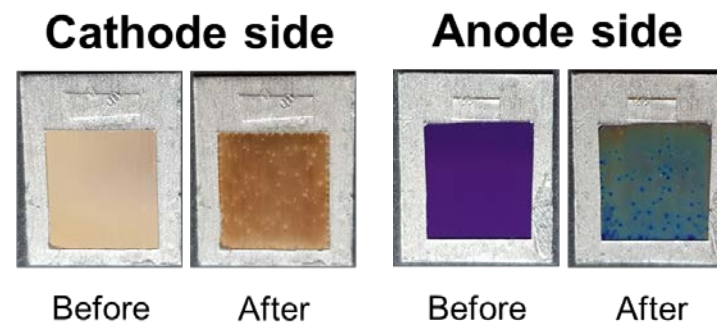


Formation du catalyseur  
 de dégagement d'O<sub>2</sub>: **11**  
 CoWO

# Des feuilles artificielles très simples à fabriquer

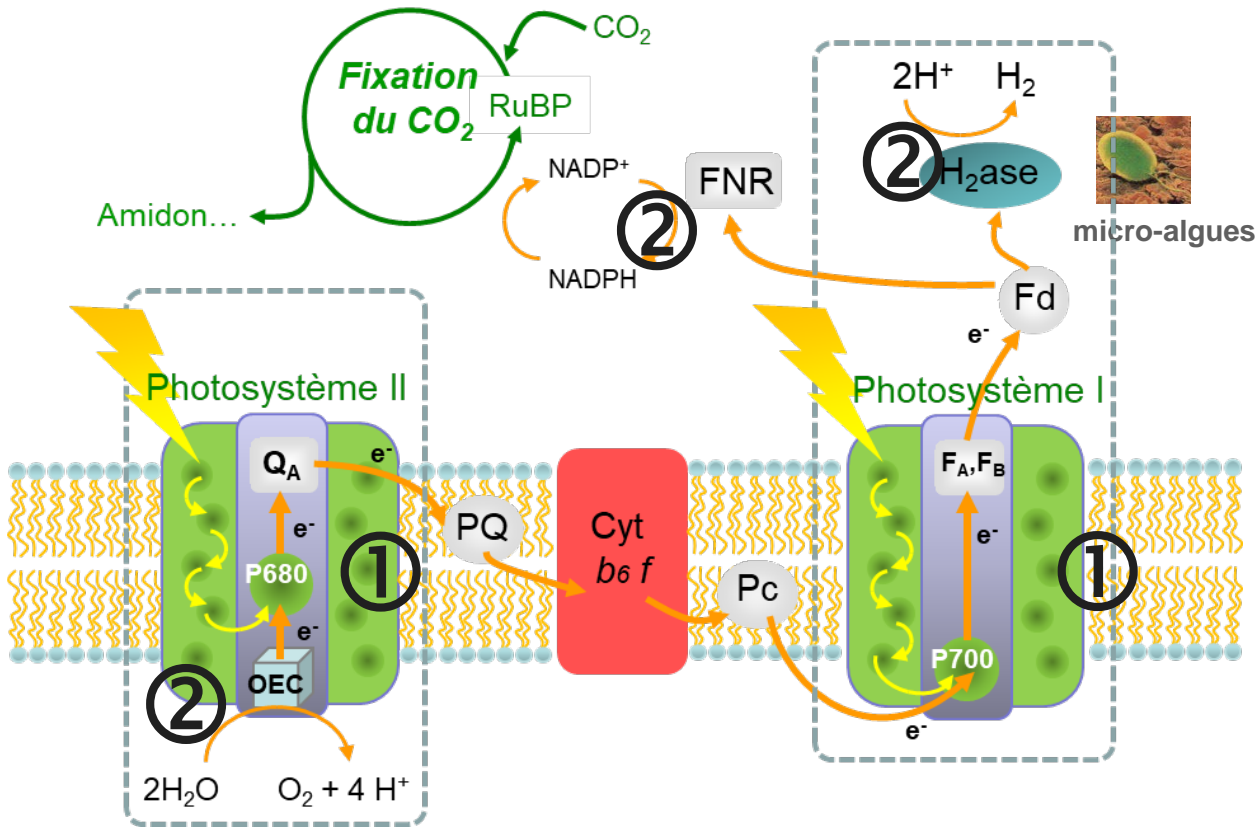


**Dépôt de catalyseurs: 10 min**





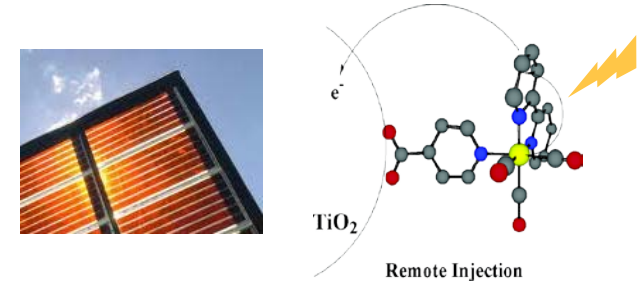
# Photosynthèse artificielle



## ① Conversion de l'énergie lumineuse en potentiel électrochimique

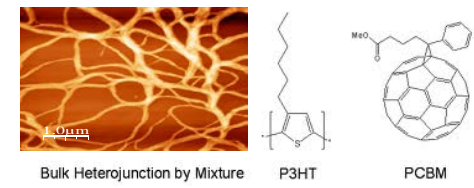
Absorption au niveau de chromophores moléculaires

Séparation de charge spatiale par une cascade de transferts d'électrons



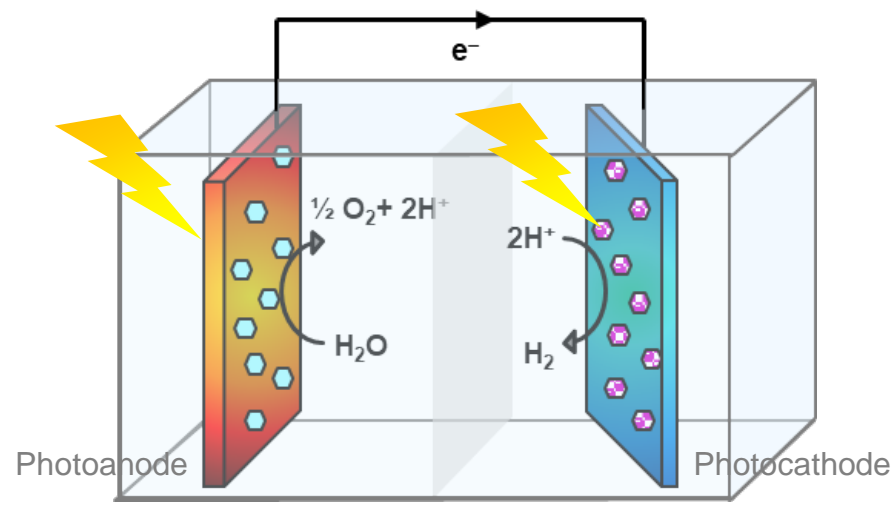
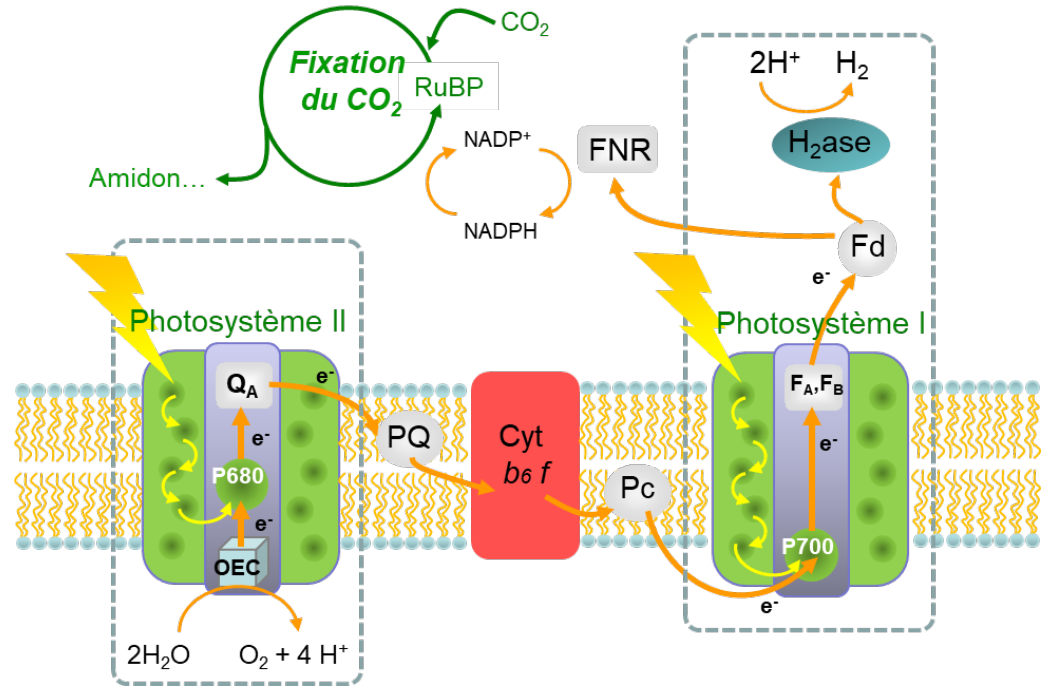
Cellules à colorants (dites de Grätzel)

## ② Catalyse multiélectronique efficace



Photovoltaïque organique

# Vers des cellules photo-électrochimiques (PEC) tandem



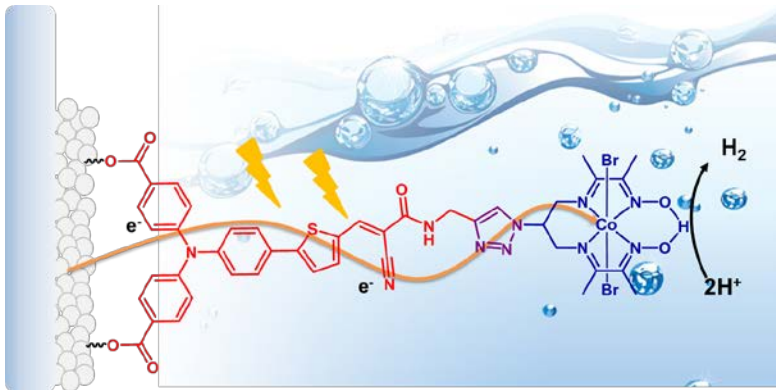
Cellule photo-électrochimique tandem à jonctions liquides

# Des composants PV aux photoélectrodes..

## Cellules de Grätzel



Colorants organiques et metal-organiques

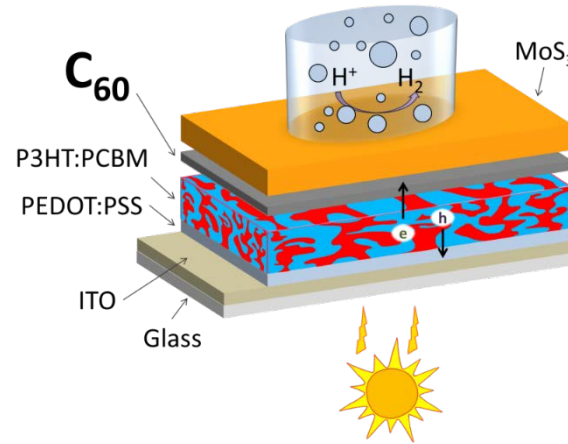


Kaeffer *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* **2016**

## PV organique et hybride



Semiconducteurs organiques

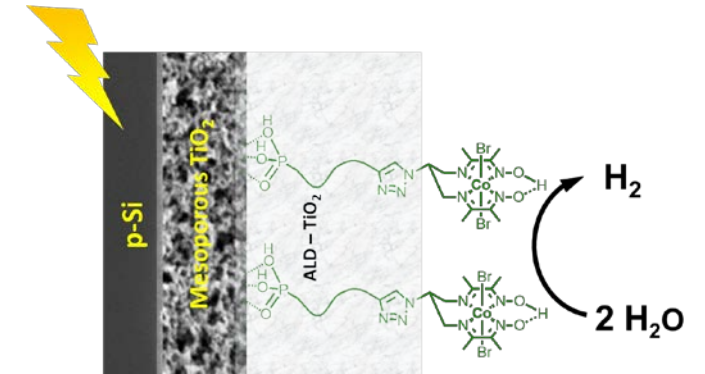


Bourgeteau *et al.*,  
*Energy Environ. Sci.* **2013****2016**

## PV inorganique



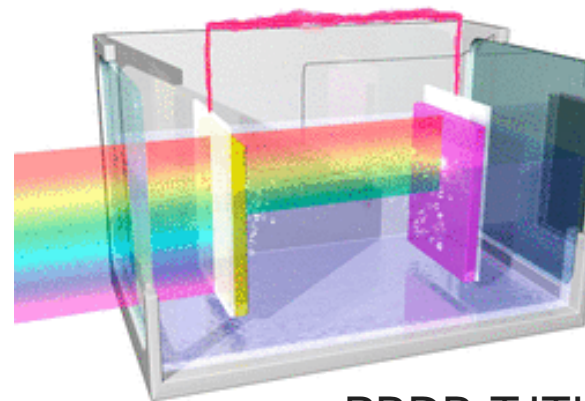
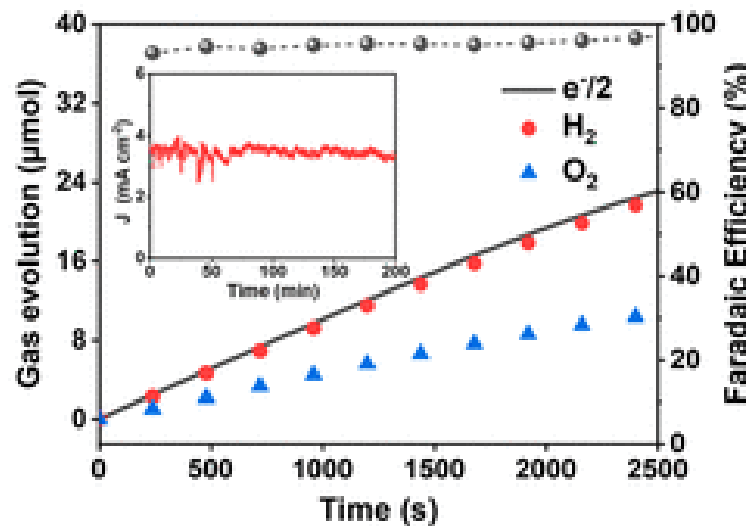
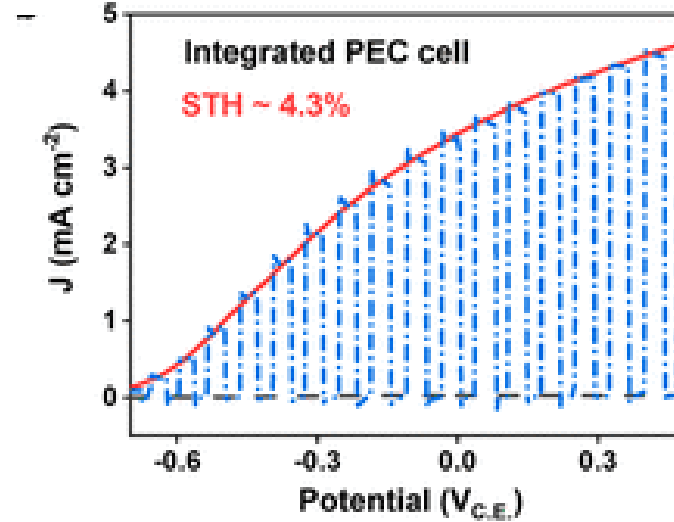
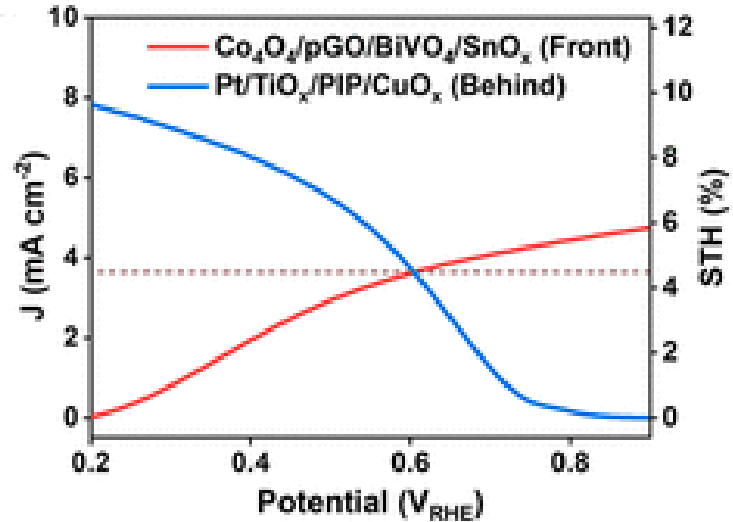
Films minces (III-V)  
Silicium dopé p



Chandrasekaran *et al.*, *Chem. Sci.* **2020**



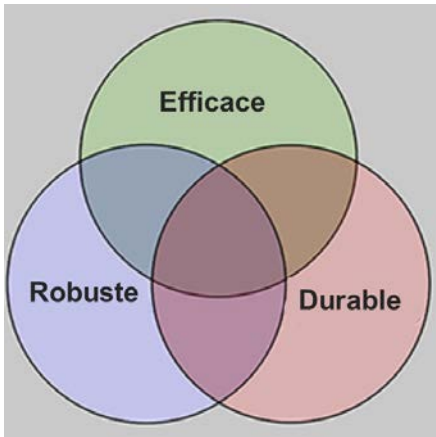
# Record actuel: une cellule PEC avec un rendement de 4.3%



BiVO<sub>4</sub>/CoO<sub>x</sub> PBDB-T:ITIC:PC71BM/ Pt



# Conclusions



- Développement de nouveaux matériaux à propriétés améliorées
- Investir en génie chimique et génie des procédés (modélisation, prototypage...)
- Créer les conditions d'insertion économique et socio-technique de l'hydrogène solaire
  - mettre en œuvre des conditions de fonctionnement sûres
  - sécuriser la source d'eau, par exemple en la sourçant dans l'atmosphère



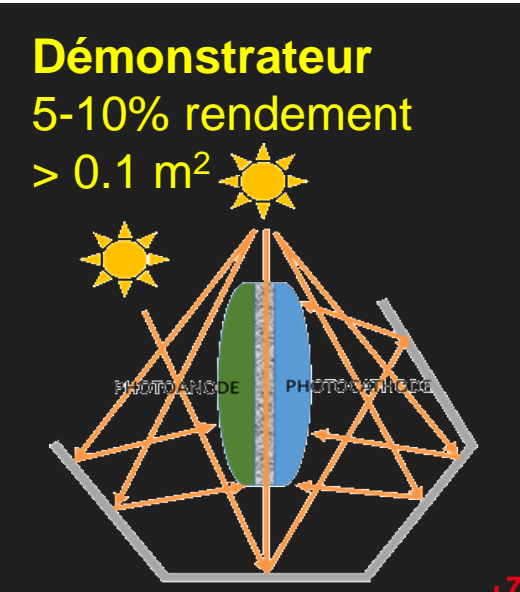
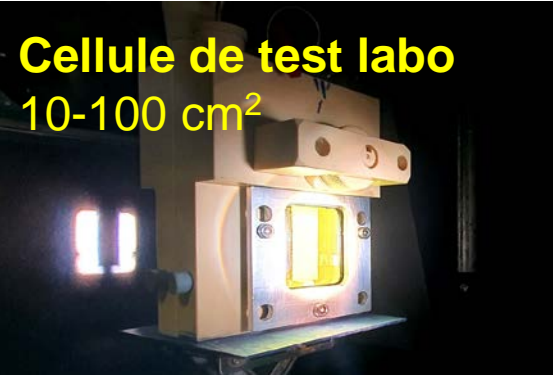
## Chaire industrielle ANR-ENGIE PROSPER-H2

2022-2026

DRF-IRIG DRF-IRAMIS, DRT-LITEN, DES-ISEC  
Laboratoire PACTE (UGA/CNRS)  
Engie- Lab CRIGEN



**Production d'hydrogène par photo-électrolyse de l'eau**  
 Développer une technologie commercialisable pour une production décentralisée d'hydrogène vert





TOYOTA



### M.Chavarot-Kerlidou

M. Koepf      A. Morozan  
J. Fize      B. Reuillard

### PhD students

C. Bourguignon A. Haurez  
A. Maragno      M. Haake  
A. Zamader      J. Schild  
A. Bagnall      E. Giannoudis  
K Yang      **Duc Nguyen Ngoc**  
S. Bold      N. Coutard  
D Sun      N Queyriaux  
**N Kaeffer**      D. Brazzotto  
S. Hilliard      S. Gentil  
M Bacchi      J. Toupin  
S Canaguier      Y Oudart

### Post-docs

C. McMannus  
J De Tovar      Yao Fu  
M. Fadel      C. Tapia  
N. Randell      N. Mroweh  
S. Chandrasekaran T. Rosser  
**C. Windle**      T. Straistari  
D. Pramanik      J. Massin  
R Jane      S. Roy  
T N Huan      C. Baffert  
A Fihri      P-A Jacques  
M Razavet      P D Tran  
V Fourmond      S Cobo  
E S Andreiadis      T. R. Simmons  
G Berggren      J-F Lefebvre

## Collaborations

### CEA-IRIG

### SyMMES

Caroline Keller  
Jingxian Wang  
Pascale Chenevier  
Dmitry Aldakov

### CEA-IRAMIS

### Nimbe

Tiphaine Bourgeteau  
Bruno Jousseme  
Bernard Geffroy

### CEA-ISEC

Sophie Charton

### CEA-LITEN

Muriel Matheron

### Toyota Motor Europe

Hannah Johnson

### USTH Hanoi

Phong D. Tran  
Duc Nguyen Ngoc

