



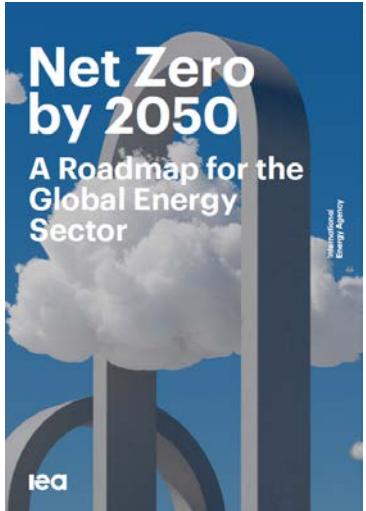
Hydrogène solaire : avancées technologiques et défis scientifiques

V. Artero

*Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux,
Université Grenoble Alpes, CNRS, CEA Grenoble*
www.solhycat.com

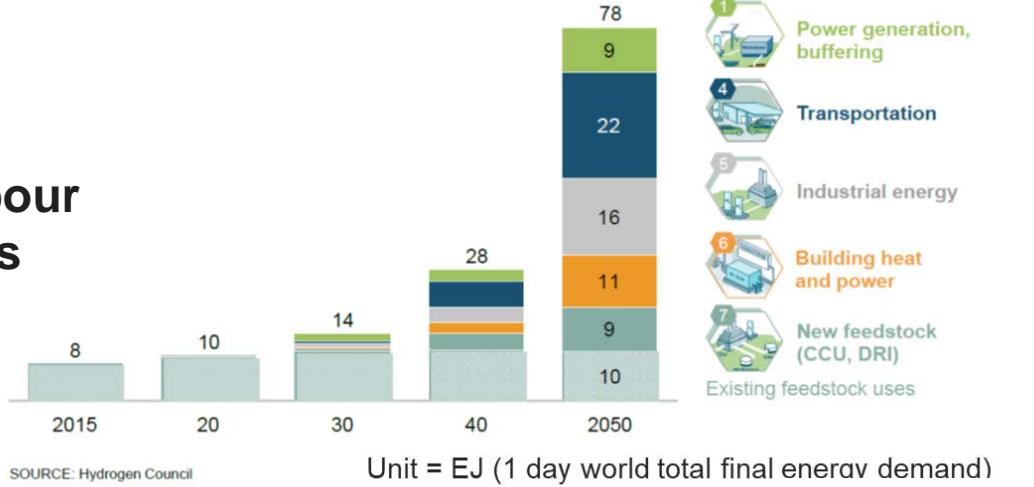


Pourquoi de l'hydrogène solaire?



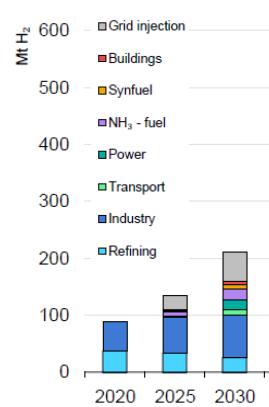
Transition Net Zero Emission en 2050

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

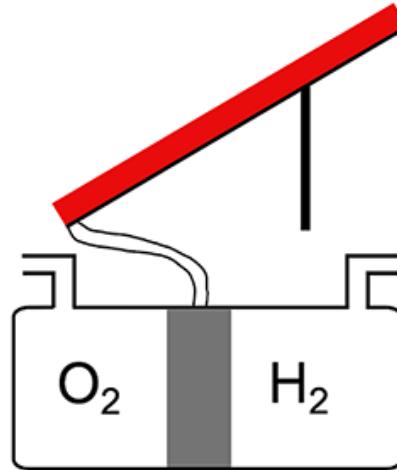


Fortes contraintes sur le réseau électrique qui va devoir s'adapter à un trafic de 2 à 4 fois plus important et à des sources de production d'électricité renouvelables non pilotables

La production d'hydrogène est une solution pour le stockage massif des énergies renouvelables, 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)

Panneaux photovoltaïques captifs
(pas de frais d'utilisation du réseau)

Electrolyseurs 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

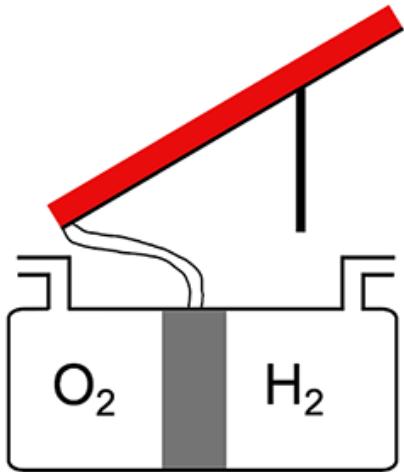
hydeal



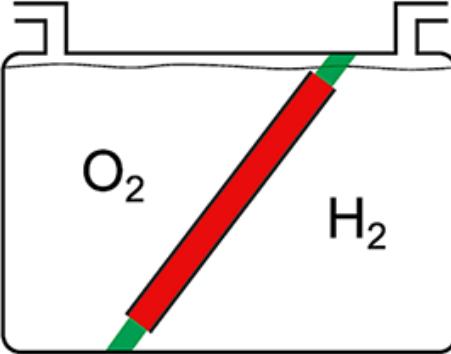
TRL 9



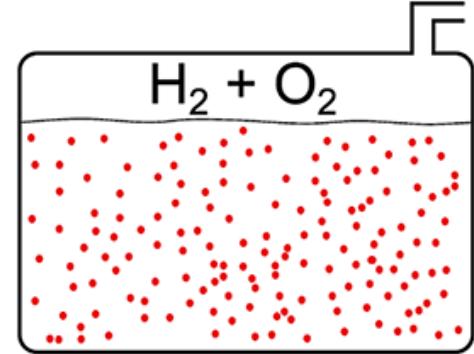
Un grand choix de technologies, plus ou moins matures



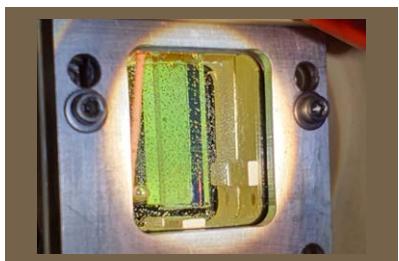
PV/electrolyseur
(PV+E)



cellules PV+E (IPEC) et
PEC



Photocatalyseurs et organismes
photosynthétiques



TRL 4-6

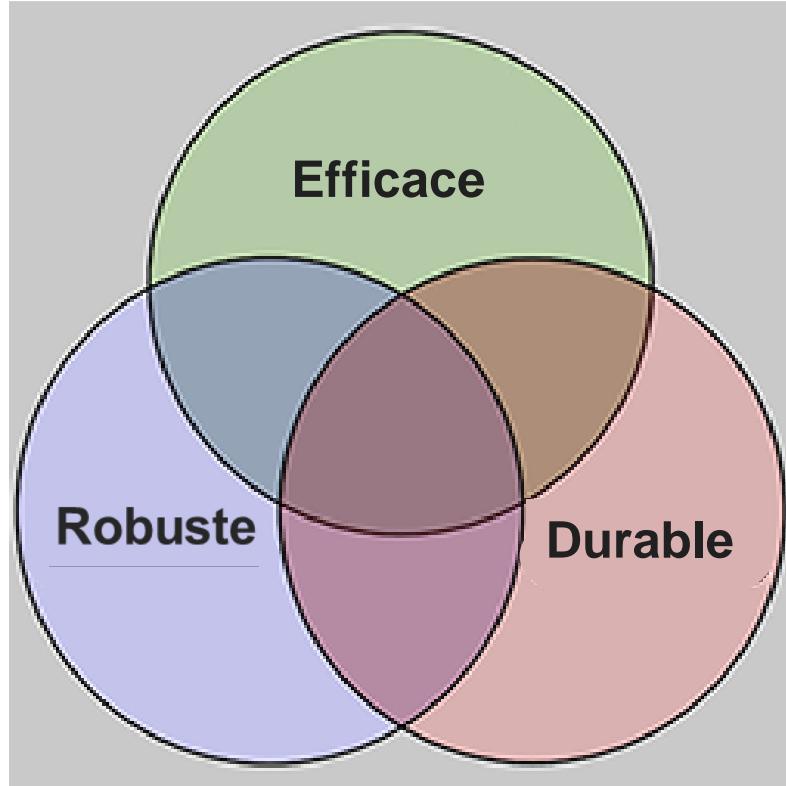
TRL 2-3

Efficacité, robustesse et durabilité

10-20 ans de fonctionnement en conditions ambiante et intermittente

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

L'efficacité conditionne l'empreinte au sol



McKone, Lewis, Gray, *Chem. Mater.* 2014

EROI >10

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

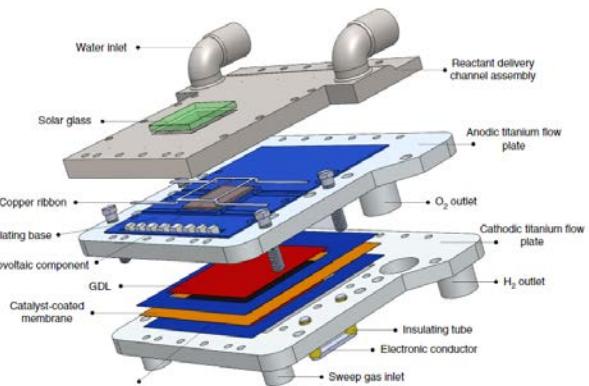
- Développement de nouveaux matériaux
- Développement de prototypes à l'échelle

Prototypes IPEC intégrés



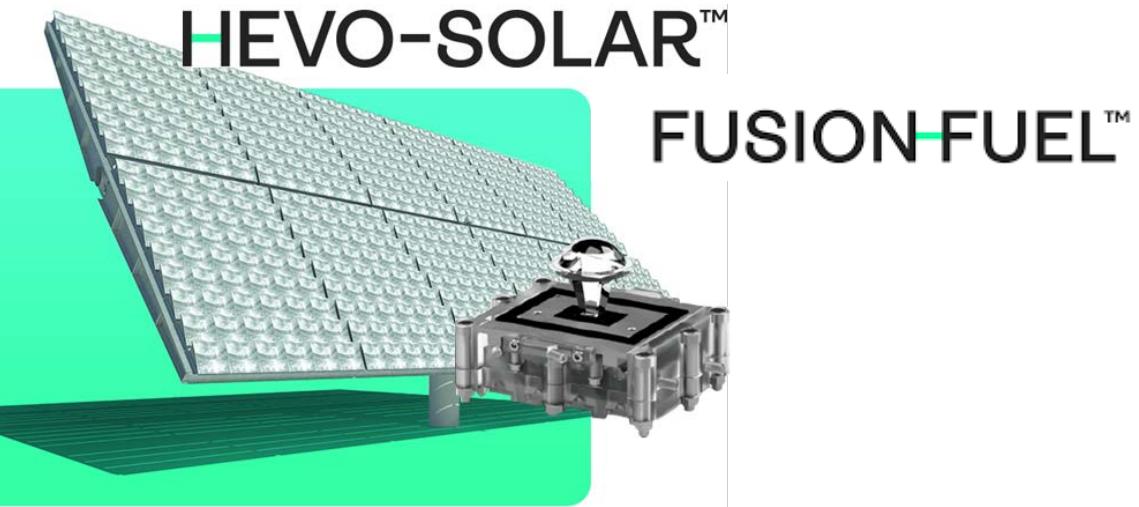
S. Haussener

EPFL



17% rendement STH

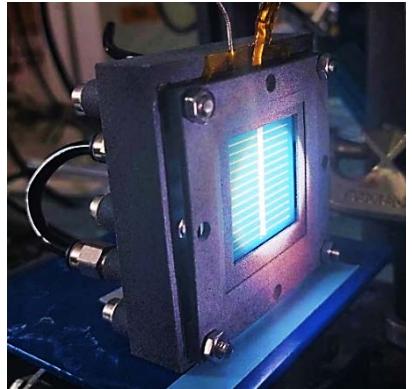
Cellule solaire III-V sous concentration
Electrolyseur PEM



Cellule solaire III-V sous concentration
Electrolyseur PEM



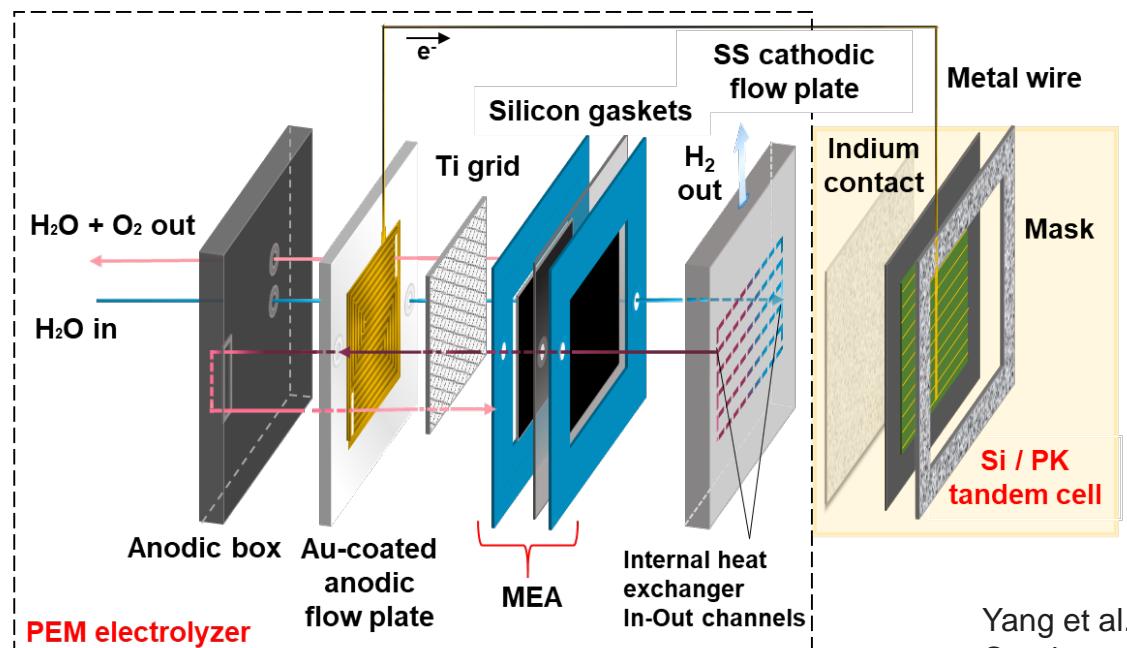
Prototypes IPEC intégrés



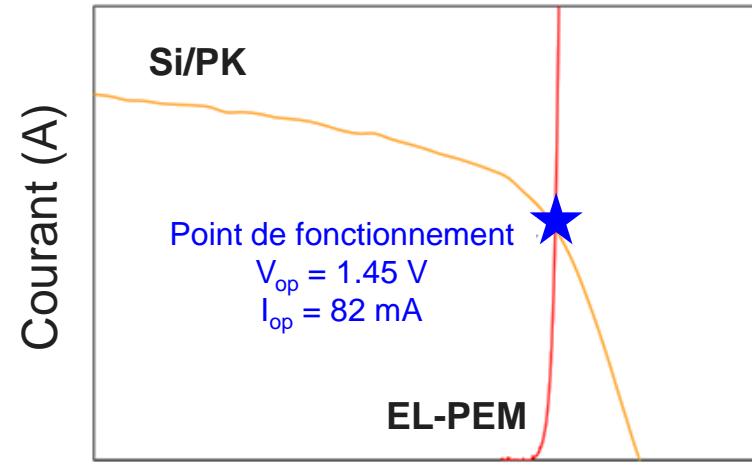
Cellules solaires tandem Si/PK tandem
de haute efficacité
9 cm² de surface active



STH ~10 % en conditions simulée (1 sun)

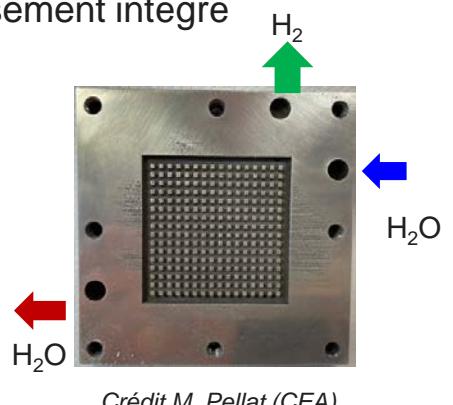


Yang et al. *Applied Energy* 2018, 215, 202
Cronin and coll. *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7,3026



A. Maragno

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

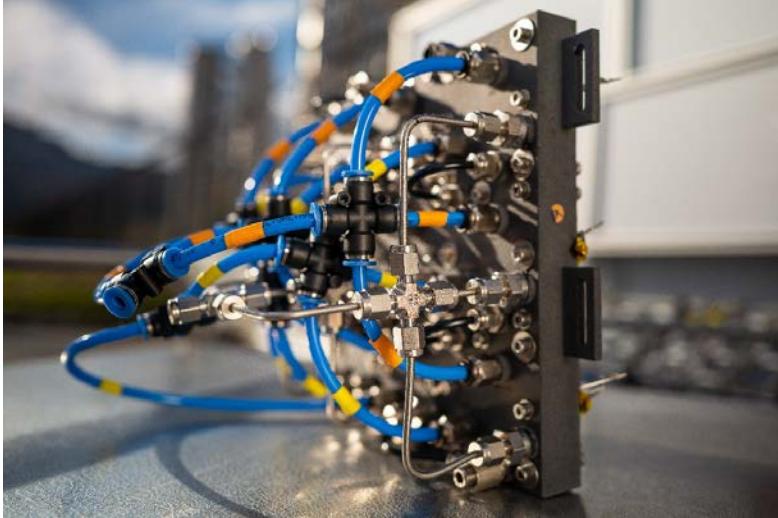


Crédit M. Pellat (CEA)



Maragno et al. *manuscript in preparation* 7

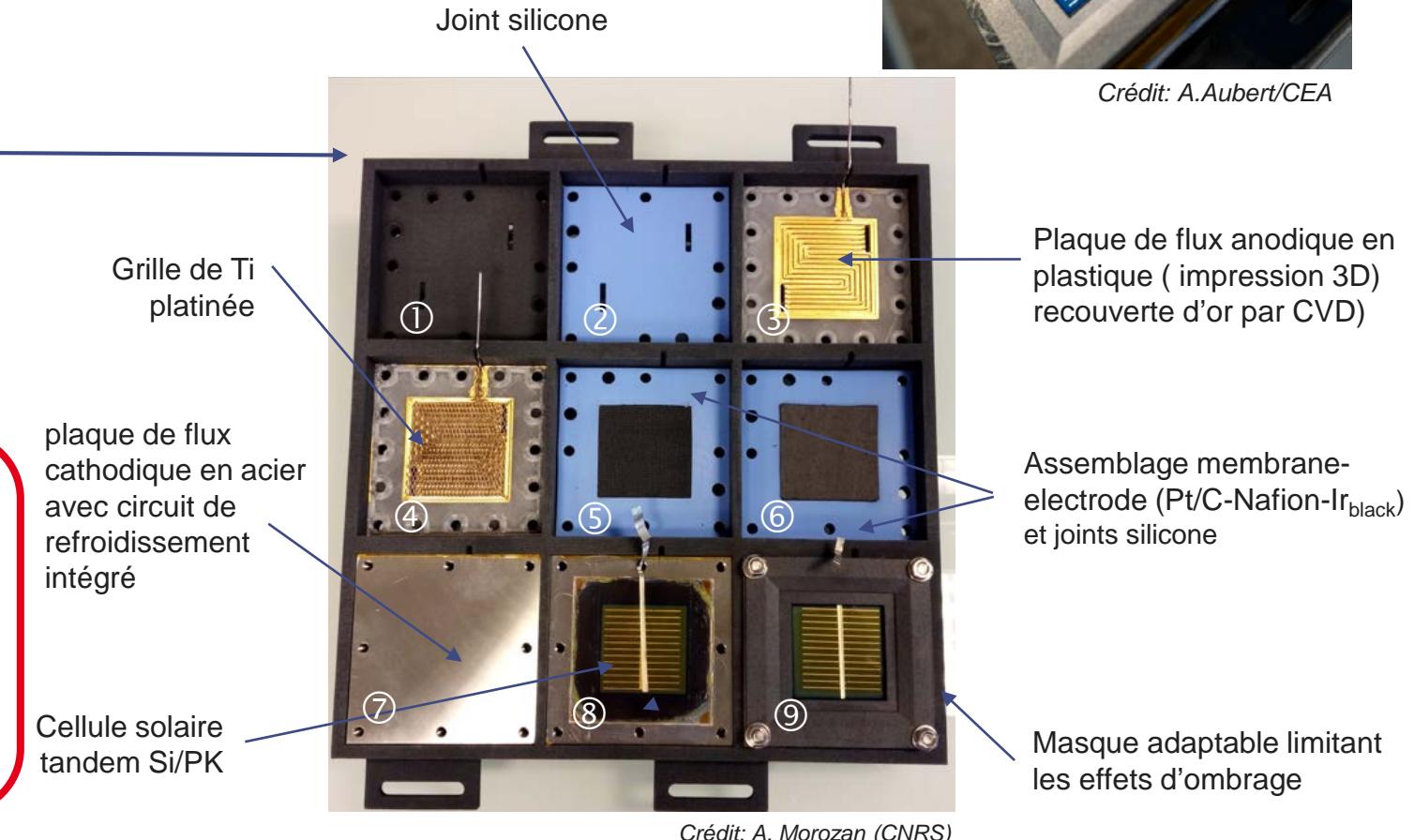
Préparation de modules de 9 cellules IPEC



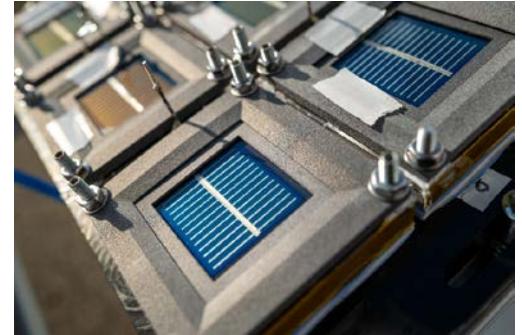
Crédit: A. Aubert/CEA



STH = 7.4 % sur 72 h de test continu en extérieur avec 45 cellules IPEC (~400 cm²)



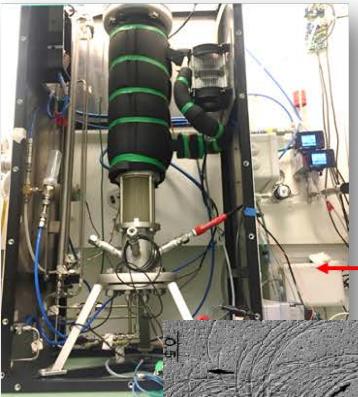
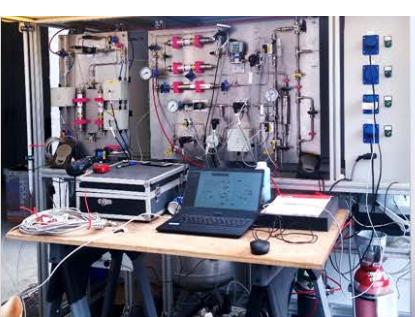
Crédit: A. Morozan (CNRS)



Crédit: A.Aubert/CEA

EASI Fuel *European Autonomous Solar Integrated fuel station*

Panneau de contrôle



Bioréacteur frugal
de méthanation

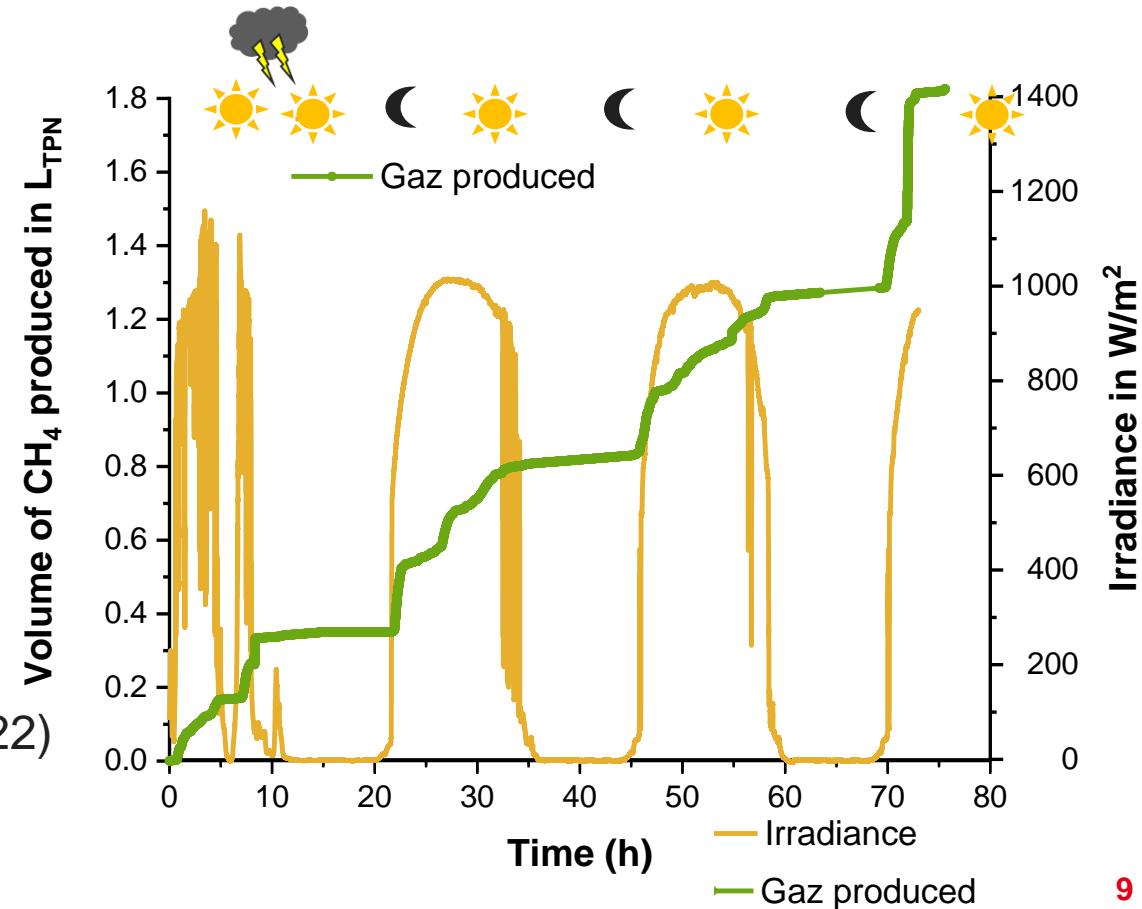
45 IPEC – 400 cm²

72h de test en continu et en extérieur (ISPRA, Juillet 2022)

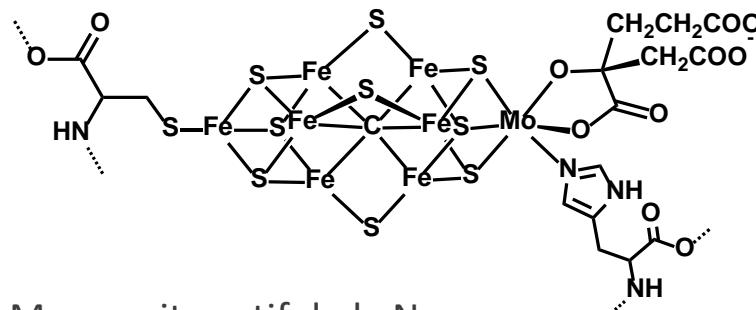
1,8 L de méthane produit (>87%)

Rendement global (STF) : ~5%

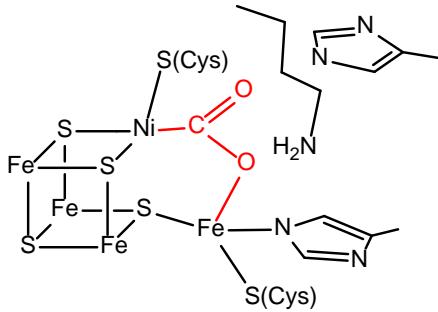
Modules IPEC



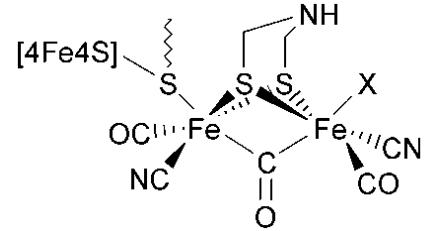
Les sulfures métalliques pour s'affranchir des métaux nobles en électrocatalyse



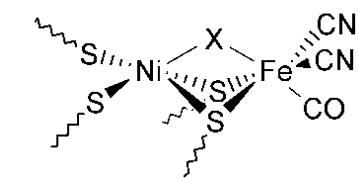
FeMo-co: site actif de la N₂ase



Site actif de la CODH

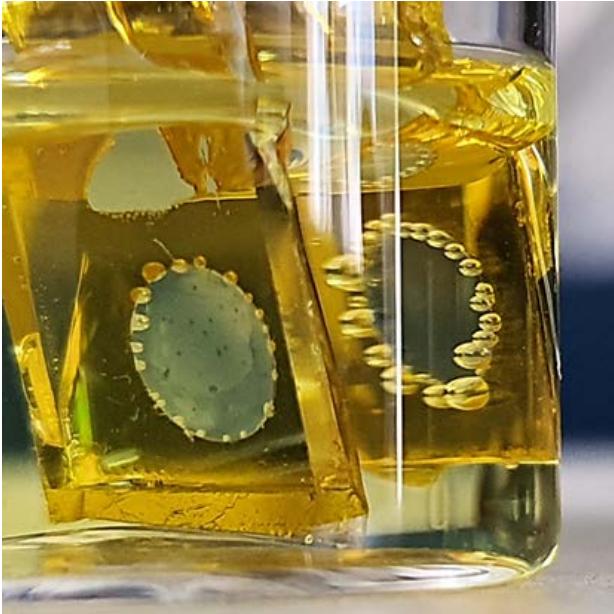
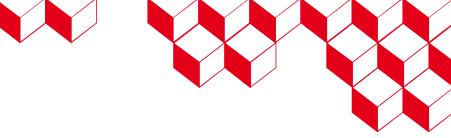


Sites actifs des H₂ases

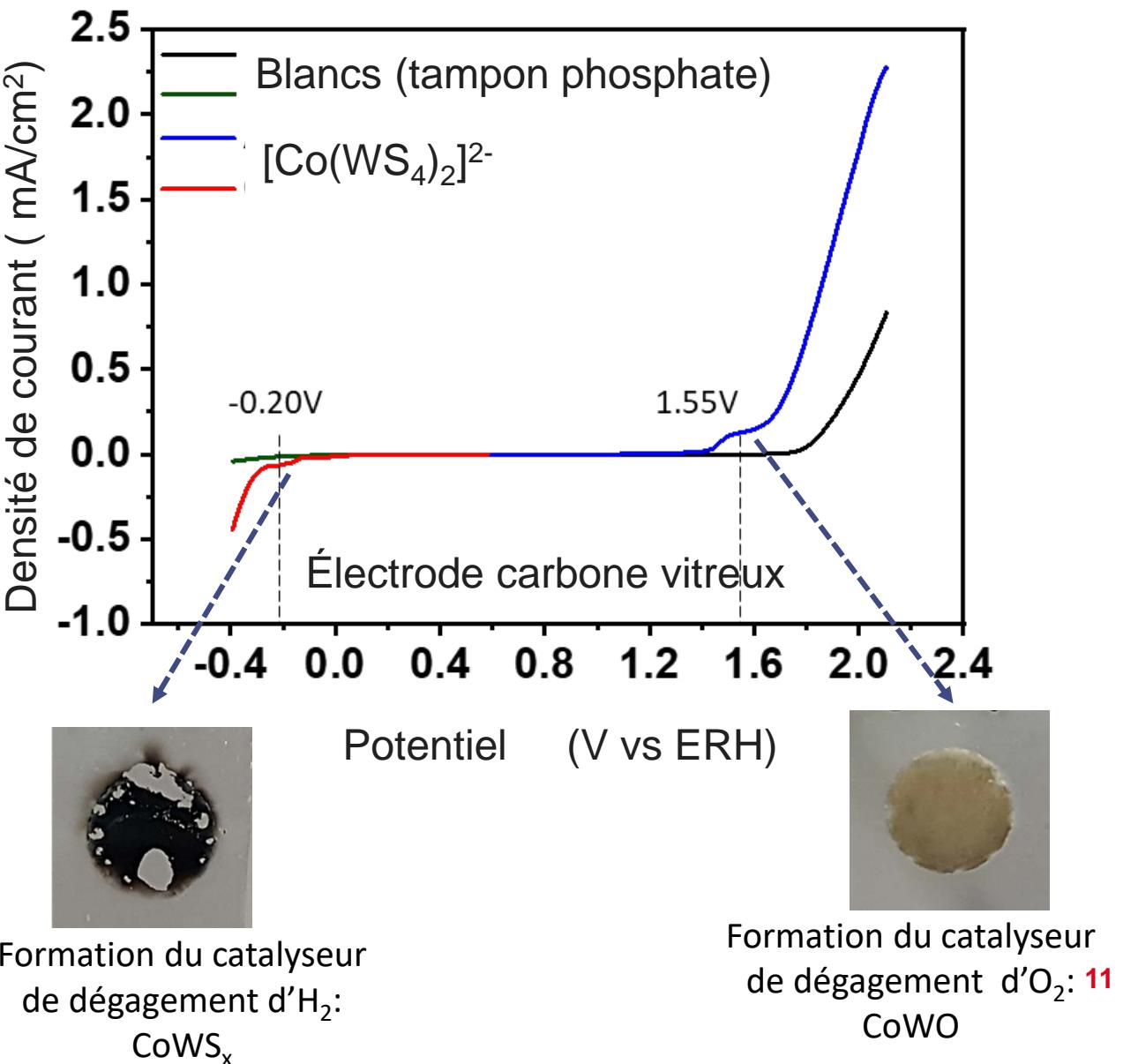


Enzyme	Reaction	Process	Application
Hydrogenase	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{H}_2$	Hydrogen evolution reaction Hydrogen oxidation reaction	Water electrolysis Hydrogen fuel cells
Cytochrome c oxidase or Laccase	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	Oxygen reduction reaction	Fuel cells
Formate dehydrogenase	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{HCOOH}$	CO ₂ reduction reaction	Co-electrolysis of water and CO ₂
Carbon monoxide dehydrogenase	$\text{CO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightleftharpoons \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	CO ₂ reduction reaction	Co-electrolysis of water and CO ₂
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

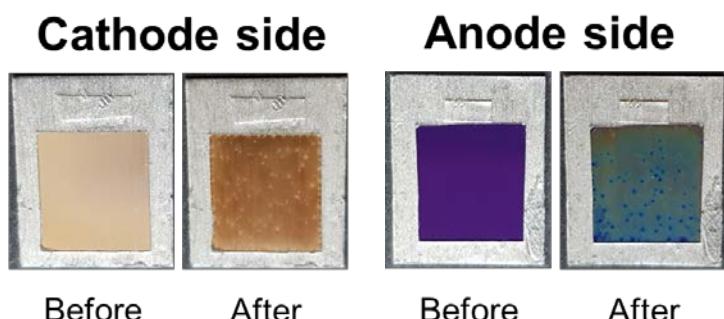
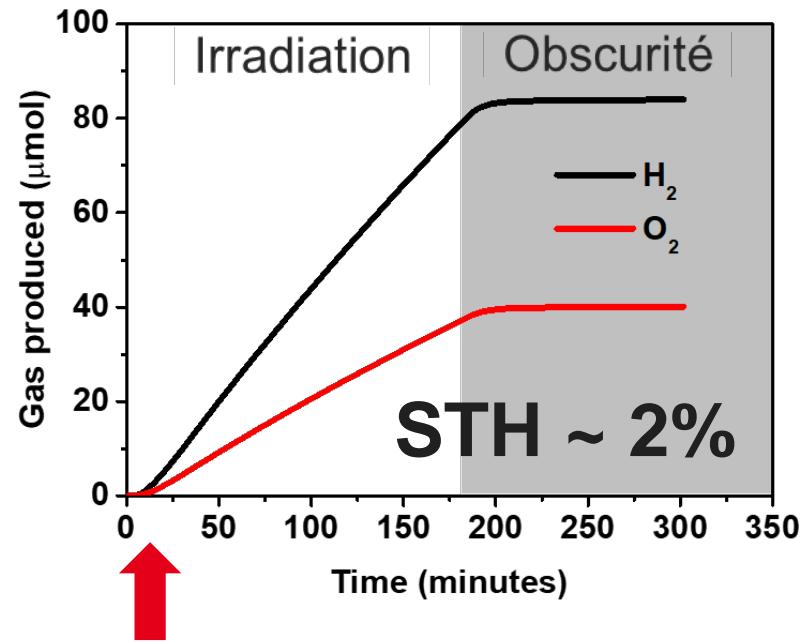
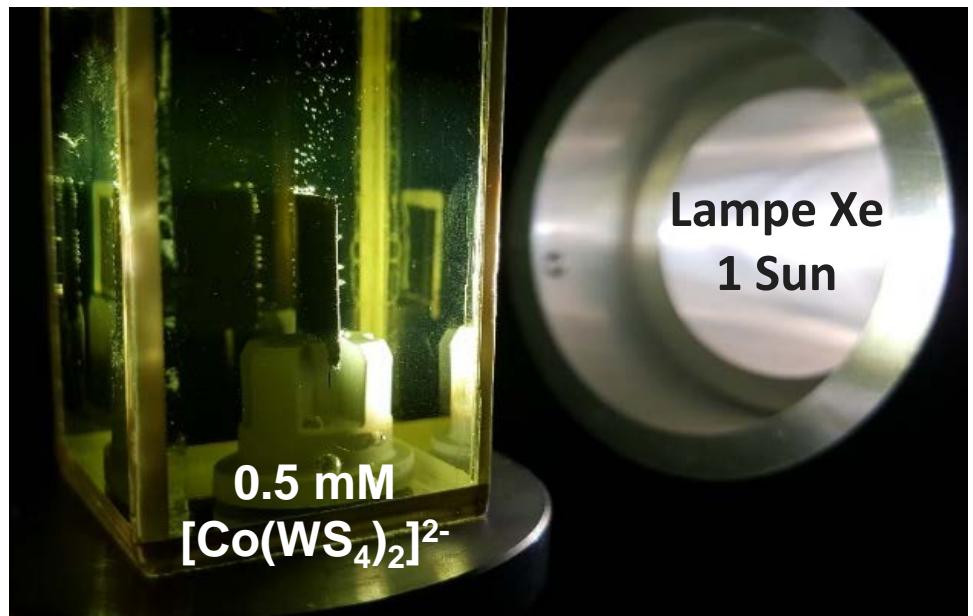
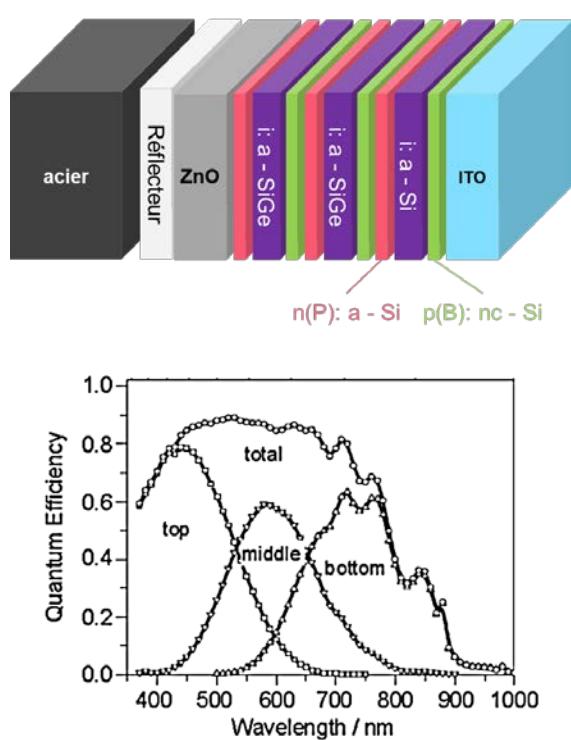
Un seul précurseur pour le dépôt des deux catalyseurs de dégagement d'hydrogène et d'oxygène



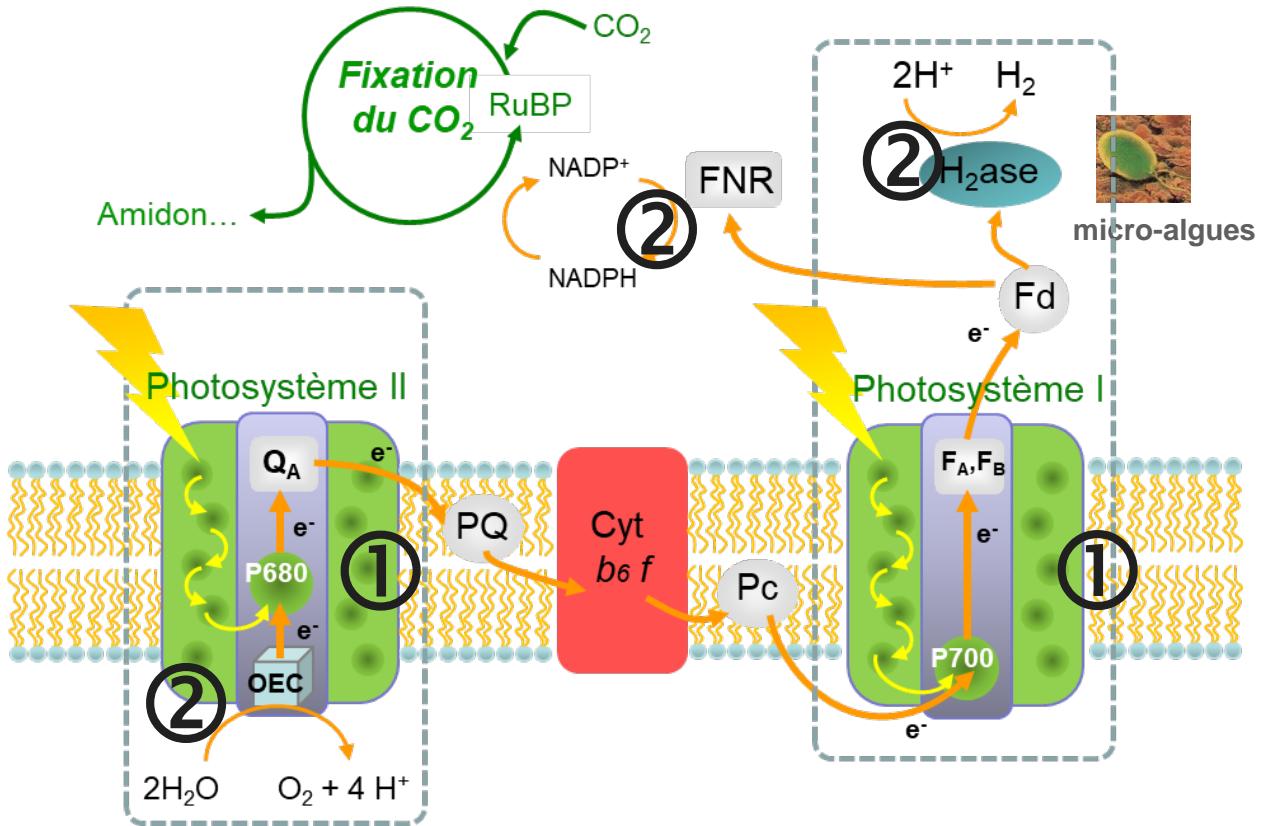
$[\text{Co}(\text{WS}_4)_2]^{2-}$
 $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ et $(\text{NH}_4)_2[\text{WS}_4]$
dans
0.1 M KPi (pH 7)



Des feuilles artificielles très simples à fabriquer



Photosynthèse artificielle

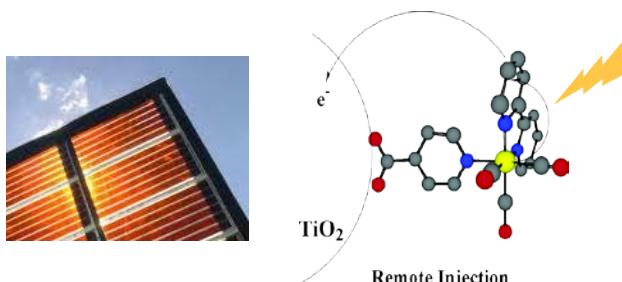


② Catalyse multiélectronique efficace

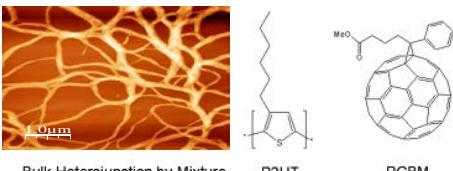
① Conversion de l'énergie lumineuse en potentiel électrochimique

Absorption au niveau de chromophores moléculaires

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

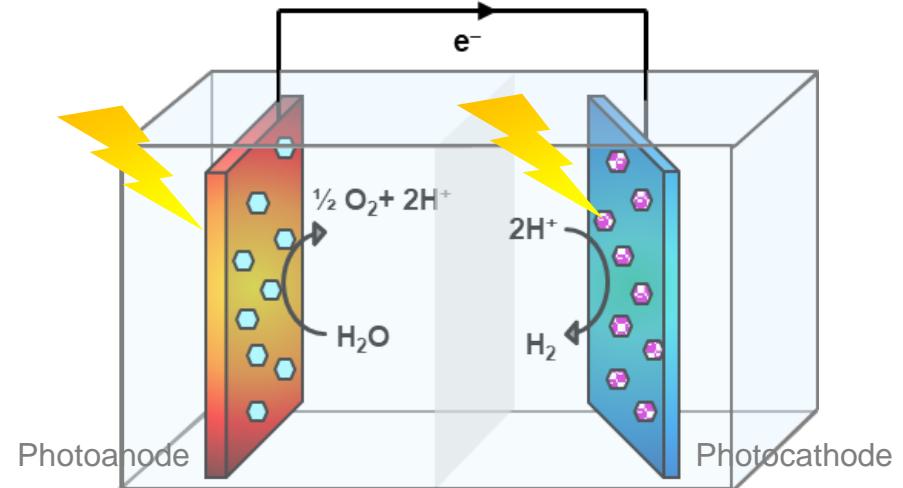
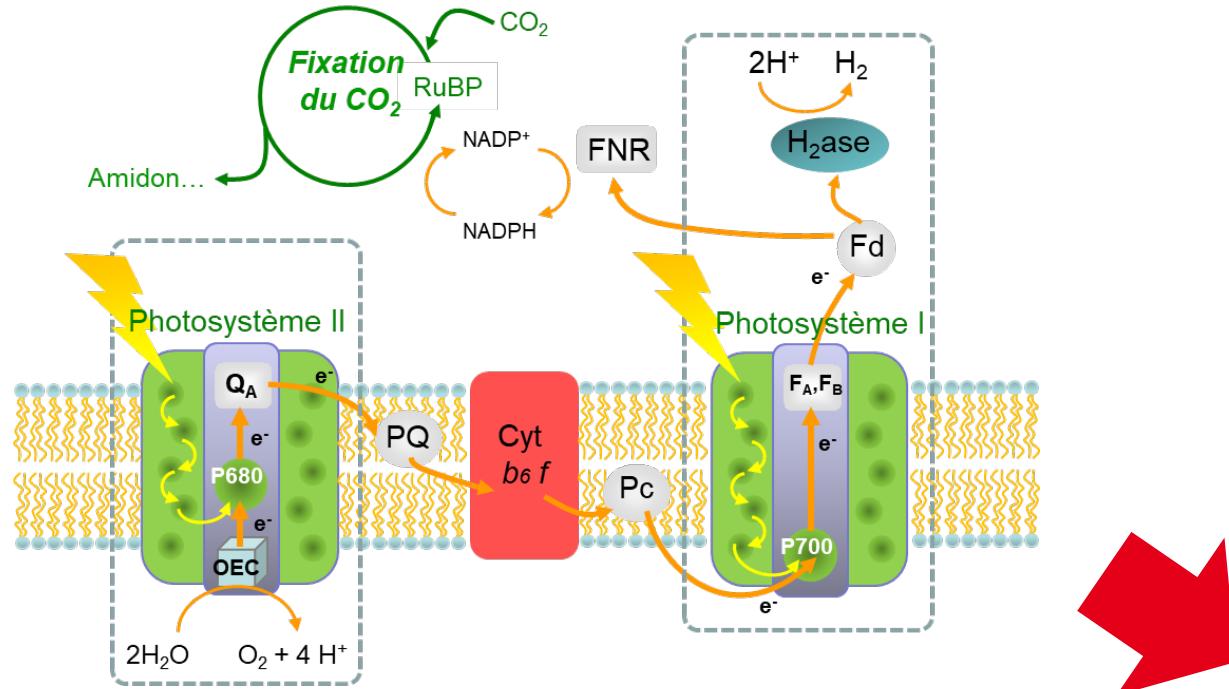


Cellules à colorants (dites de Grätzel)



Photovoltaïque organique

Vers des cellules photo-électrochimiques (PEC) tandem

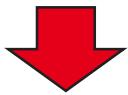


Cellule photo-électrochimique tandem à
jonctions liquides

Des composants PV aux photoélectrodes..



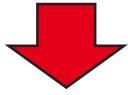
Cellules de Grätzel



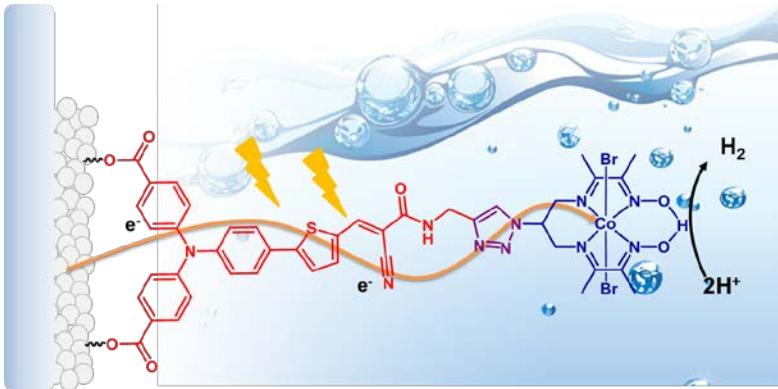
PV organique et hybride



PV inorganique

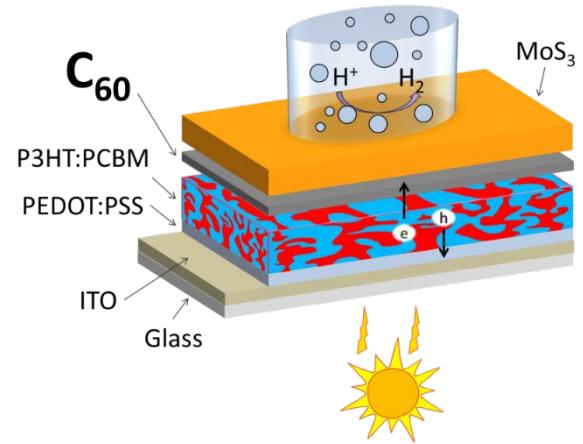


Colorants organiques et metal-organiques



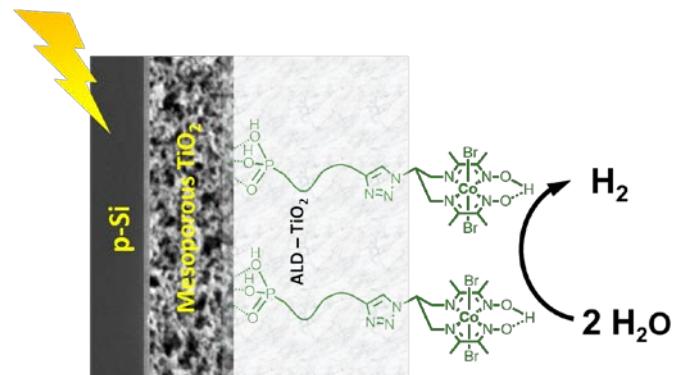
Kaeffer *et al.*, *J. Am. Chem. Soc.* 2016

Semiconducteurs organiques



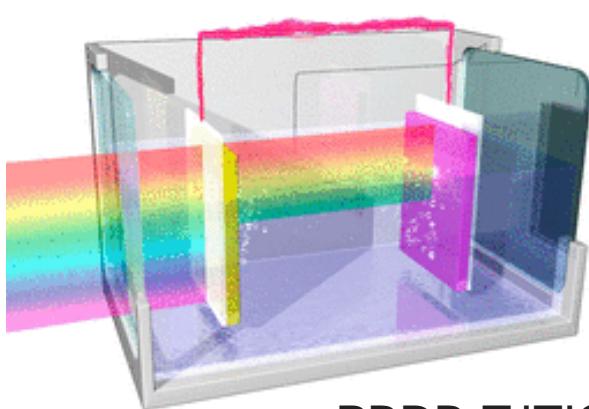
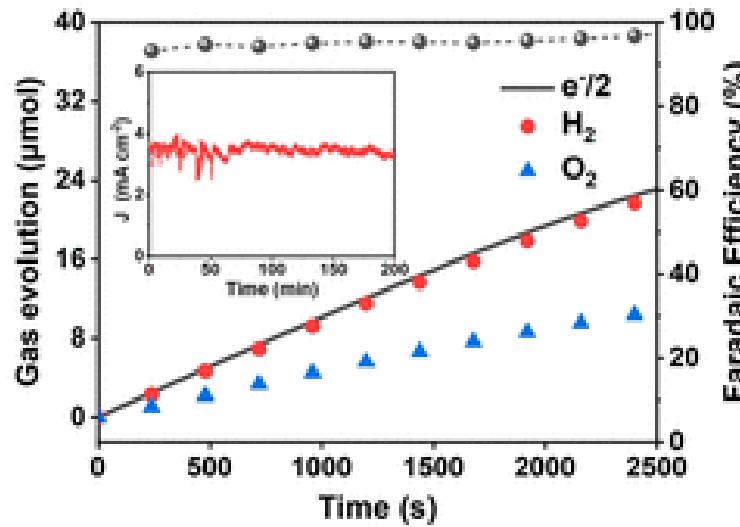
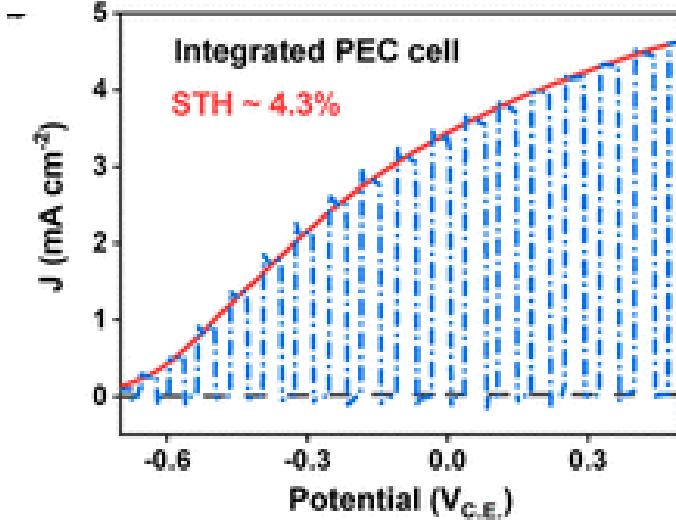
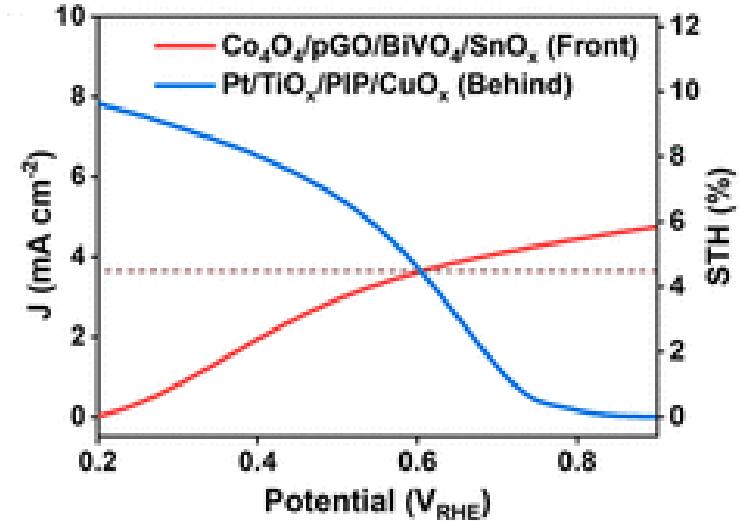
Bourgetteau *et al.*,
Energy Environ. Sci. 2013 2016

Films minces (III-V)
Silicium dopé p



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

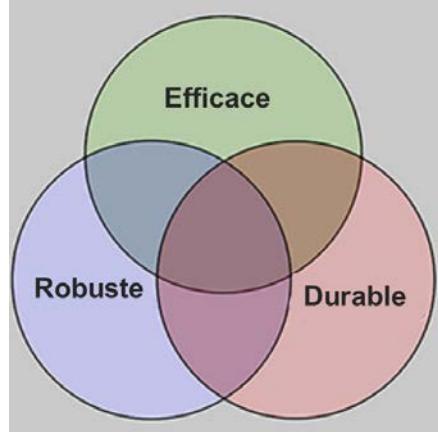
Record actuel: une cellule PEC avec un rendement de 4.3%



PBDB-T:ITIC:PC71BM/ Pt
 $\text{BiVO}_4/\text{CoO}_x$



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



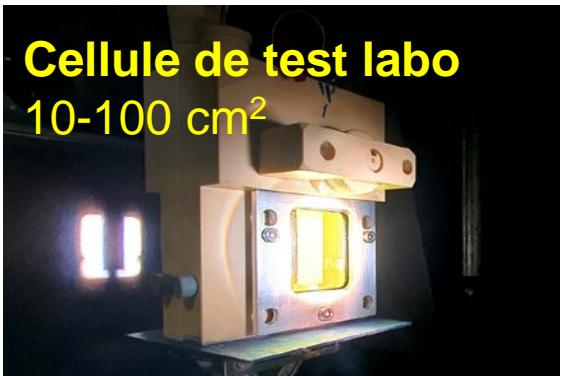
Chaire industrielle ANR-ENGIE PROSPER-H2

2022-2026

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

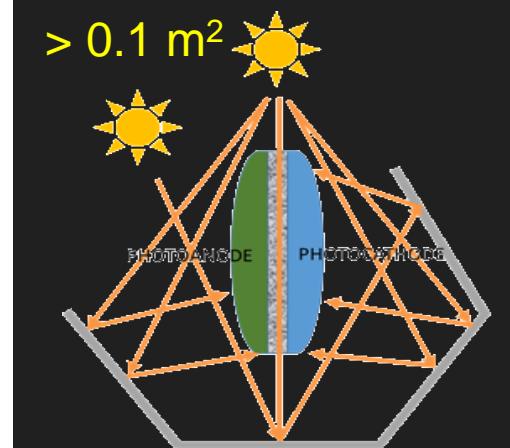


Production d'hydrogène par photo-électrolyse de l'eau
Développer une technologie commercialisable pour une production décentralisée d'hydrogène vert



cea

Démonstrateur
5-10% rendement
 $> 0.1 \text{ m}^2$





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. Brazzolotto
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 Jousselme

Bernard Geffroy

CEA-ISEC

Sophie Charton

CEA-LITEN

Muriel Matheron

Toyota Motor Europe

Hannah Johnson

USTH Hanoi

Phong D. Tran

Duc Nguyen Ngoc

