

S'inspirer des plantes : du rayonnement à l'énergie chimique



Winfried LEIBL, CEA Saclay, iBiTecS, LPB. winfried.leibl@cea.fr

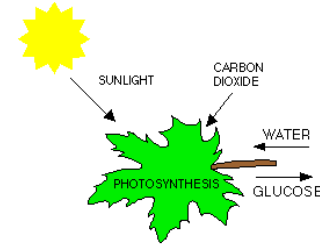


Sommaire



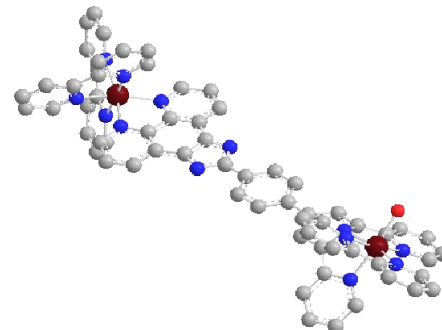
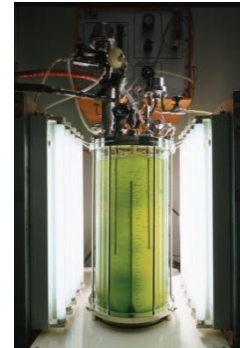
La photosynthèse naturelle

- Structures
- Mécanismes
- Rendements



Domestiquer

- Approche biologique
- Approche chimique (Photosynthèse artificielle)

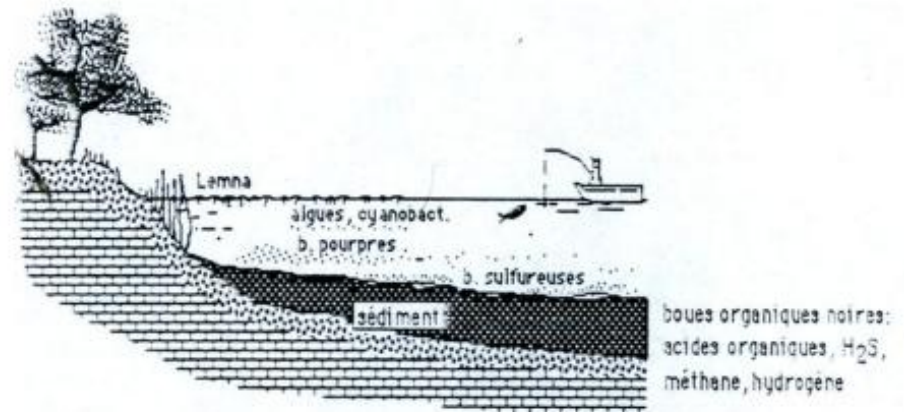
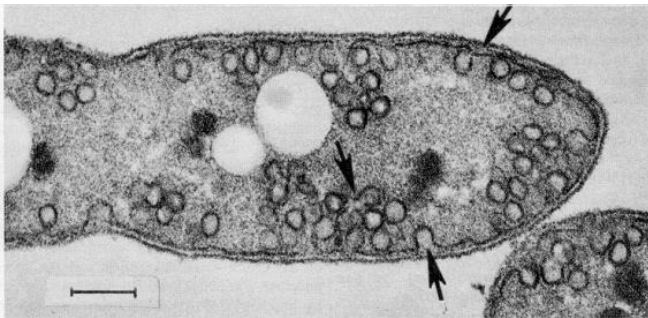


La photosynthèse anoxygénique



Organismes unicellulaires, souvent très sensible à l'oxygène

- Héliobactéria
- Bactéries vertes sulfureuses (Chlorobium)
Donneurs d'électron: sulfures, FeII, H₂
- Bactéries pourpres (Rhodobacter, Rhodospirillum,...)
Donneurs d'électron : (sulfures), FeII, H₂

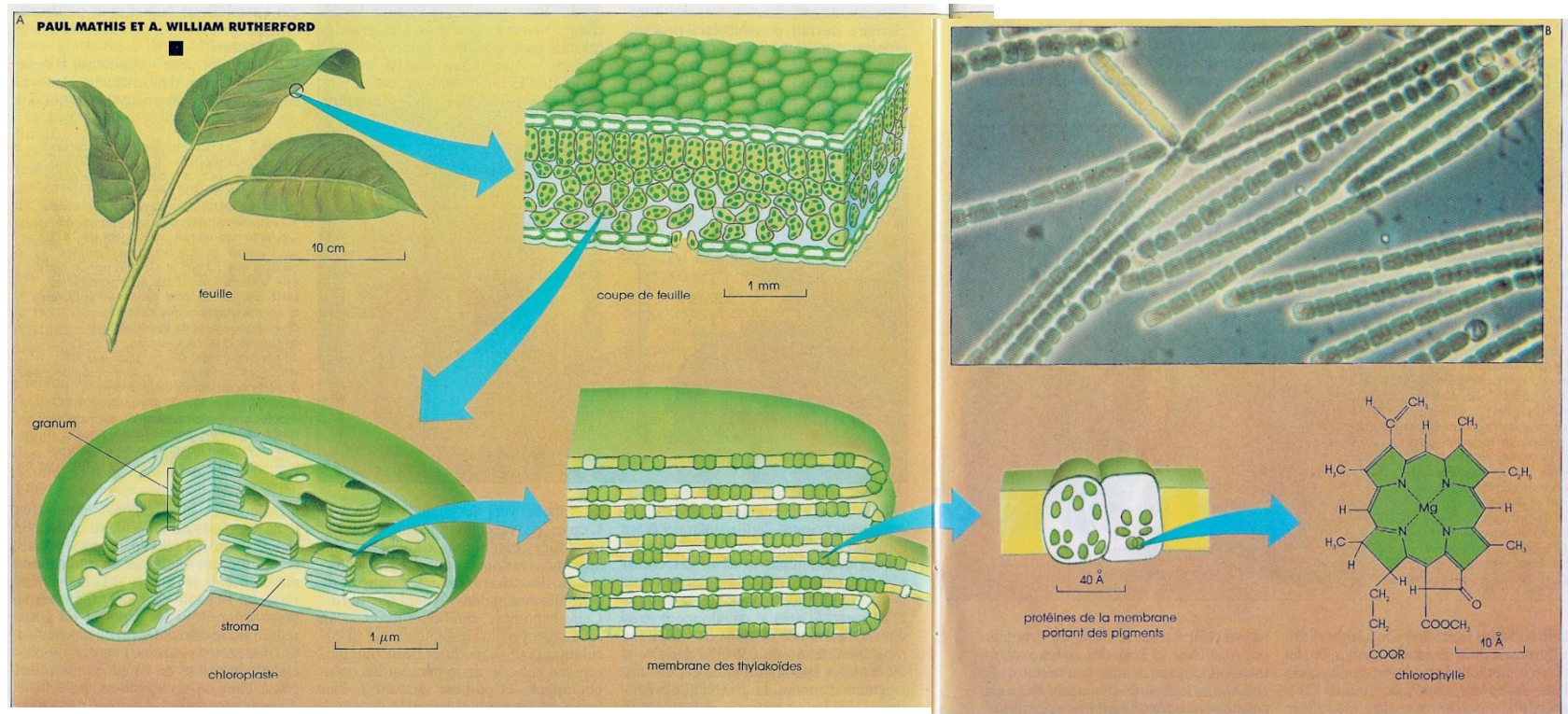
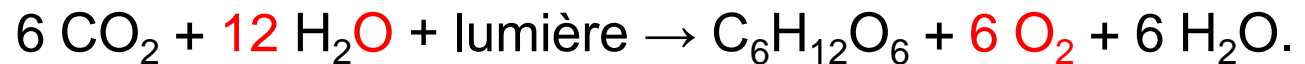


Coupe transversale situant l'écosystème des bactéries pourpres

La photosynthèse oxygénique – plantes et algues



La photosynthèse oxygénique utilise l'énergie solaire, de l'eau et du CO_2 pour fabriquer du sucré (glucose):



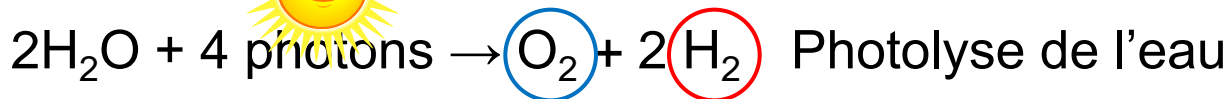
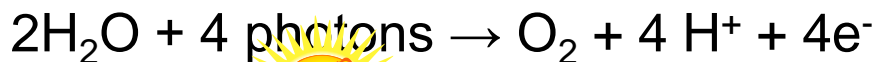
Conversion d'énergie : photochimie



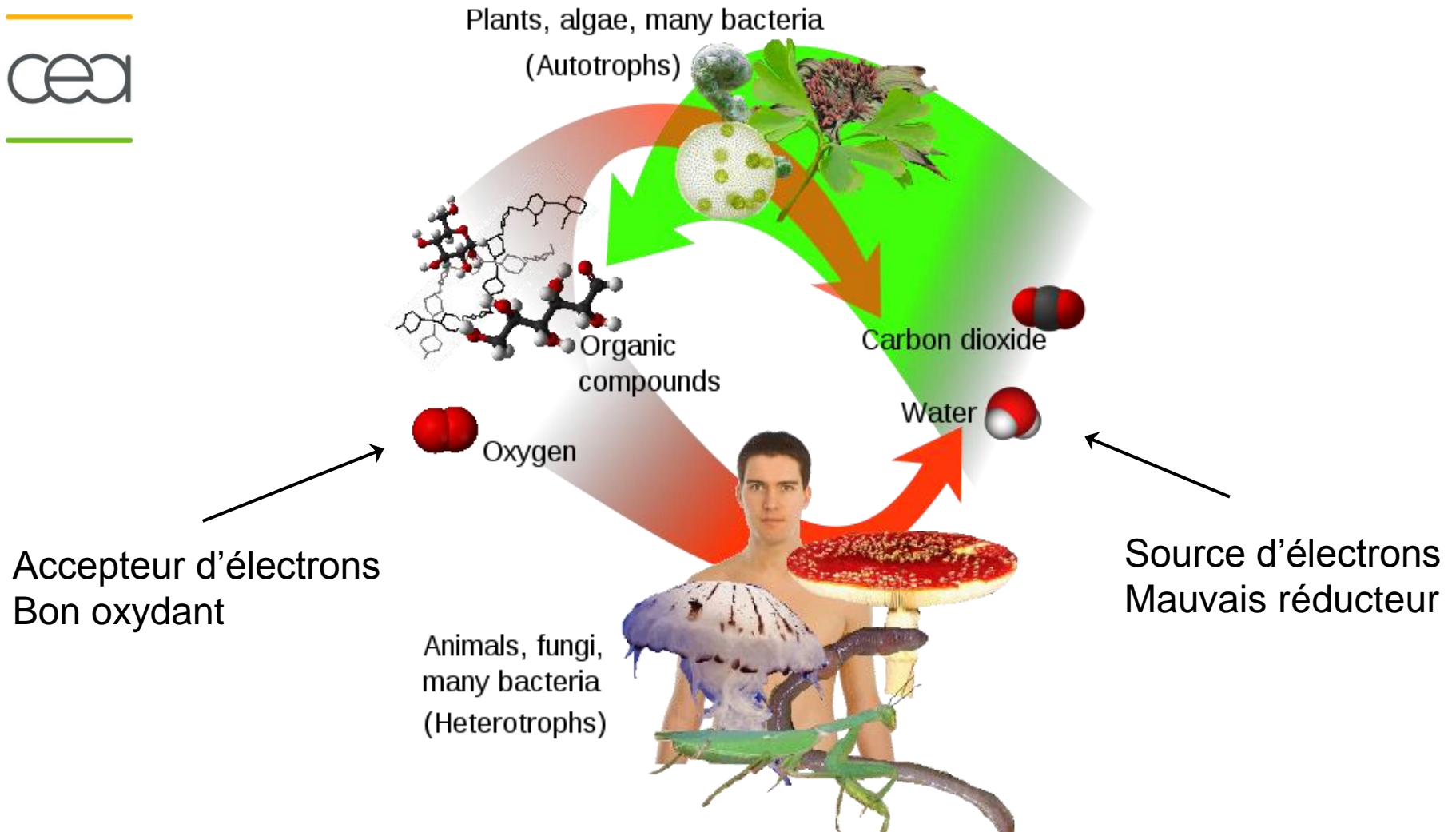
Les réactions photochimiques:



Le cycle de Calvin, appelé aussi phase de fixation du carbone ou phase non-photochimique:



Le cycle de l'oxygène: photosynthèse et respiration



Mais l'O₂ est aussi une molécule chimiquement agressive -> stress oxydatif

Le centre réactionnel bactérien

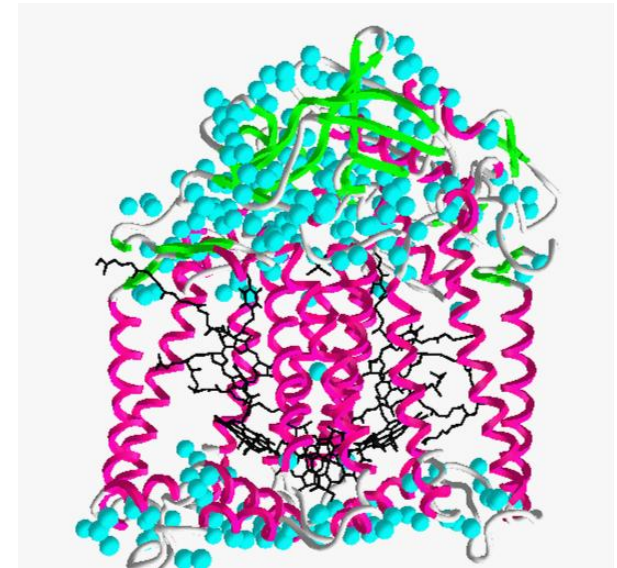
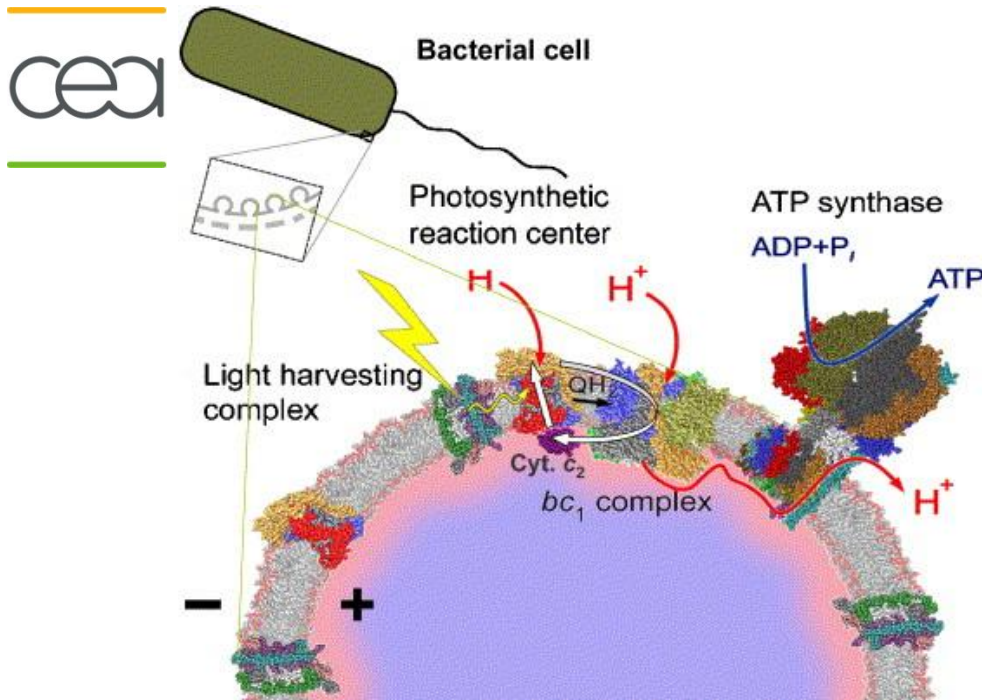
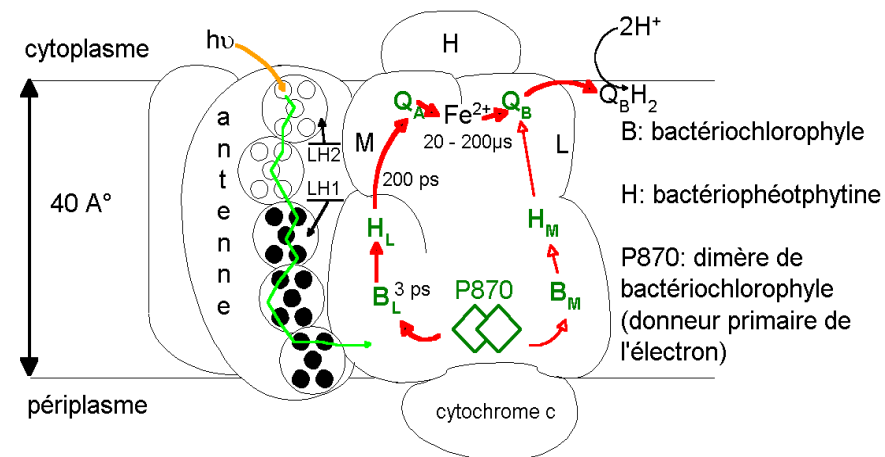
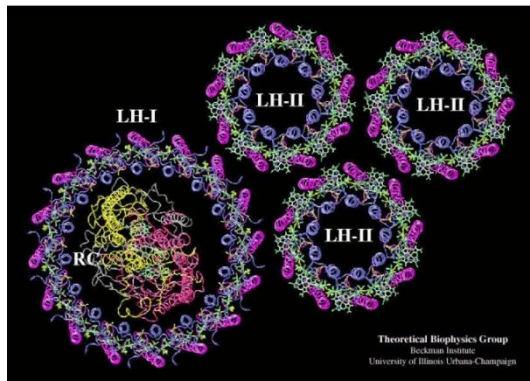
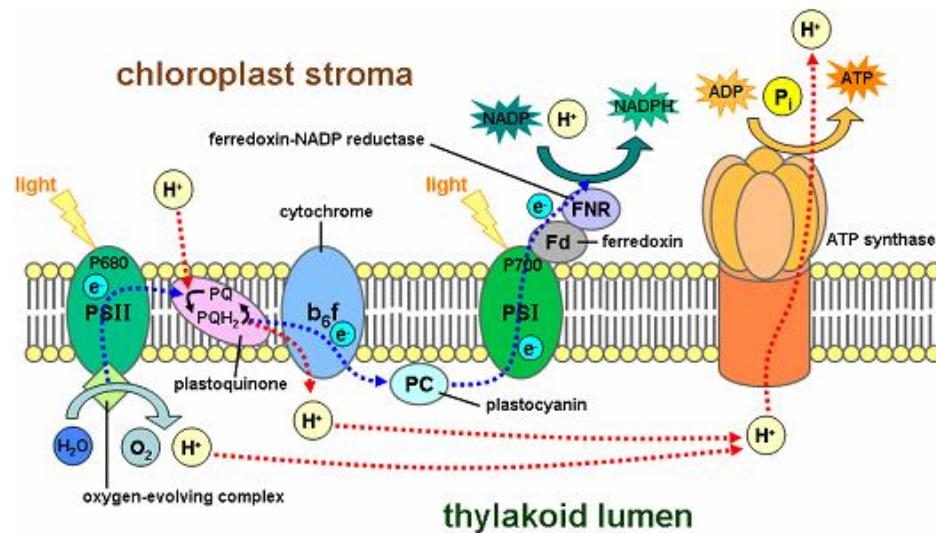
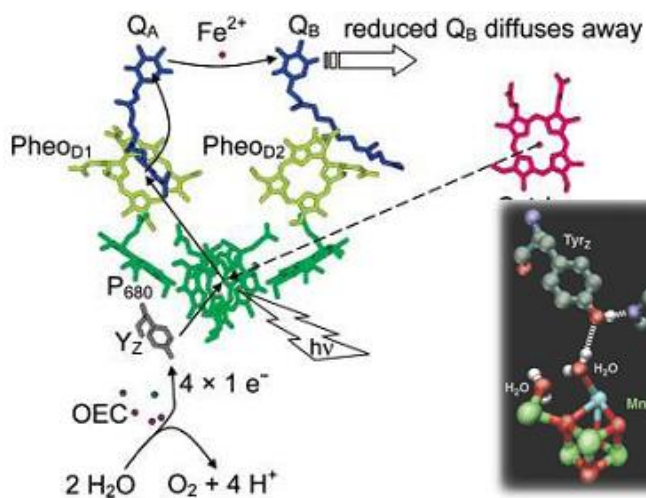
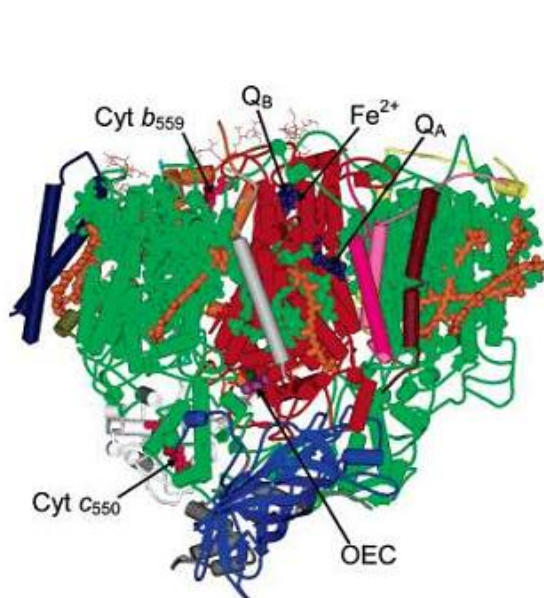


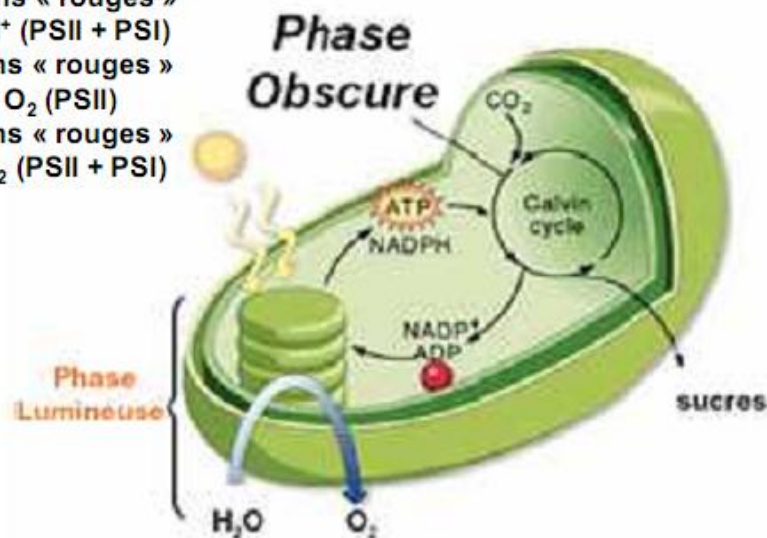
Schéma du centre réactionnel d'une bactérie pourpre



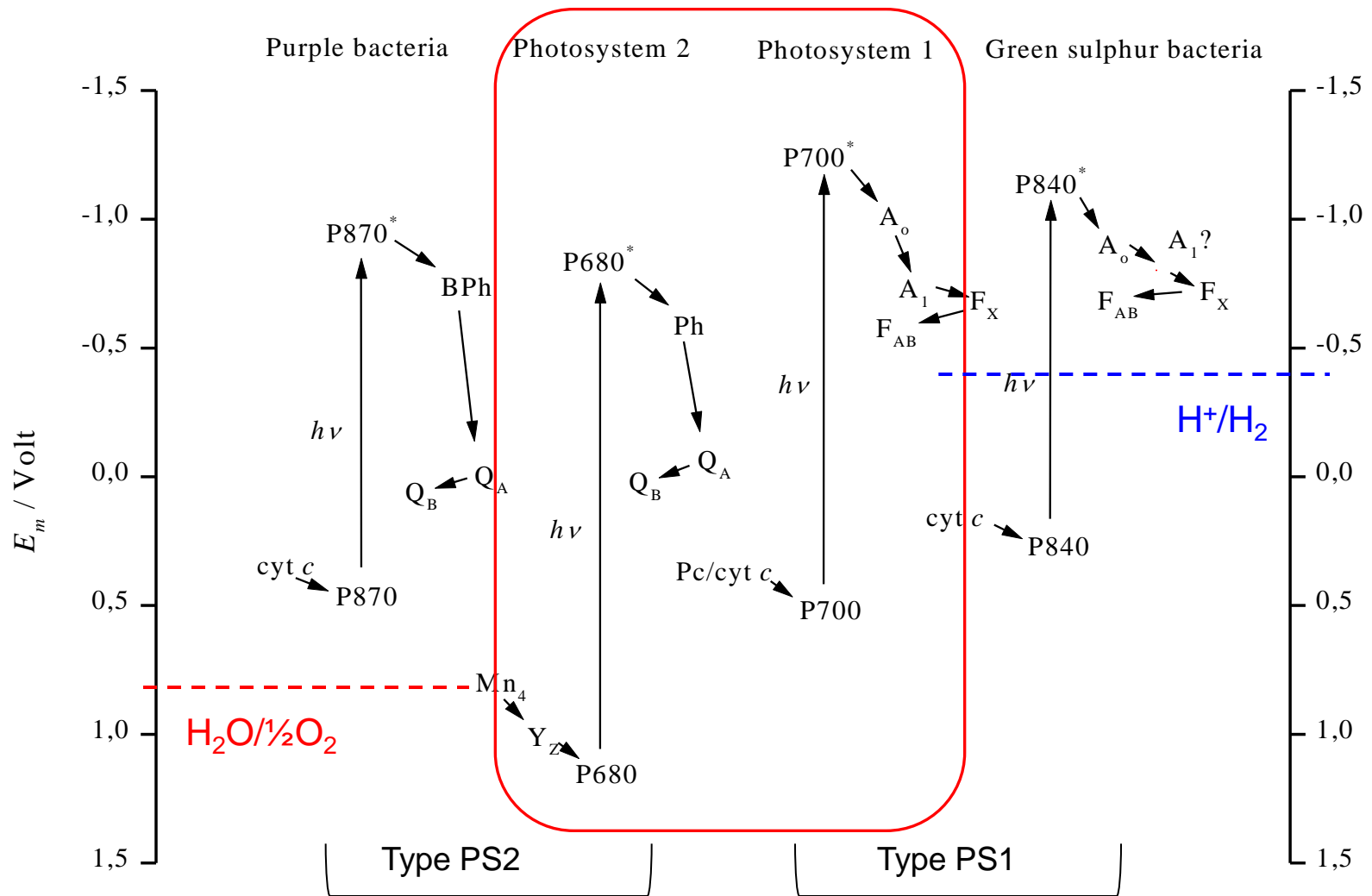
Photosynthèse des plantes: production d'oxygène



2 photons « rouges »
 par e^-/H^+ (PSII + PSI)
 4 photons « rouges »
 par O_2 (PSII)
 8 photons « rouges »
 par CO_2 (PSII + PSI)

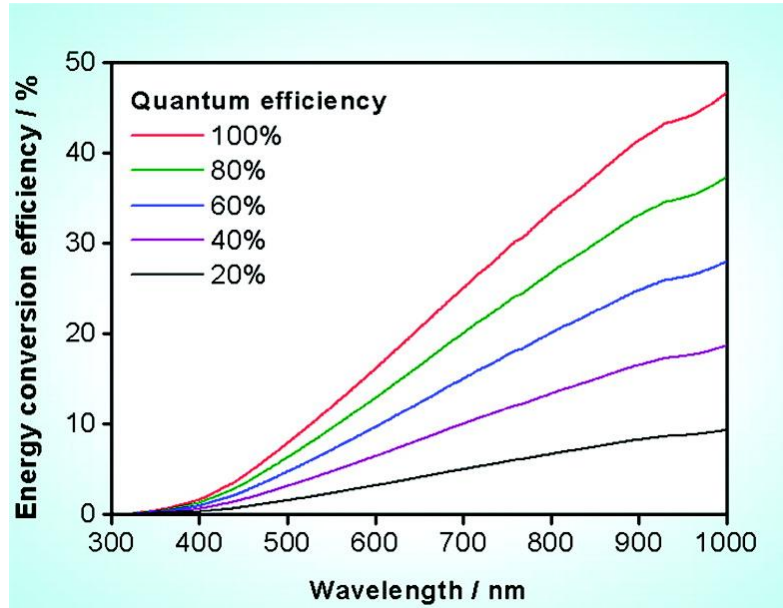


Energétique des transferts d'électron

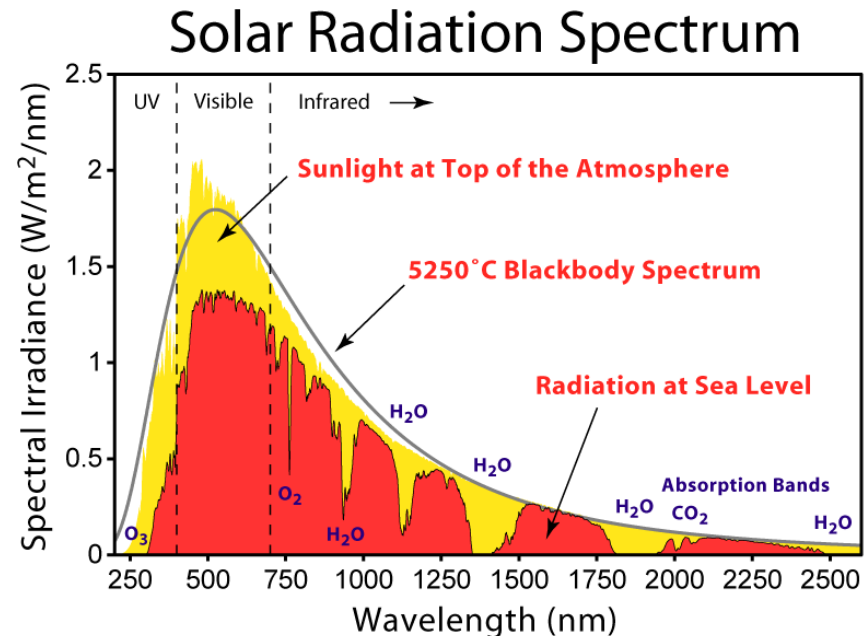


Conversion: Séparation de charge et stabilisation

Efficacité de conversion photocatalytique



Kazuhiko Maeda; Kazunari Domen; *J. Phys. Chem. Lett.* **2010**



Il faut distinguer efficacité **quantique** et **énergétique**.
En pratique, c'est l'efficacité énergétique qui compte.

$$E_{\text{out}}/E_{\text{in}}$$

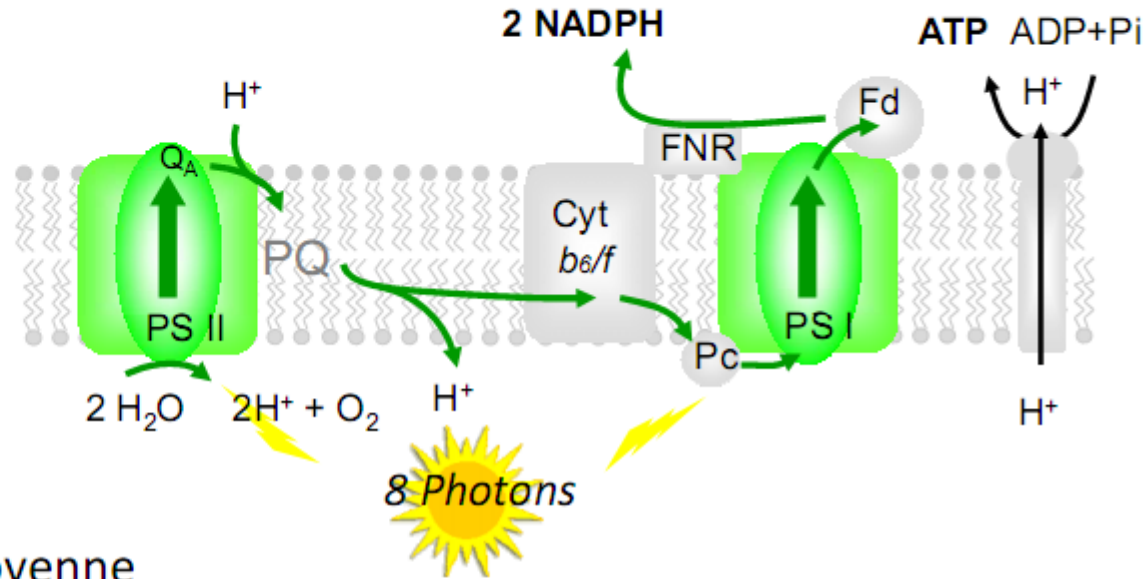
Les limites thermodynamiques de la photosynthèse



énergie atomique • énergies alternatives

Cycle Photosynthétique de Réduction du Carbone

3 ATP
2 NADPH / CO_2
ATP/NADPH ratio : 1,5

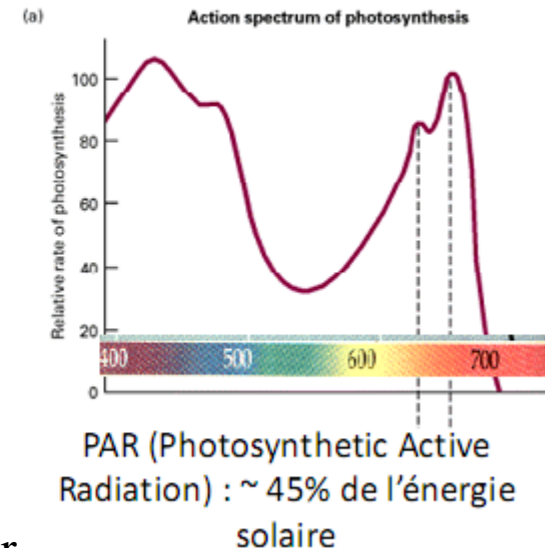


Photons PAR 217 KJ. mole⁻¹ en moyenne

1 mole CO_2 fixée est équivalente à 475 KJ (1/6 mole glucose)

Conversion théorique maximale du PAR en énergie chimique (biomasse) : $475 \text{ KJ} / (217 \times 8 \text{ KJ}) = 27\%$

Conversion photosynthétique maximale : $27\% \times 45\% = 12\%$



Gilles Peltier

Quelques rendements



Photosynthèse: rendement 0.2-2%

Au niveau mondiale fixation de 10^{11} tonnes de carbone / an
Puissance Photosynthèse 125 TW

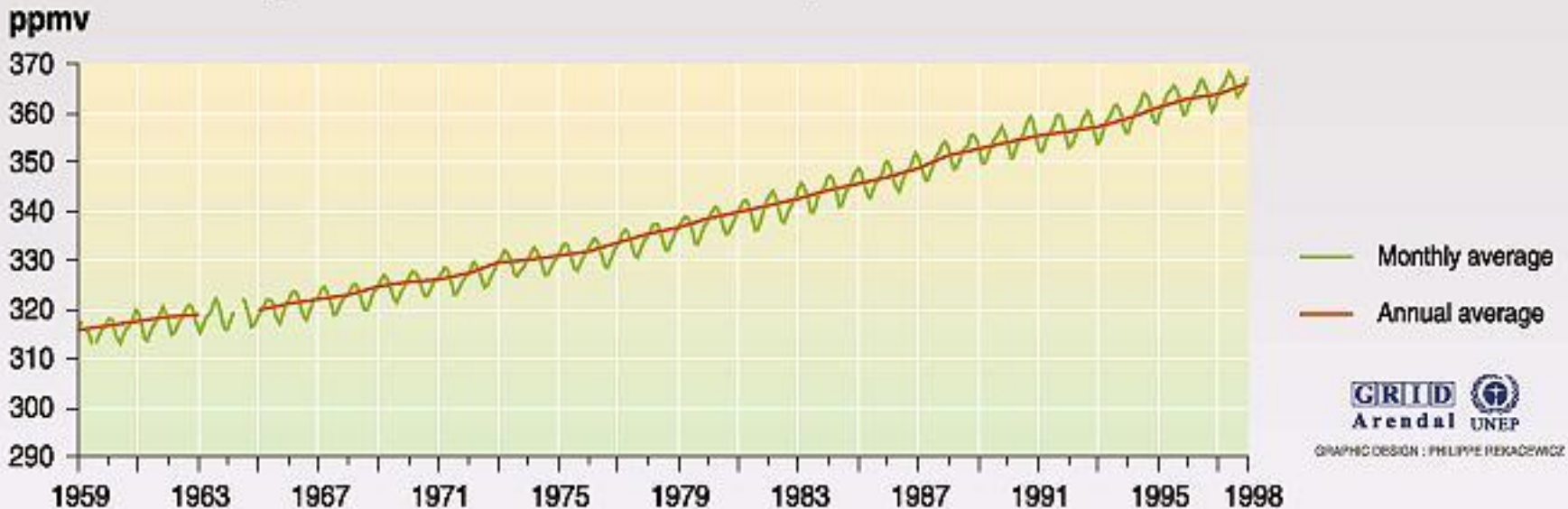
Forêt 1 ha: 12 t matière organique / an (64 MWh)

Champ de maïs: 5-6% (conditions optimales)
600 kg matière sèche/ha/an (10 T/ha/an)

Effet de la photosynthèse sur la concentration de CO₂



CO₂ concentration in the atmosphere: Mauna Loa curve



GRID Arendal UNEP
GRAPHIC DESIGN : PHILIPPE HEKACOWICZ

Source : Scripps institution of oceanography (SIO), University of California, 1998.

Mesuré à une altitude de 4,000 mètres au dessus de la pollution locale.
La variation annuelle est due au captage de CO₂ par la photosynthèse au printemps dans l'hémisphère nord.



Progrès énorme depuis 50 ans

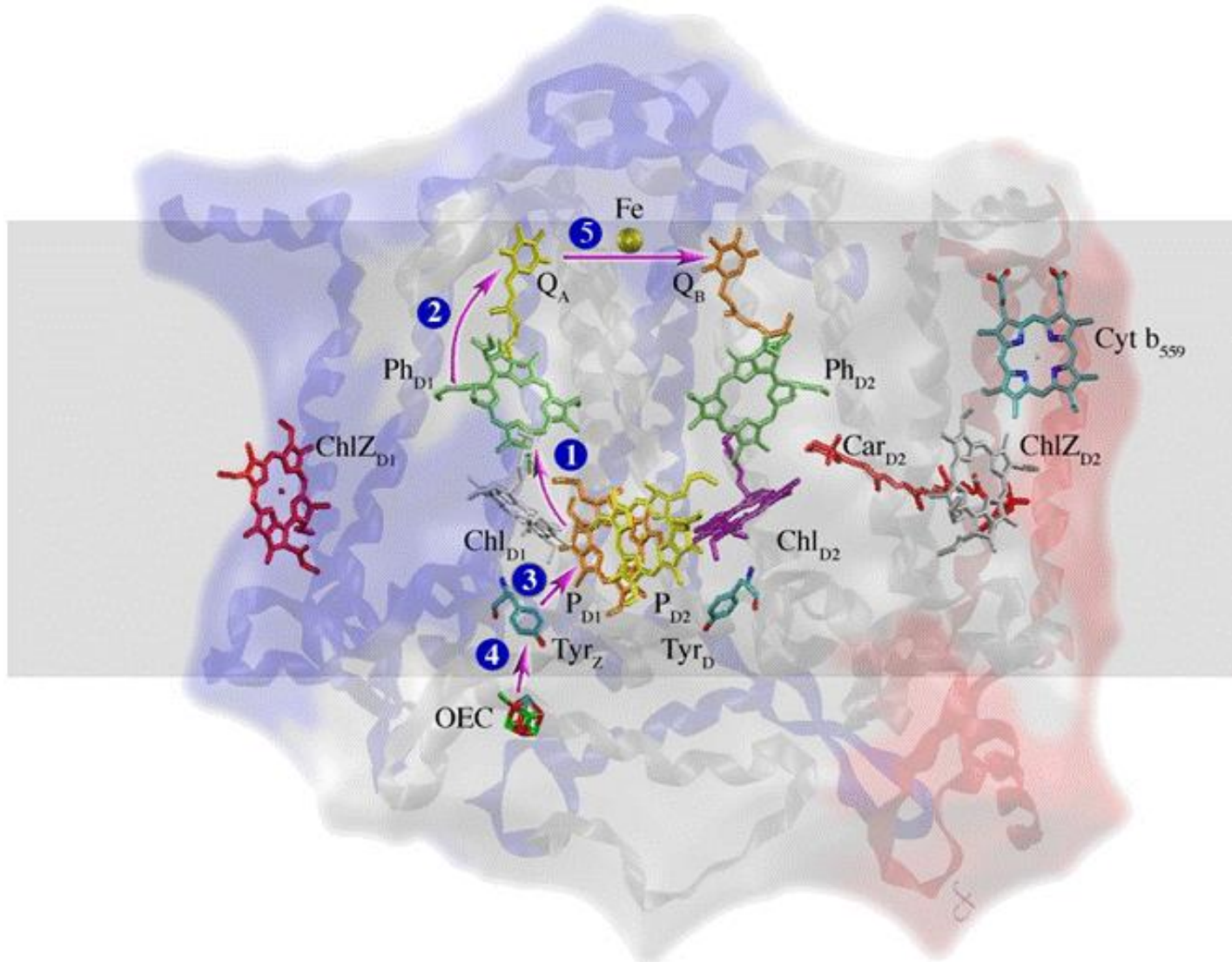
On connaît en détail

Structures, dynamiques, énergétique...

Le grand énigme qui reste:

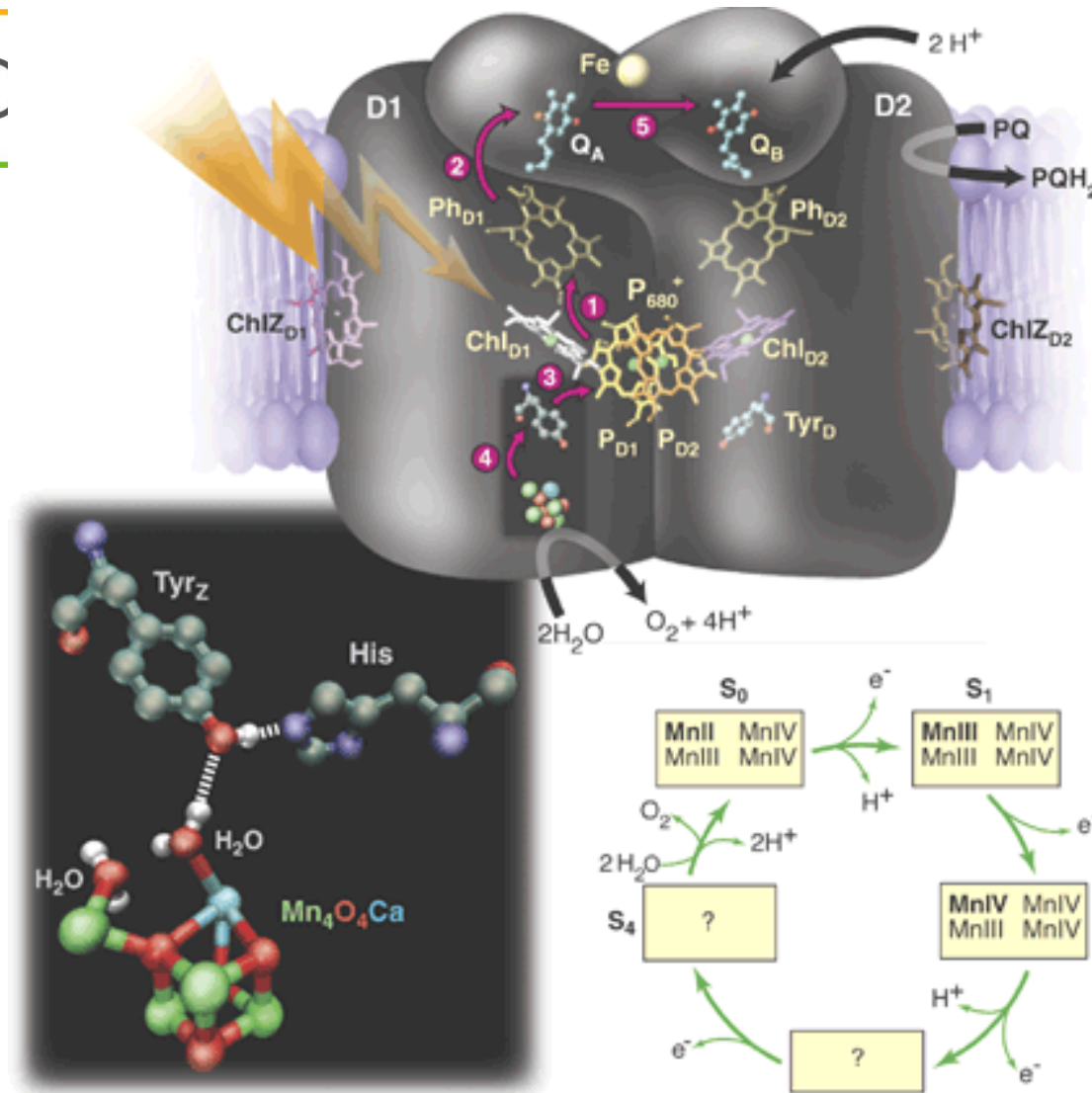
Mécanisme de l'oxydation de l'eau

Photosystème 2: l'enzyme qui a changé le monde



PS 2 – seul catalyseur efficace pour l'oxydation de l'eau

cea



à Saclay :
 Culture cyanobactéries
 Purification
 Mutagénèse
 Structure rayons X
 Ca → Sr
 RPE, états transitoires

Le potentiel des énergies alternatives



Consommation actuelle : 13 TW, 30 TW en 2050

Il nous faut remplacer **10-20 TW** par des énergies propres (carbone-neutres).

Nucléaire : faisable mais 10 TW = 10000 centrales dans les 50 années à venir (~1/jour)

Hydroélectrique : potentiel 1.5 TW (0.6 TW actuellement).

Eoliennes : 2 TW

Biomasse : 20 TW=30% des terres en culture intensive (3 TW actuellement)

Solaire: **600 TW** (sur 120 000 TW) (photosynthèse actuellement: 125 TW)

renouvelables

chiffres au niveau mondial, source: Nathan S. Lewis

L'énergie solaire



est diluée -> il faut de la **surface** pour la capturer
est intermittente -> il faut la **convertir et stocker**

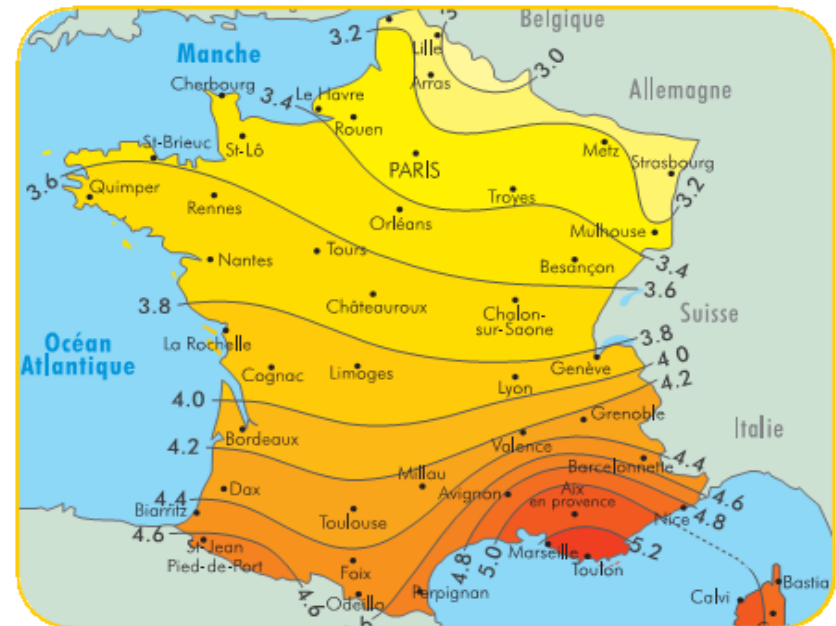
Ensoleillement : valeur max environ 1000 W/m^2

Energie moyenne 3 -5 kWh/m²/jour
(moyennes annuelles).

Photovoltaïque : **rendement 15 %**
(→ puissance électrique 150 Wc/m^2)

Production photovoltaïque
0,33 - 0,5 kWh/m² journalière
120-182 kWh/m² annuelle

Pour une installation de **20 m²** (3 kWc)
6,5 - 10 kWh journalière
2400 - 3640 kWh annuelle.



Moyennes annuelles de l'énergie reçue sur une surface orientée au sud et inclinée d'un angle égal à la latitude (en kWh/m²/jour)

Source : Atlas Européen du rayonnement solaire



Consommation énergie

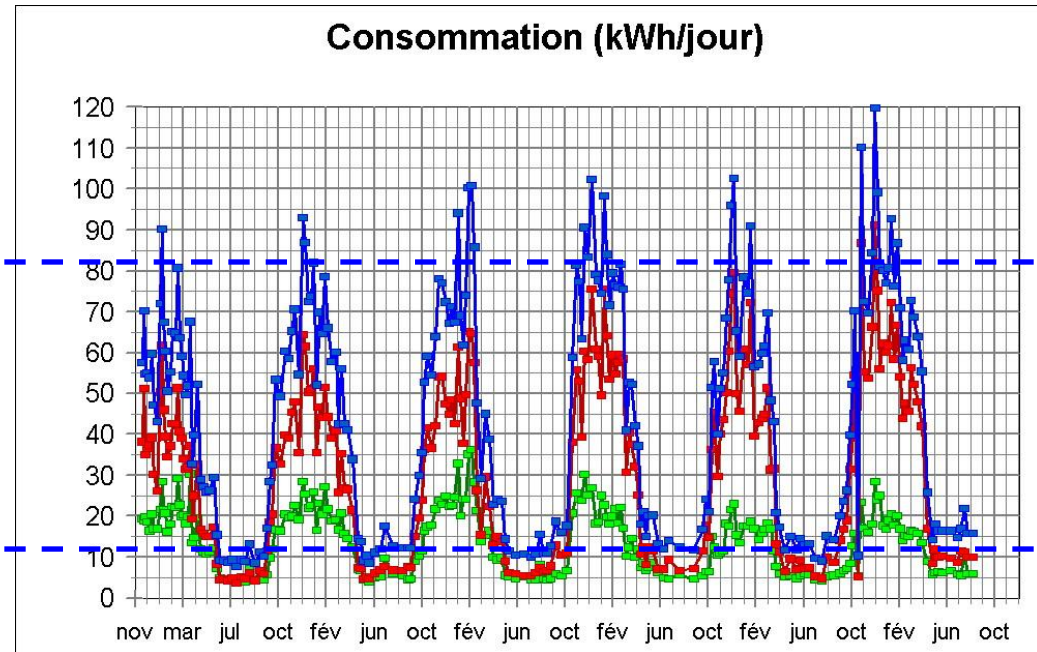


Ex. Résidentiel :

Hiver: 80 kWh/j

Été : 13 kWh/j

Moyenne : 38 kWh/j

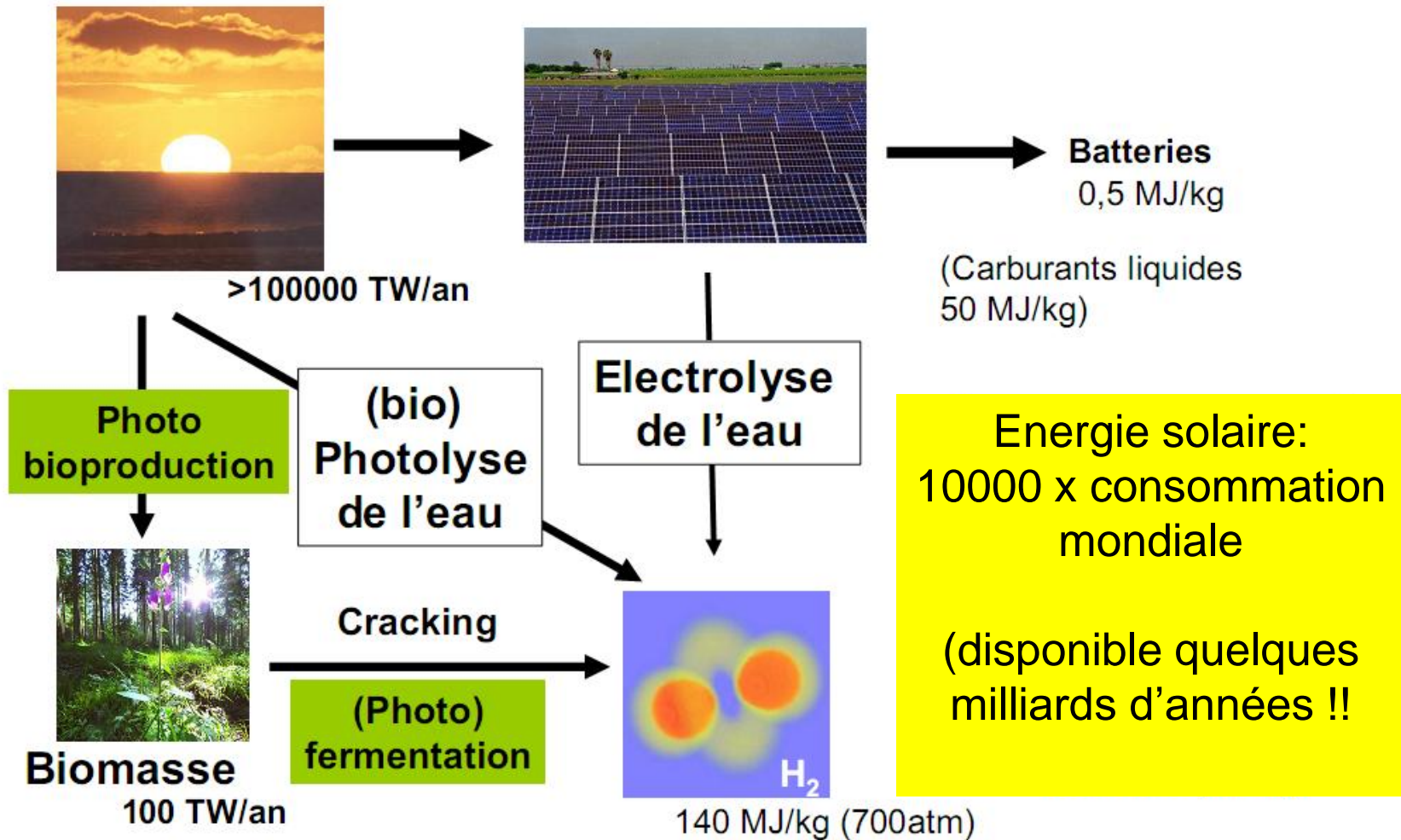


Consommation annuelle : 14 000 kWh, dont 66 % chauffage
(4700 kWh sans chauffage)

Avec un rendement 10% : env. 100 m² nécessaire, 32 m² sans chauffage

Exemple voiture: 15000 km/an → 1000 L/an → 10000 kWh (≈ Maison)

Stockage de l'énergie solaire

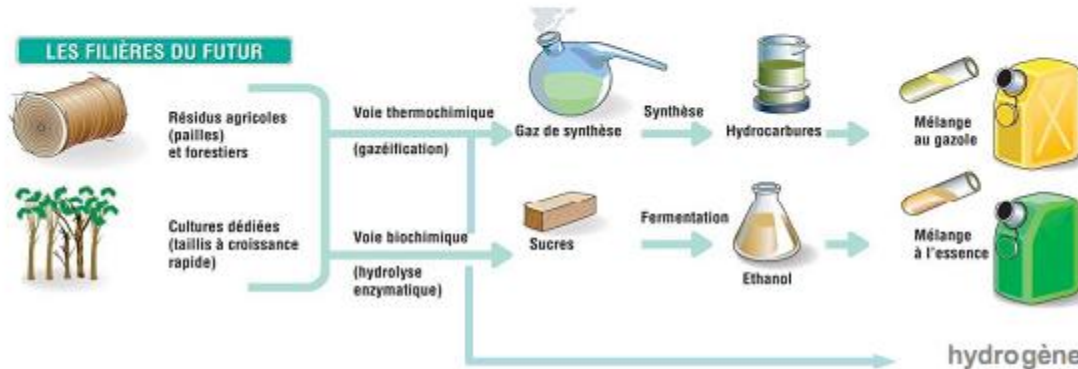


Les biocarburants de 2^{ème} et 3^{ème} générations



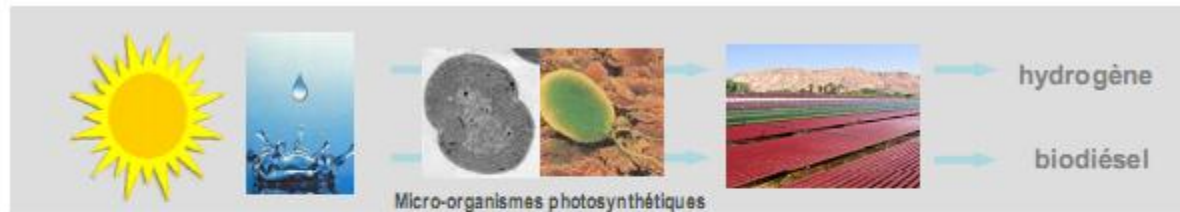
Un enjeu pour la société et pour la recherche

2G
Biomasse
ligno-cellulosique

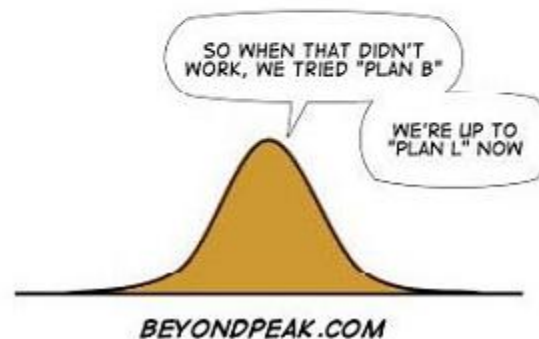


*Pilotes
Démonstrateurs*

3G
Micro-organismes
photosynthétiques



Recherche



Gilles Peltier

Production de microalgues : avantages et inconvénients



énergie atomique • énergies alternatives

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Productivité surfacique élevée - Composition de la biomasse flexible - Peu de compétition avec la production alimentaire et les ressources en eau - Confinement possible - Recyclage de déchets urbains (N, P, S,..) ou industriels (CO₂) 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas de domestication des espèces (adaptation aux systèmes de cultures) - Recours aux conditions de carence pour induire l'accumulation de produits riches en énergie - Systèmes de cultures et de récolte coûteux

	Microalgues	Plantes C4 (sorgho, maïs,...)	Plantes C3
Productivité maximale (T.ha ⁻¹ .an ⁻¹) Rendement photosynthétique	150-180 ~6 - 7.5 %	60 ~2.5 %	30 ~1.25 %
Productivité observée (T.ha ⁻¹ .an ⁻¹) Photobioréacteurs Champ	50-70	10-30	10-15

150 T.ha⁻¹.an⁻¹ = 40 g. m⁻².s⁻¹ (sur 365 jours)

/j !

D'après « EPOBIO project » University of York – Sept 2007

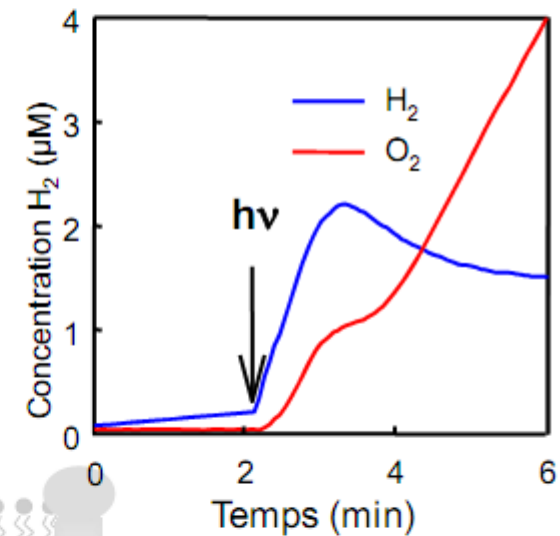
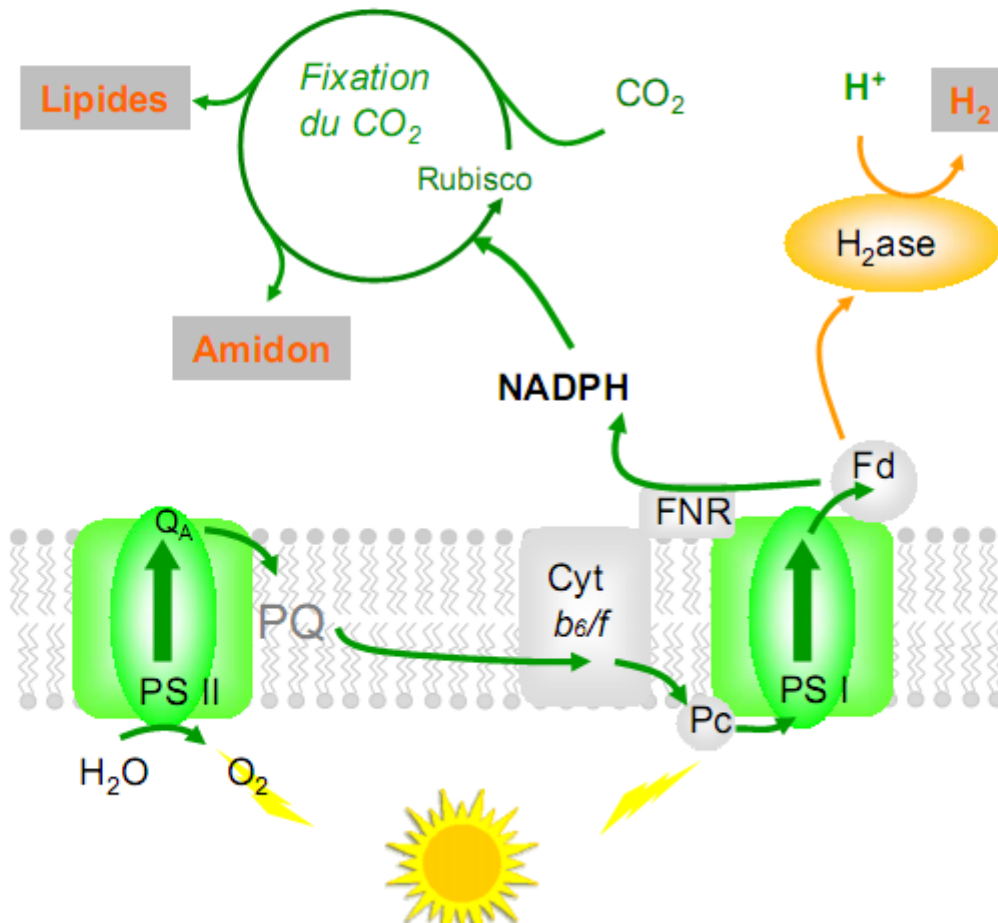
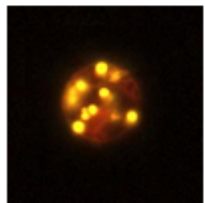
Gilles Peltier

Des microalgues pour la production d'énergie



énergie atomique - énergies alternatives

- Production d'hydrogène (très efficace, mais transitoire)
- Conversion de la biomasse en méthane
- Production de lipides et de biodiesel (jusqu'à 60% du poids sec)
- Production de composés HVA (ingénierie pour la chimie verte)

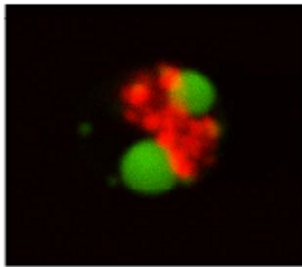


Gilles Peltier

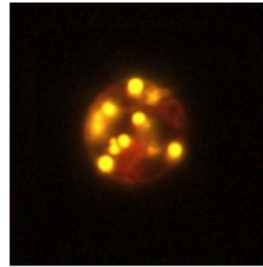
Potentiel pour la production de biodiesel et verrous



énergie atomique • énergies alternatives



Neochloris oleoabundans



Chlamydomonas reinhardtii



Certaines microalgues accumulent jusqu'à 60% de leur poids sec en lipides

	Microalgues	Plantes C4	Plantes C3
Productivité maximale (T.ha⁻¹.an⁻¹) Rendement photosynthétique	150-180 ~6 - 7.5 %	60 ~2.5 %	30 ~1.25 %
Productivité observée (T.ha⁻¹.an⁻¹) Photobioréacteurs Champ	50-70	10-30	10-15
Productivité en lipides potentielle (T. ha⁻¹.an⁻¹)	75-90		
Productivité en lipides observée (T. ha⁻¹.an⁻¹)	15-20	3	1.5
Coûts de production (\$.kg⁻¹)	0.4 - 40	0.04	0.04

*Verrous
Biologiques*

*Verrous
Technologiques*

Gilles Peltier

Identifier les gènes régulateurs clés



énergie atomique • énergies alternatives



Téosite

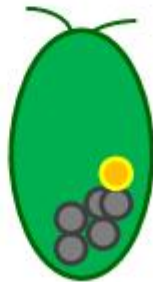


7 000 à 10 000 ans



Maïs

Huile ●
Amidon ●



Génomique, génétique



Biotechnologie
10-20 ans ?

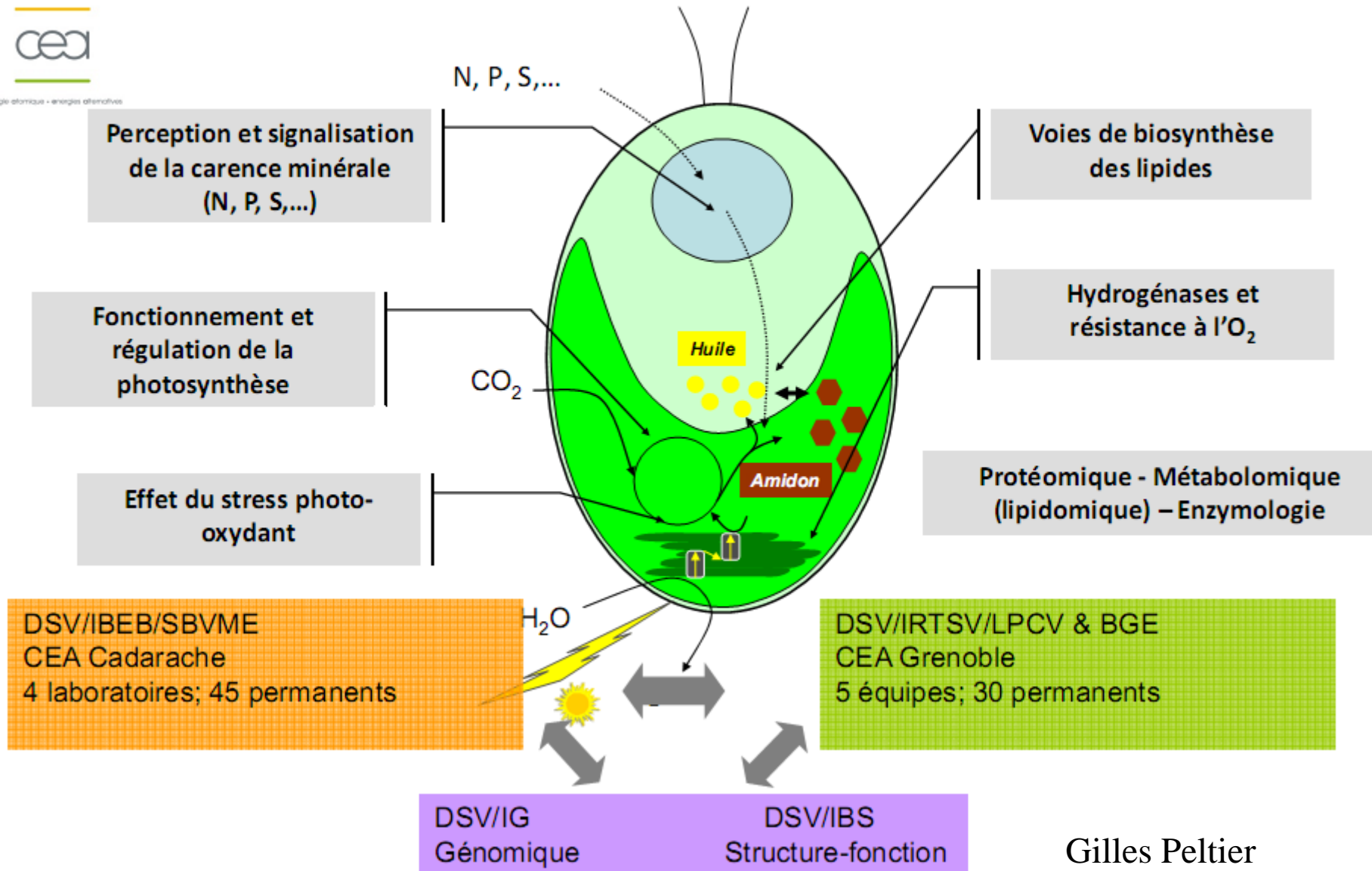


Gilles Peltier

Verrous et forces en présence à la DSV sur les mécanismes fondamentaux



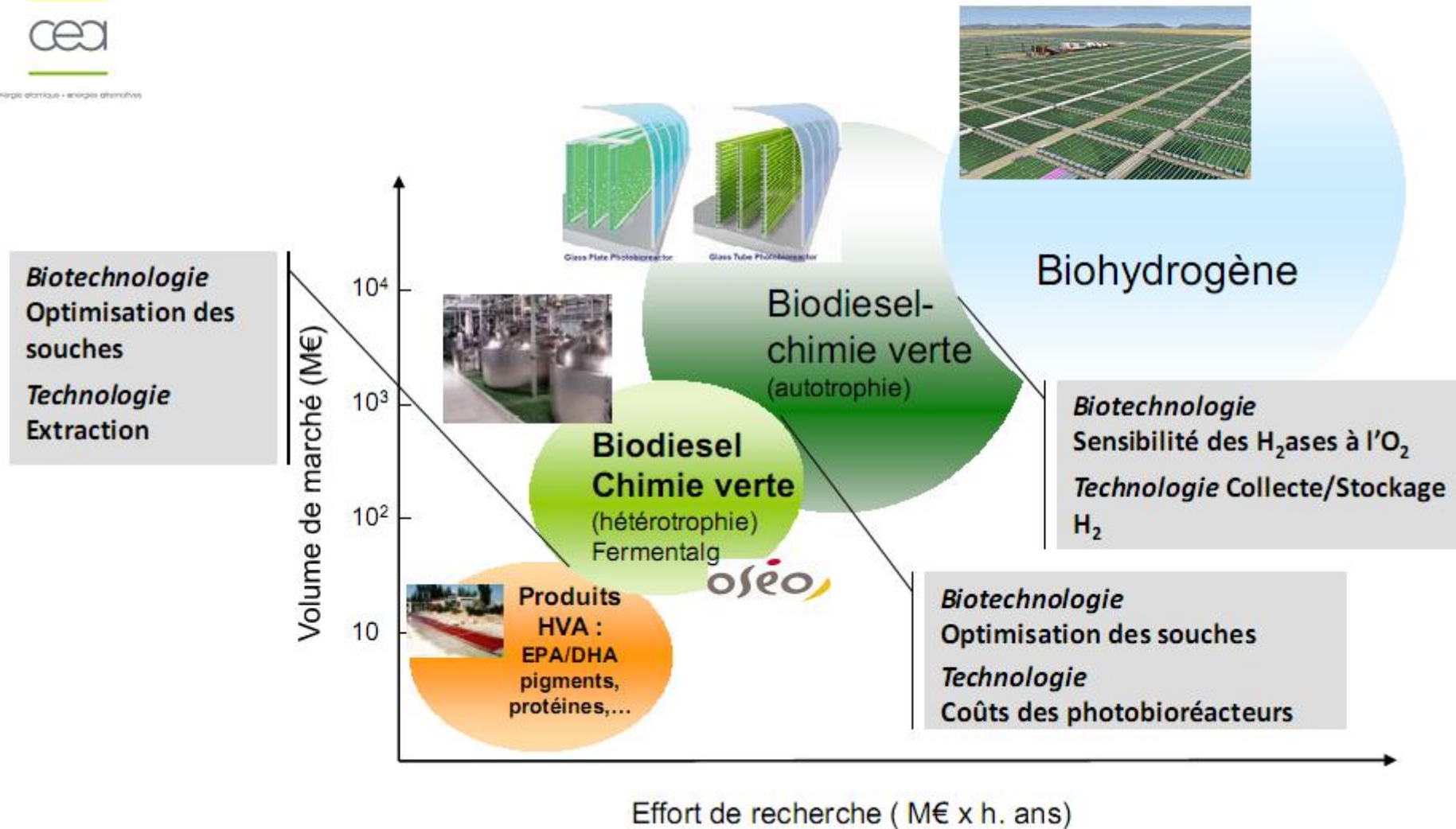
énergie atomique • énergies alternatives



Des marchés existants aux biocarburants : les verrous



énergie atomique • énergies alternatives



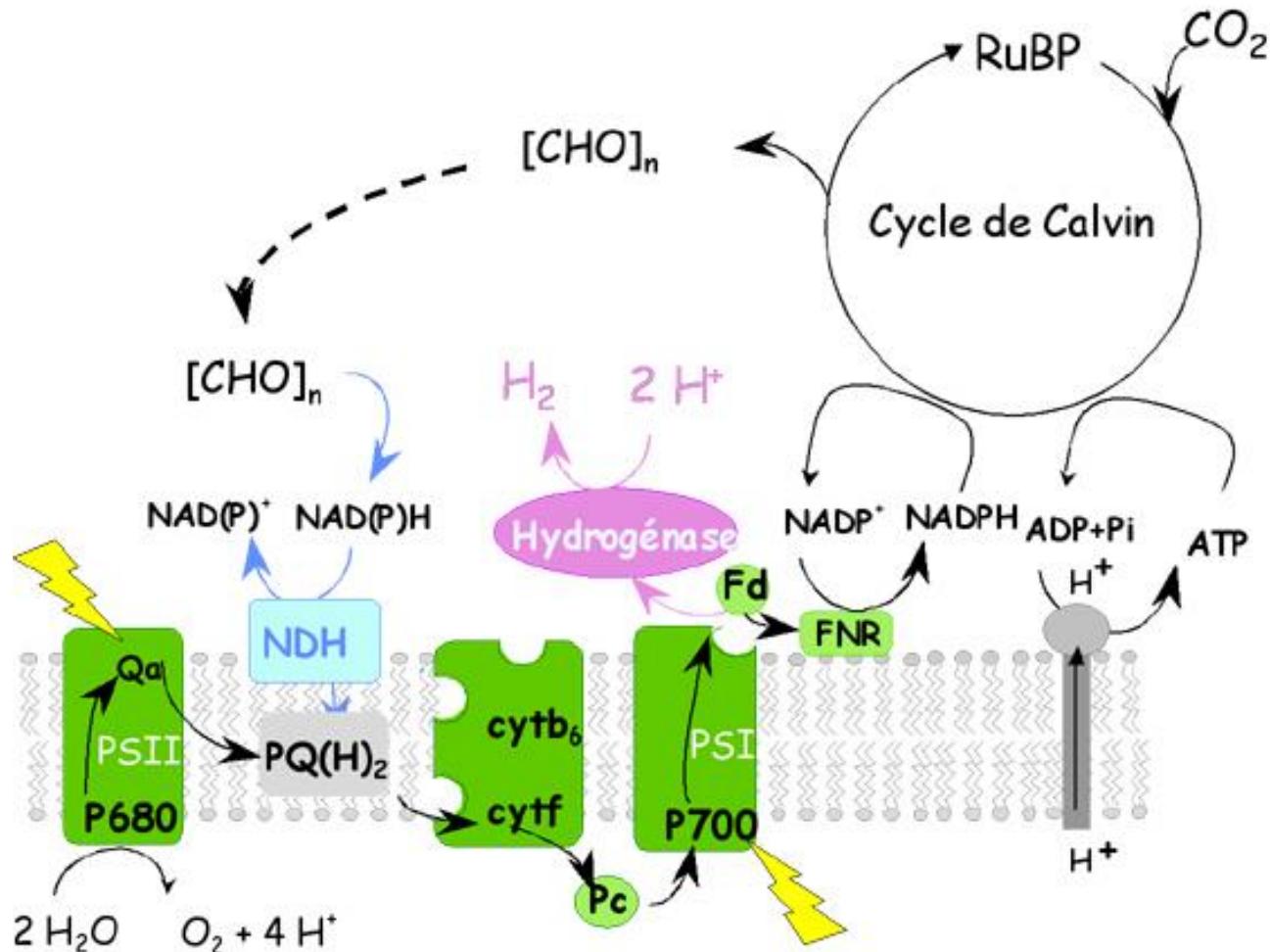
Gilles Peltier



État des lieux et propositions sur les filières
micro- et macro-algues en France
aspects scientifiques et techniques, marchés et
applications (180 p)

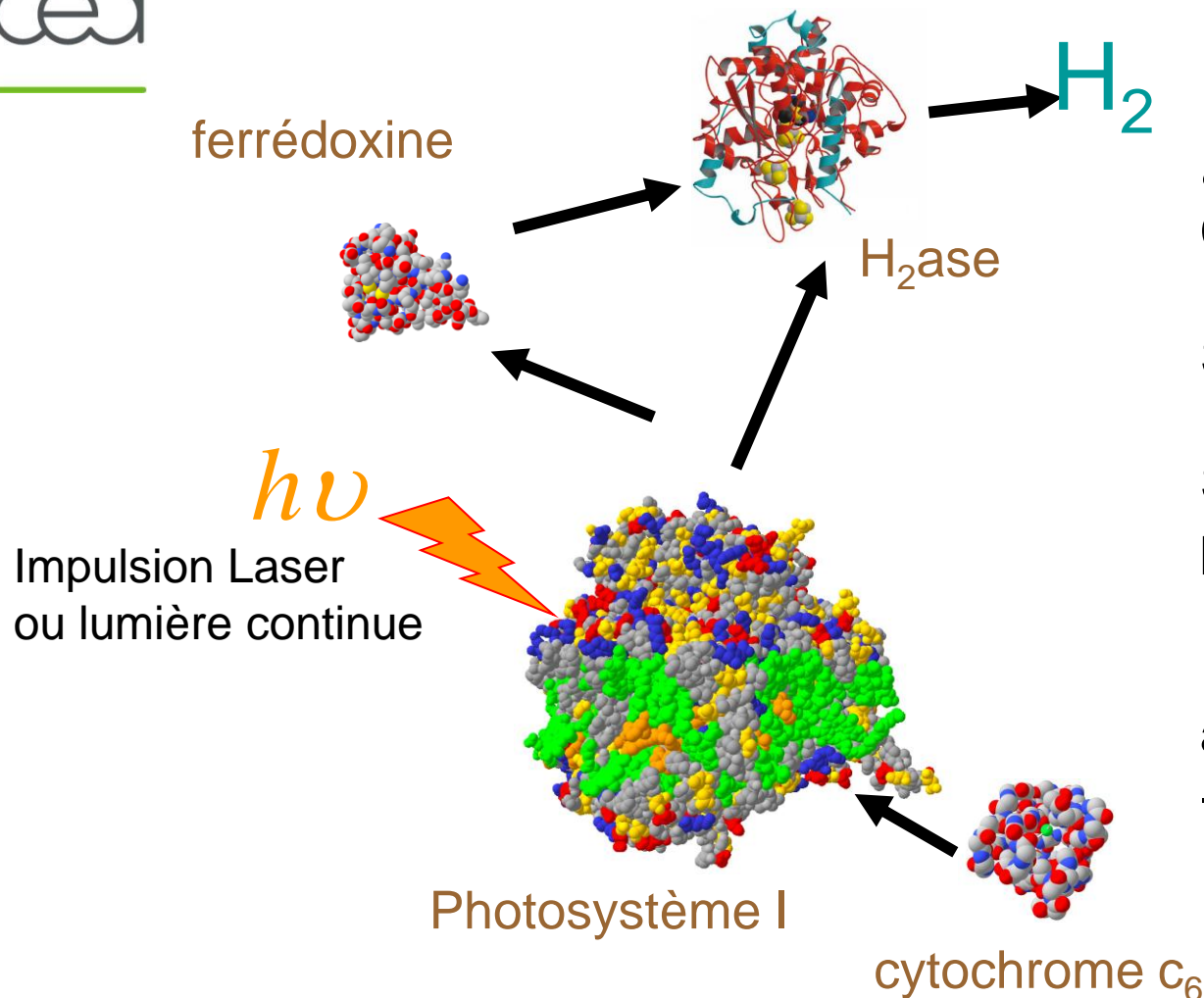
<http://adebiotech.org/>

Bioproduction d'hydrogène par les algues vertes



Comment optimiser la production d'hydrogène ?

Photoreduction d'hydrogénase par Photosystème I



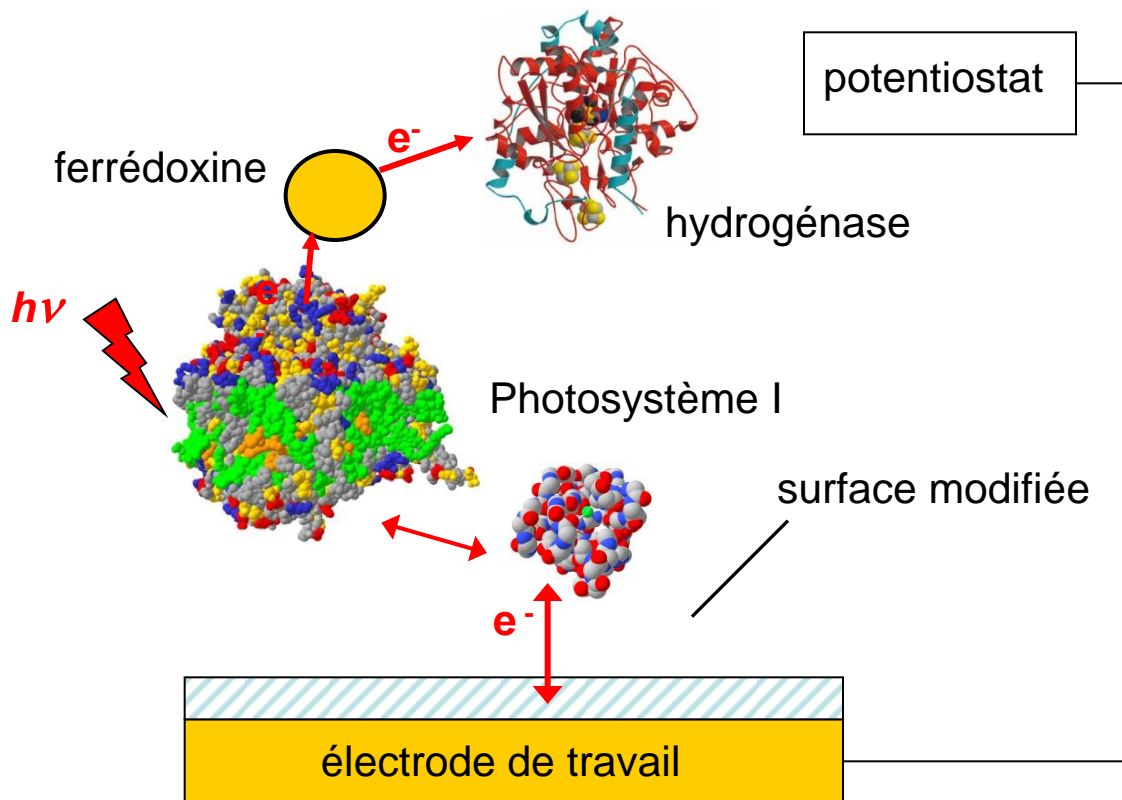
à Saclay:
Culture cyanobactéries
Purification protéines
Surexpression

Spectroscopies:
photolyse éclair, RPE,
...
Pb: H_2ase très sensible
à l'oxygène
-> boîte à gants !

Photoélectrocatalyse



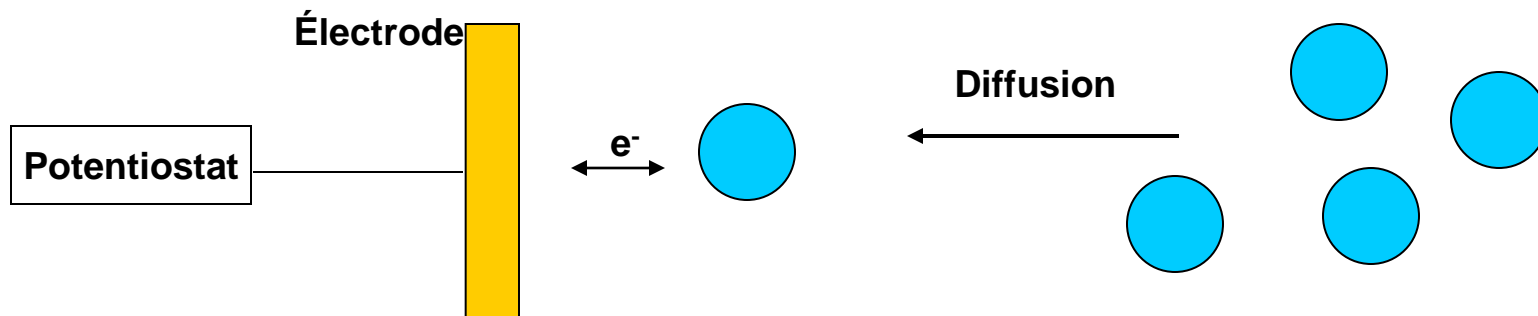
Modèle *ex vivo* pour étudier le couplage entre photosynthèse et production H_2 par reconstitution d'une chaîne de transfert d'électrons. Combinaison des protéines d'origine différents ou modifiées.



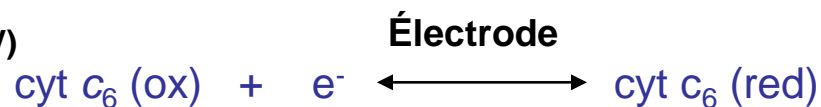
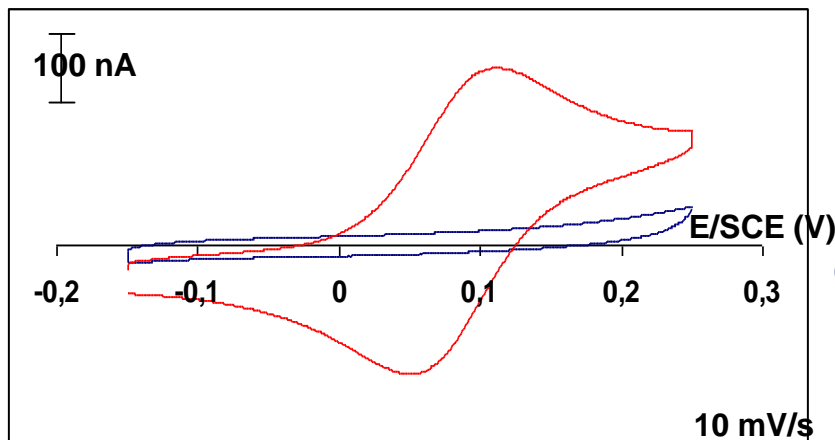
Outil : Électrochimie



- Exchange d'électron à la surface liquide-solide : électrodes métalliques

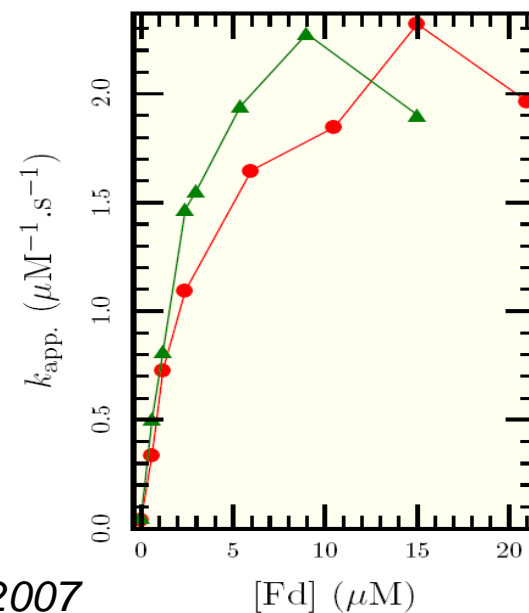
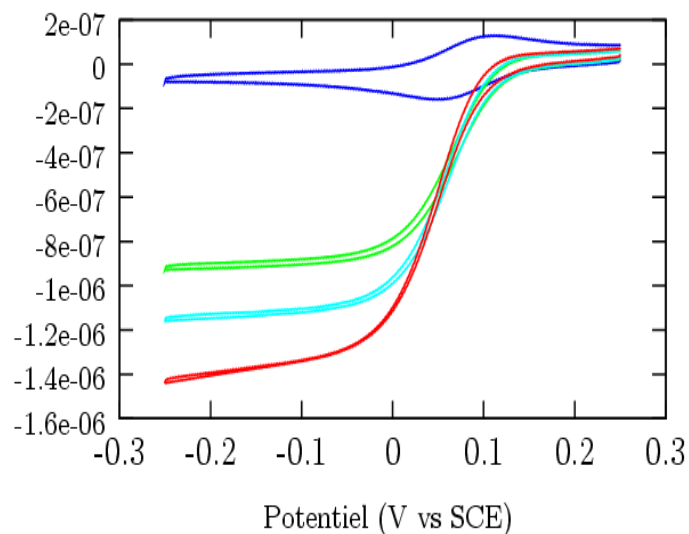
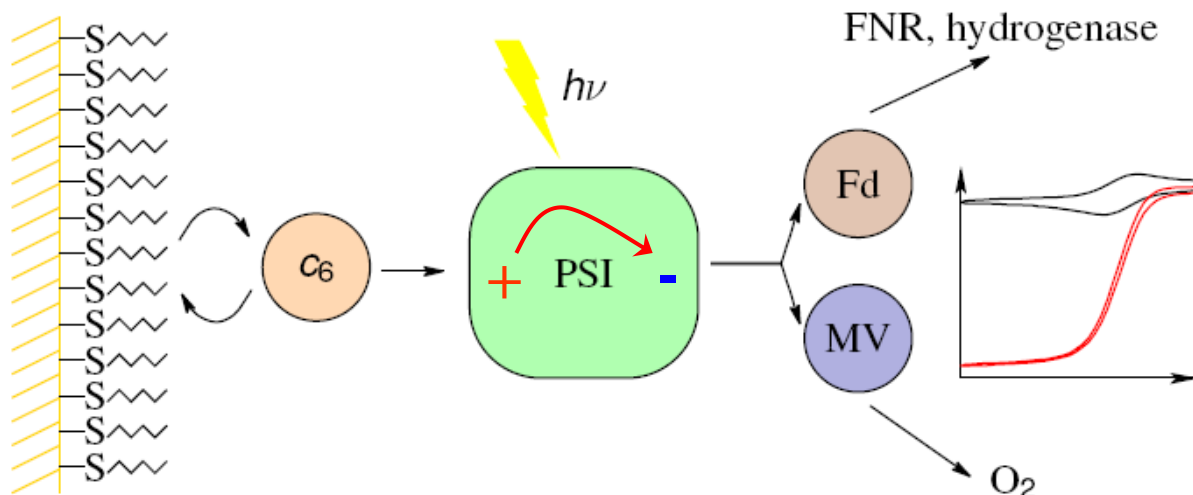


- **Voltammétrie cyclique** : balayage linéaire du potentiel E , enregistrement du courant ($i = f(E)$)



- Oxydation / réduction du $\text{cyt } c_6$ à la surface d'une électrode d'or modifié
- Choix du promoteur (réversibilité/stabilité): mercapto propanol

Photoréduction de l'hydrogénase

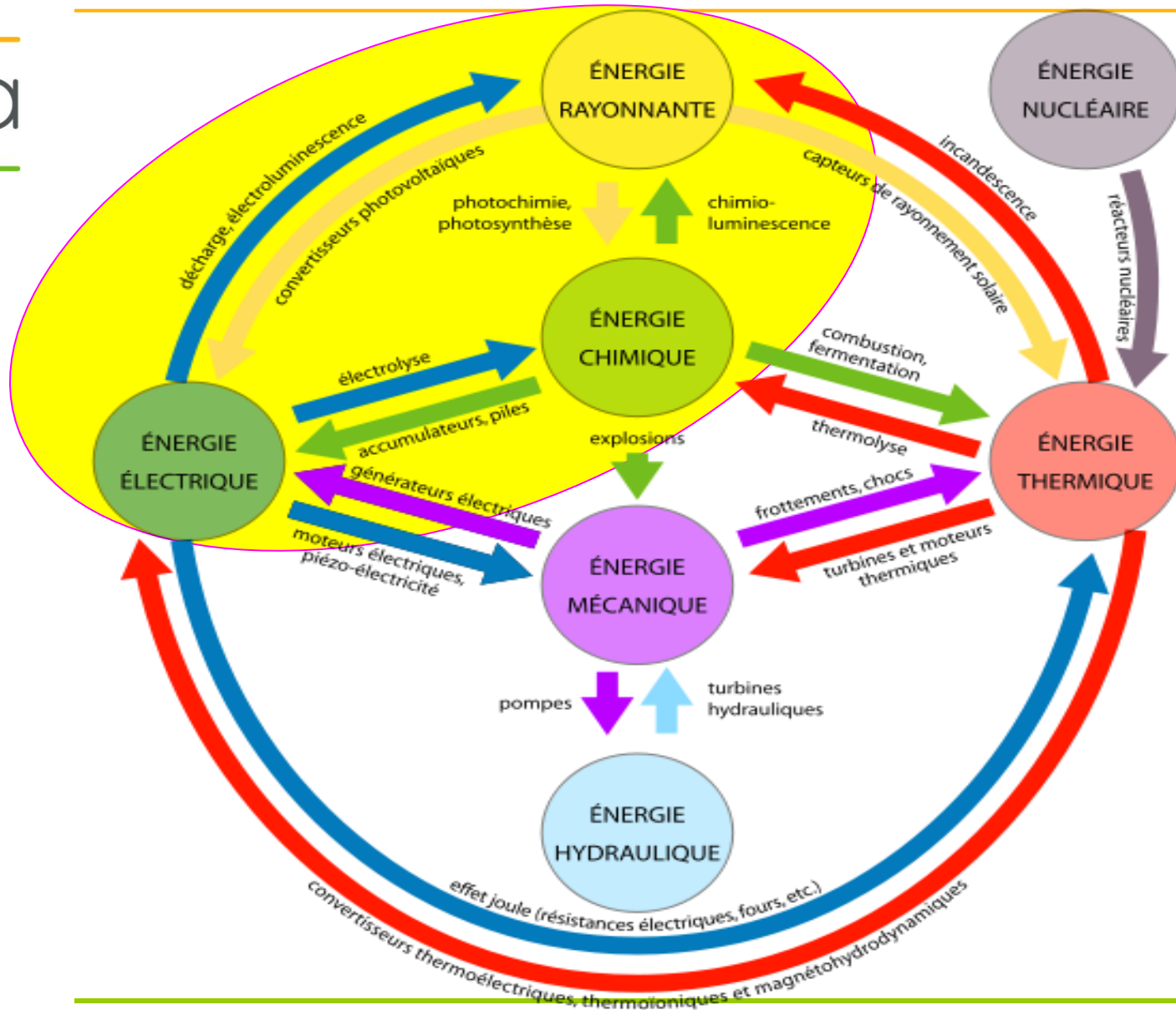


Obscurité
Fd = 2,4 μM

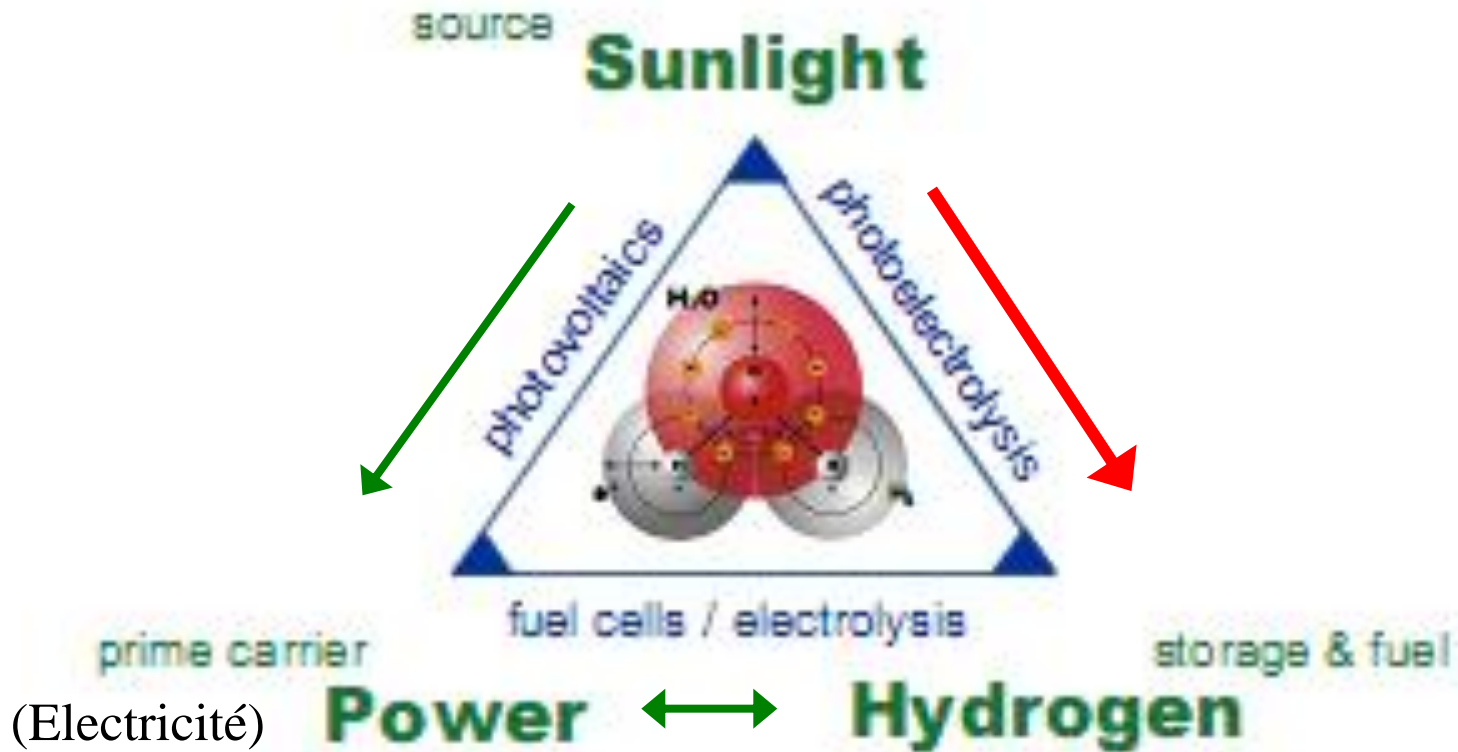
Fd = 6 μM
Fd = 15 μM

Fourmond et al. JACS 2007

Stockage de l'énergie solaire : Cycles énergies



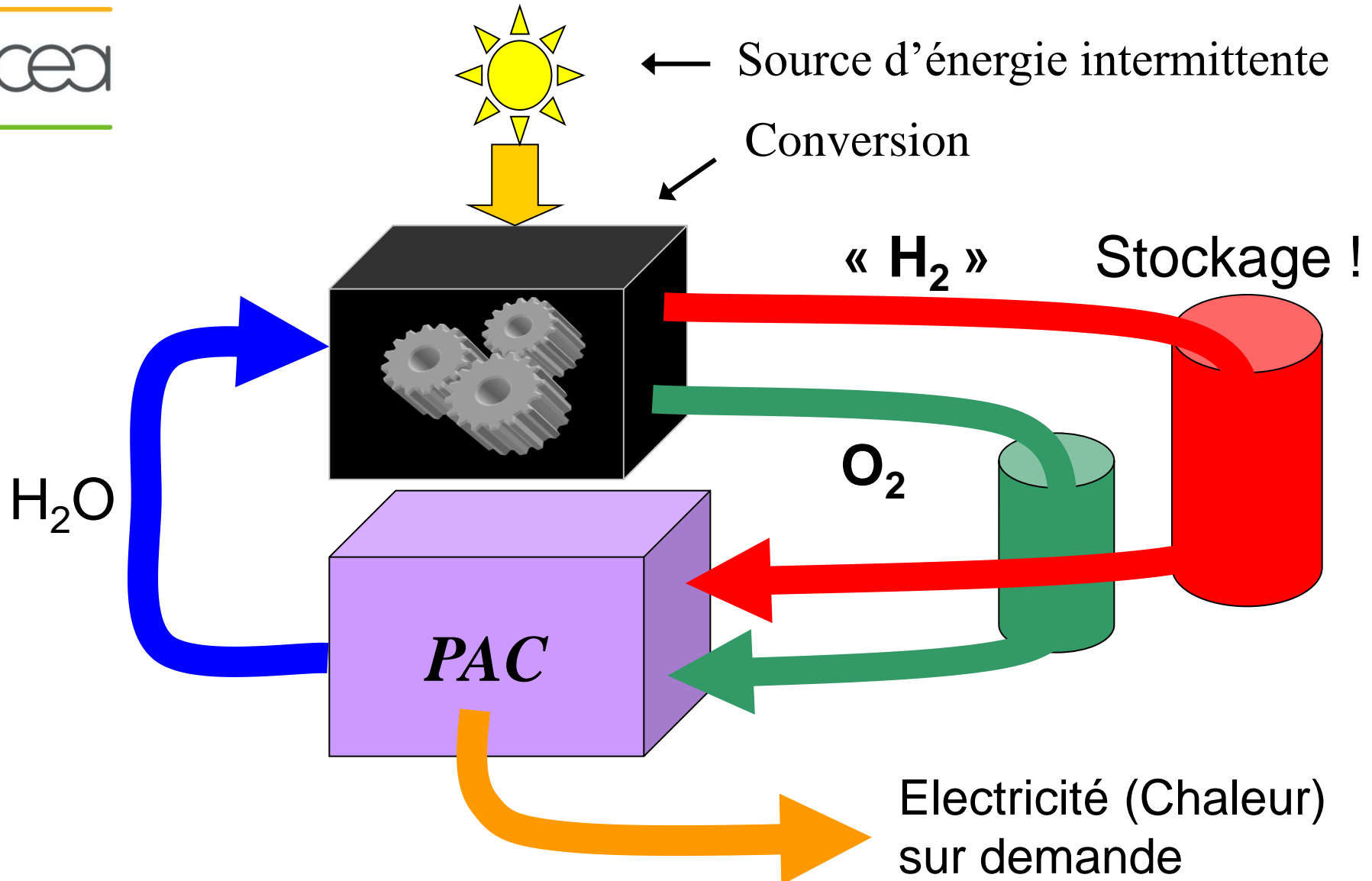
Triangle d'énergie du future (l'après pétrole)



Ultimately, in a post-fossil-fuel era, the sun will re-emerge as the total driving force to fully sustain life on earth, most likely with **electricity and hydrogen** as the two key energy carriers.

(Source: Luzzi, *Final report IEA-Hydrogen program*, 2004)

Photoproduction d'un carburant



Le problème du stockage du H₂

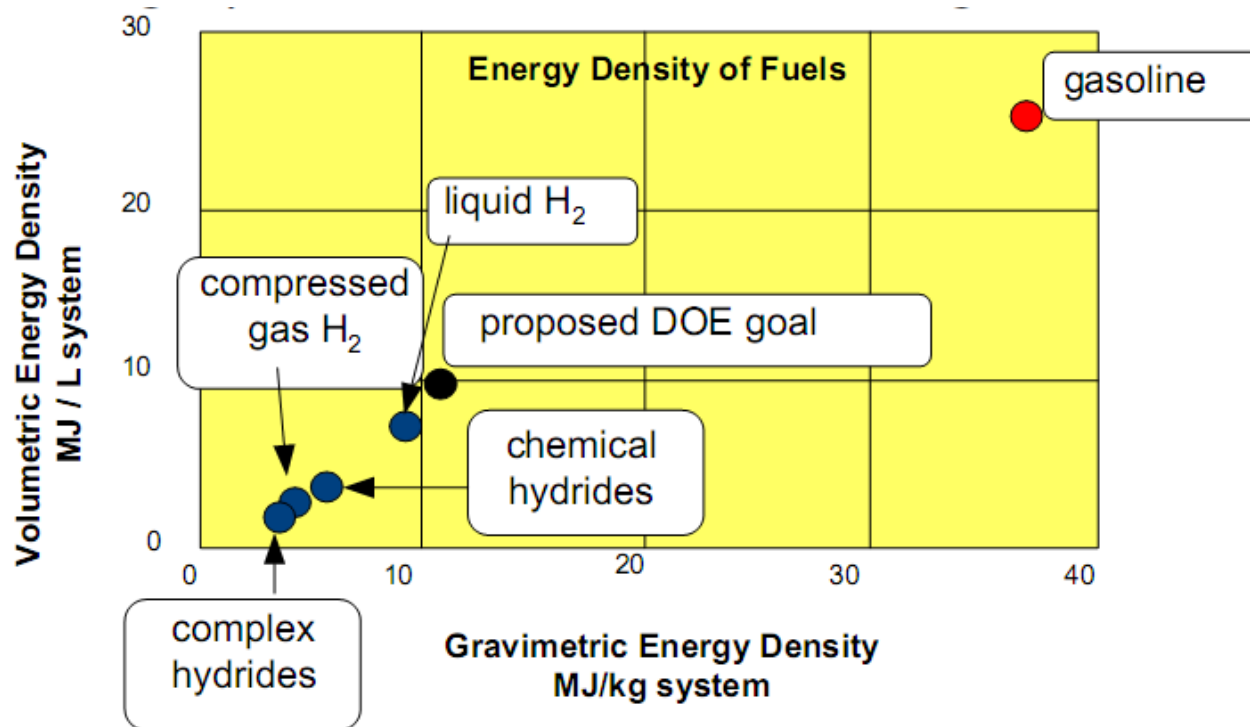


0.4 kWh/m²/j -> 120 L H₂(1bar)/m²/j (3 mL/s)

14 000 kWh/an -> 400 kg H₂

= 400 bouteilles 50 L @ 200 bar (1 pièce 25 m²)

Perte d'énergie pour compression : 10 %.



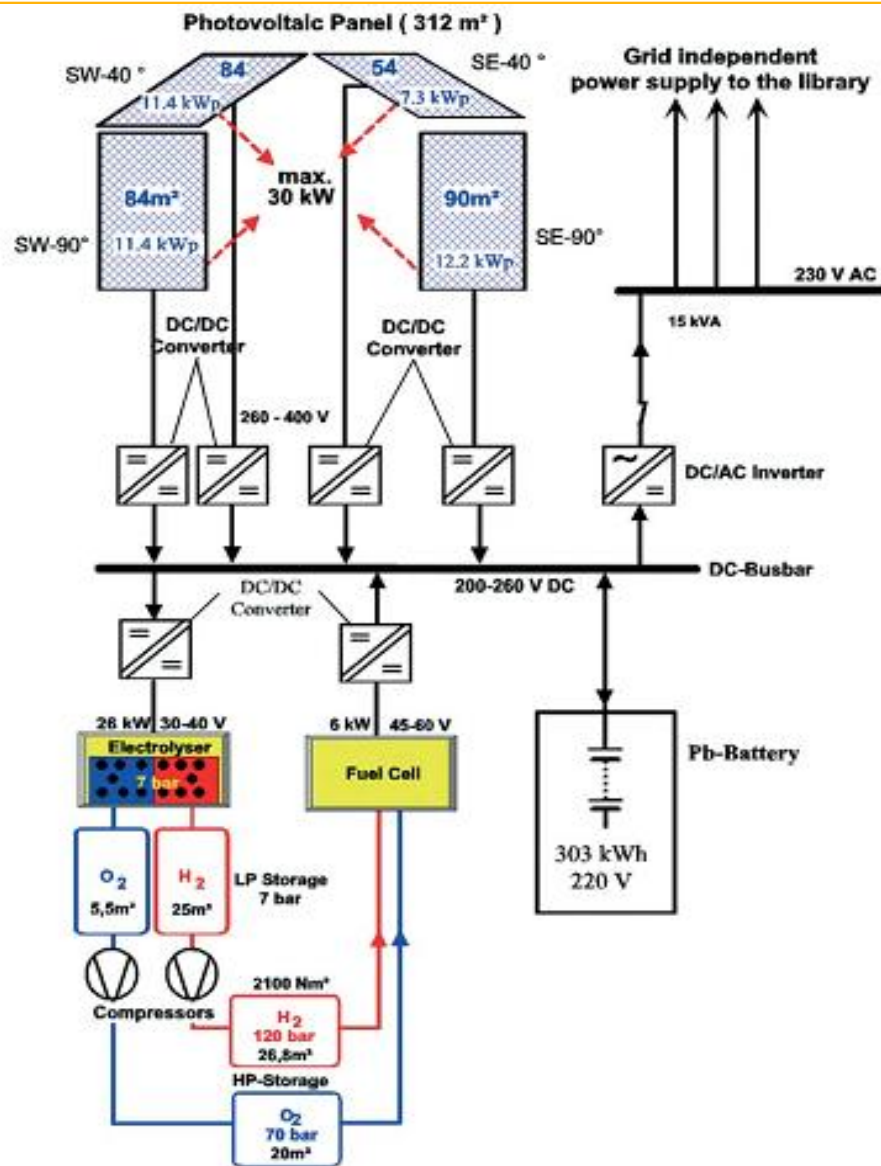
PV+électrolyseur: 10 ans d'expérience opérationnelle



Fig. 2. Photovoltaic arrays on top of the library building in four different orientations.

Rendement du système de stockage:
51-64%

Gosh et al. Solar Energy 2003



Stockage d'énergie solaire : PV + électrolyseur



Puissance = Surface * Rendement

Energie = Puissance * Temps

Système à 2 composants:

Rendement PV : 15 %

électrolyseur : 50-80 %

Rdmt prod. H₂: 7-12 %

Problème : Prix

❖ PV à base de silicium

❖ Catalyseurs pour électrolyseur

PV 2^{ème}/3^{ème} gén. (DSC)

Matériaux alternatifs Pt

Est-ce que un système intégré (photoélectrochimique)
peut être plus efficace et/ou moins cher ??

Système intégré PV/électrolyse



PERGAMON

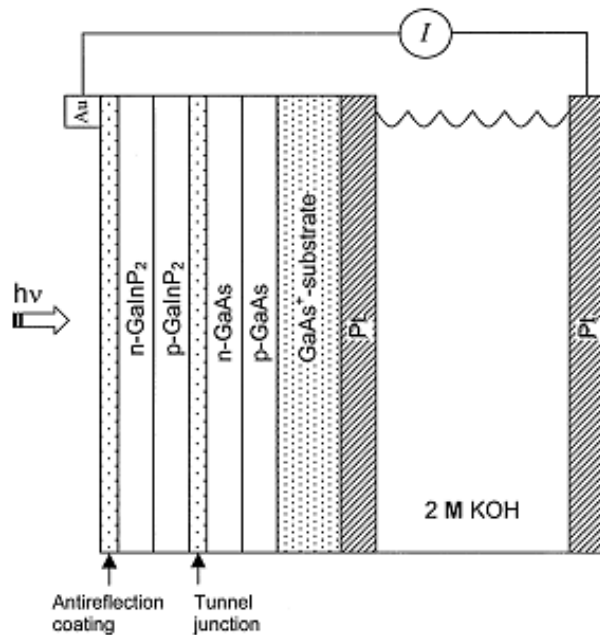
International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 127–132

www.elsevier.com/locate/ijhydene

High-efficiency integrated multijunction photovoltaic/electrolysis systems for hydrogen production

O. Khaselev, A. Bansal, J.A. Turner *

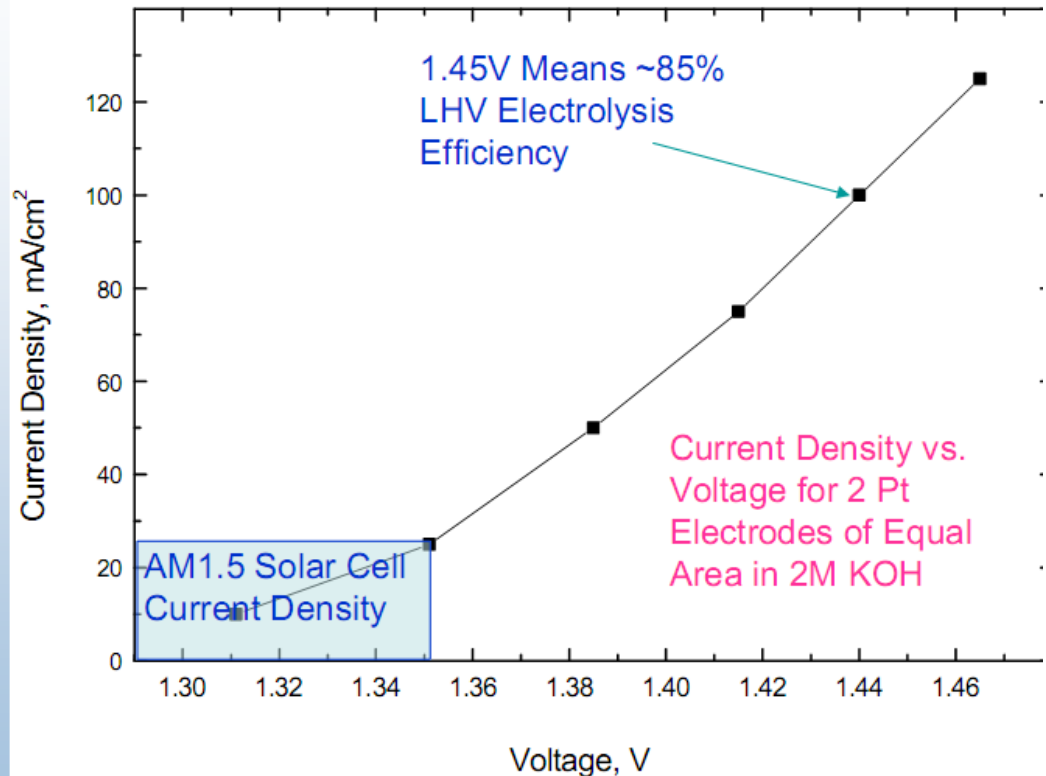
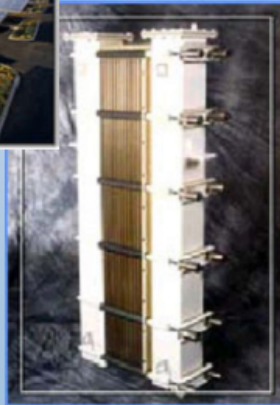
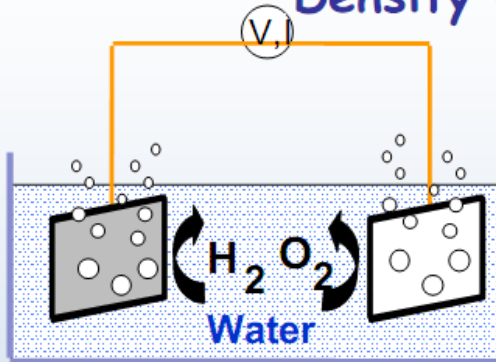
National Renewable Energy Laboratory, 1617 Cole Boulevard, Golden, CO 80401-3393, USA



... the hydrogen production efficiency for the n/p,n/p-GaInP₂/GaAs/(Pt)=2 M KOH/Pt system is **16.5%** and for triple junction a-Si(Pt)/2 M KOH/Pt it is **7.8%**. The value for the a-Si system is realized by a PV cell with only a 9% solar-to-electrical efficiency. **Because of the lower current density, this system is performing water electrolysis with an equivalent efficiency of 86%** (effective electrolysis voltage of 1.42 V).

↑
électrolyseur commercial 1 A/cm² – 1.8-2 V → 65 %

Higher Efficiency from PEC Devices (as Compared to PV/Electrolysis) Stems from the Lower Operational Current Density when using Direct Solar Light



O. Khaselev, A. Bansal, and J. A. Turner, *International Journal of Hydrogen Energy*, 26, p 127-132 (2001)

Surpotentiel : Voltage – 1.23 V (Perte / Chaleur)

électrolyseur commerciale 1 A/cm² – 1.8-2 V → rendmt 65 %

Conclusion 1



Avantage d'un système intégré (photoélectrochimique)

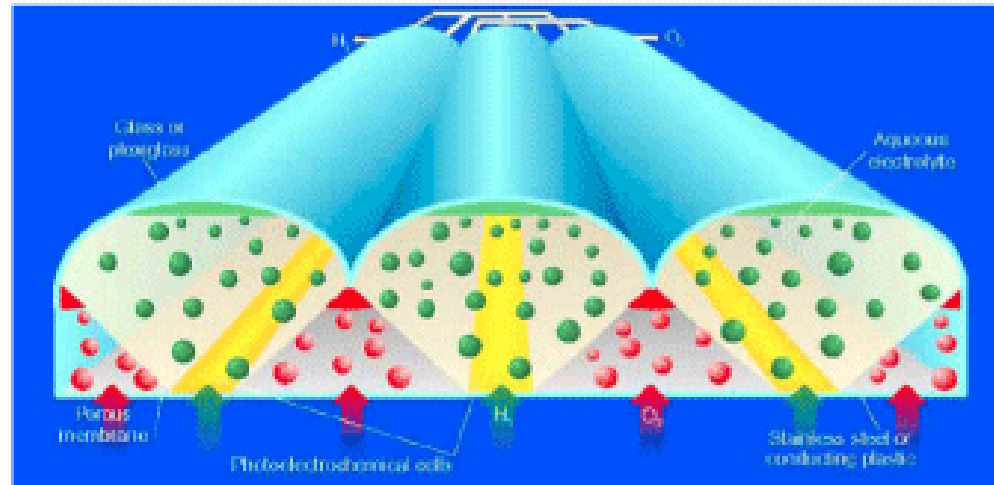
- Absorption lumière: grand surface nécessaire
- Utiliser cette grand surface pour diminuer la densité de courant
- Surpotentiel diminué, **rendement meilleur**
- De toute façon: flux photons solaires $< 50 \text{ mA}$

*Implique collection des gazes au niveau du
panneau solaire !*

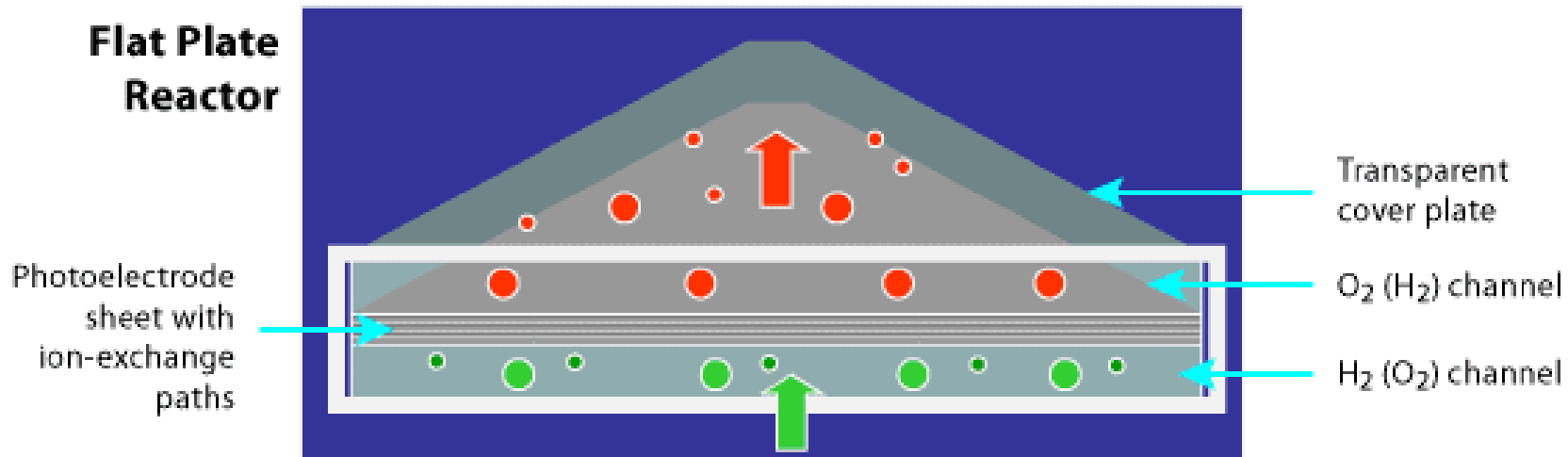
Concept d'un panneau photoélectrochimique



Tubular Reactor

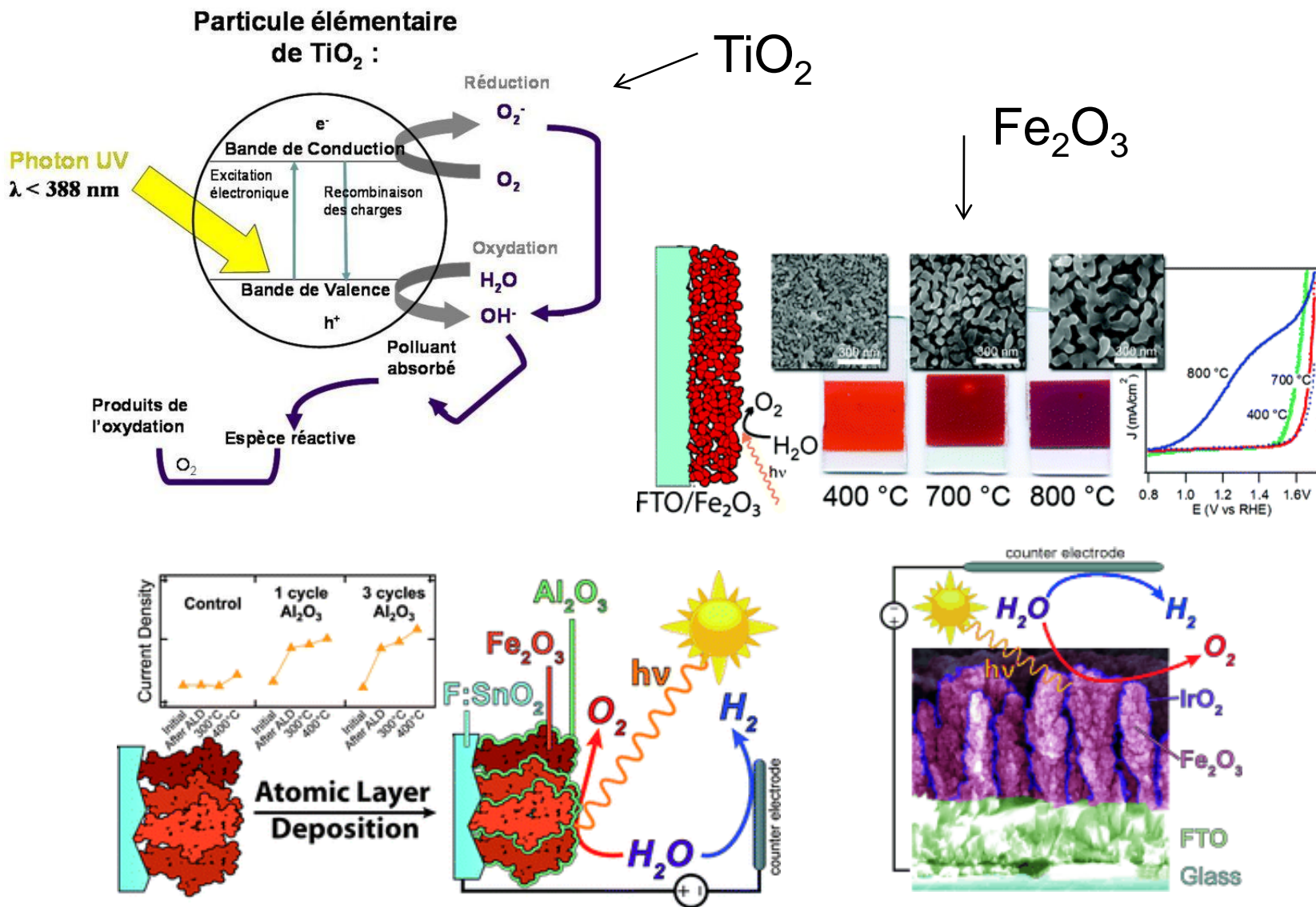


Flat Plate Reactor



Turner et al., NREL 2006

Photocatalyseurs : L'approche « Matériaux »



Le projet « Shark » (criblage)



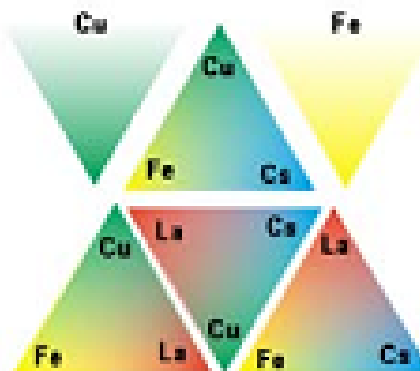
The SHArK Project (Solar Hydrogen Activity Research Kit)

Our Mission: To discover inexpensive and stable oxide semiconductors that can efficiently photoelectrolyze water using sunlight

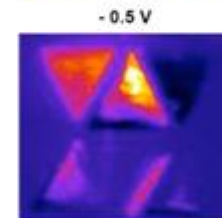
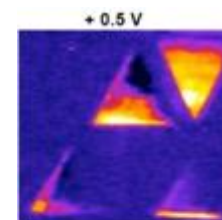
A SHArK Project Kit



- ☐ Lego Mindstorms® Kits
- ☐ Extra Lego® Parts
- ☐ Commercial Inkjet Printer
- ☐ Pipettes
- ☐ Commercial Green Laser Pointer
- ☐ USB Powered Data Acquisition Box
- ☐ Conductive Glass Substrates
- ☐ Etched Glass Electrochemical Cell
- ☐ Alligator Clips and Copper Wire
- ☐ Graphite (Counter Electrode)
- ☐ Laser Safety Goggles
- ☐ Software installed from website



printing
and
scanning



Harry Gray

<http://www.thesharkproject.org/>

Lego® Laser Scanning Station

25 août 2011

Ecole d'été de physique

W. Leibl CEA/DSV/IBITECS

45

Comparaison bio-catalyseurs – catalyseurs matériaux

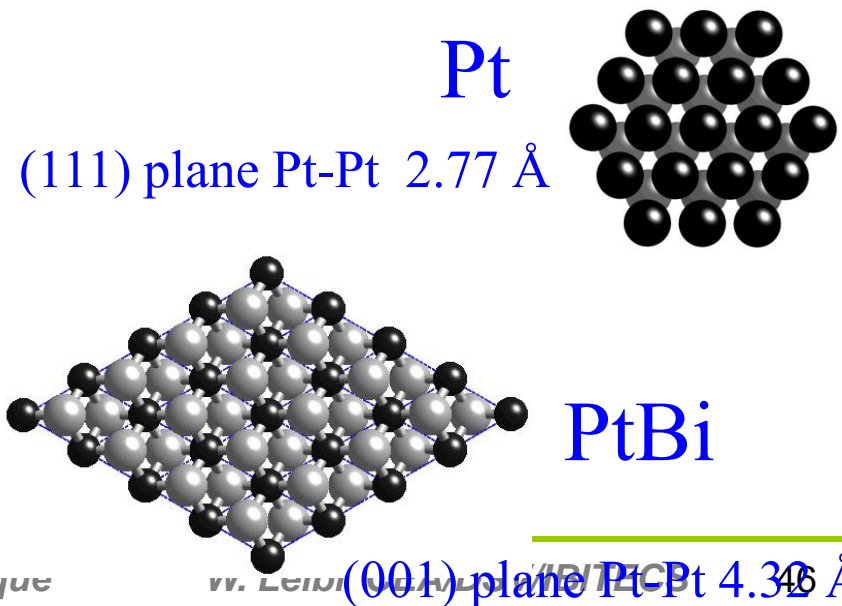
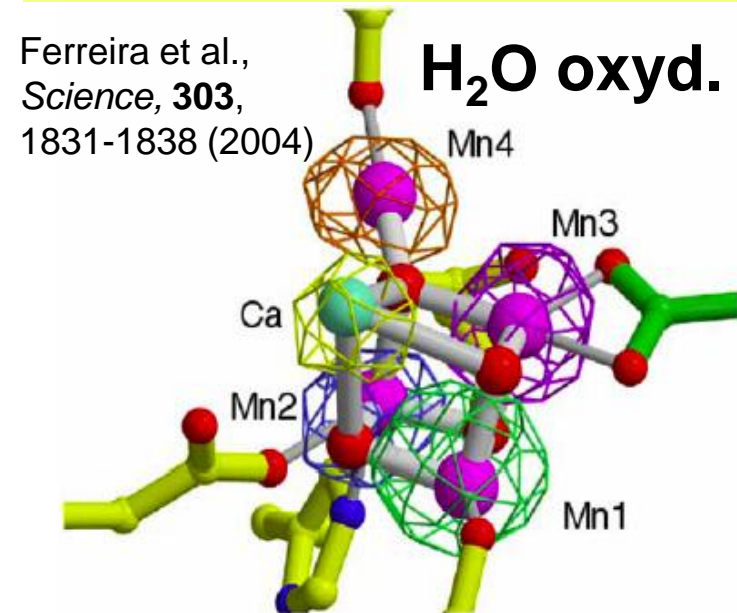


Biologie

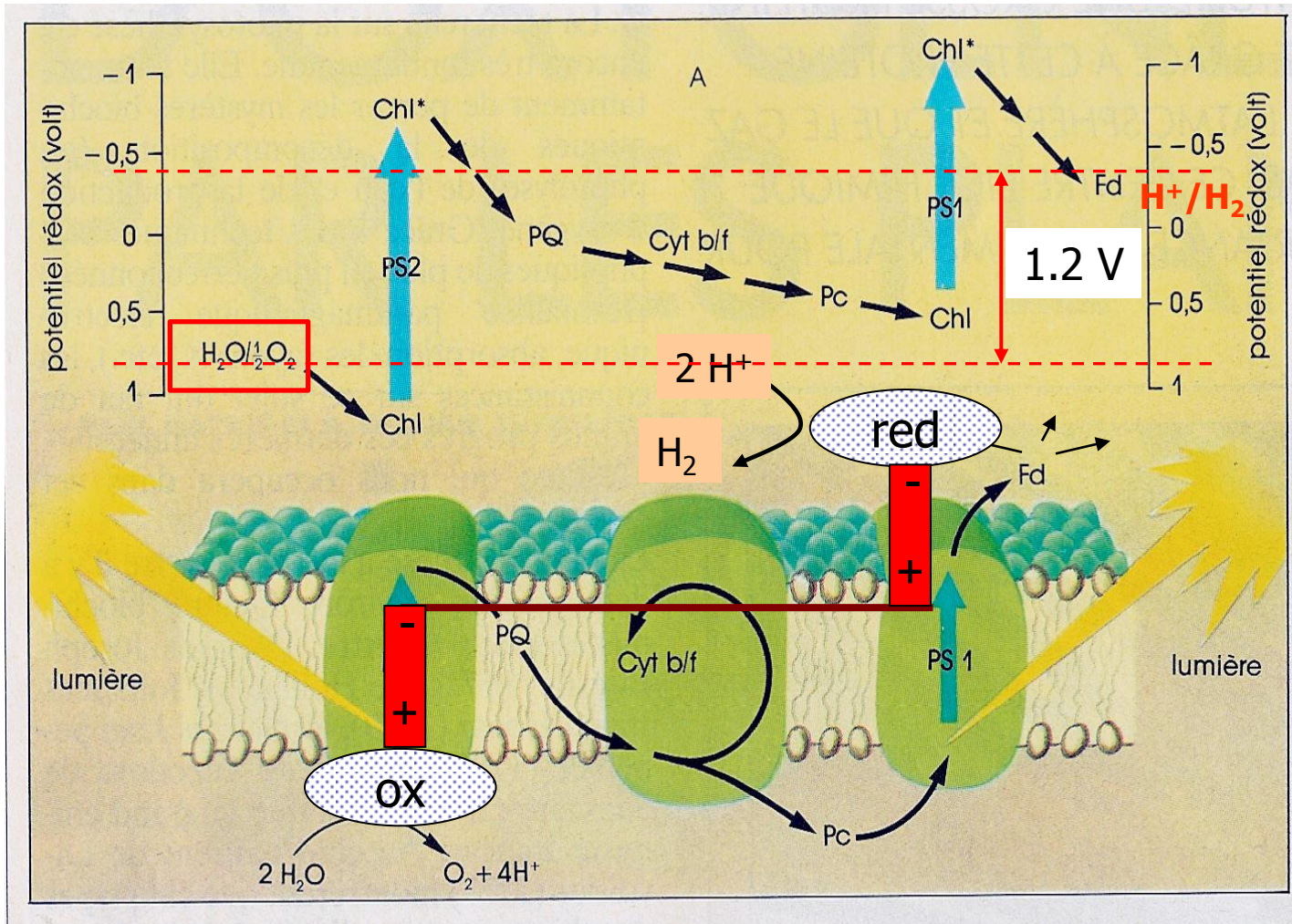
Sites catalytiques avec architecture 3-dimensionnelle précise pour s'approcher de la structure de l'état de transition pour diminuer ΔG^\ddagger .

Matériaux

L'accent sur la structure de surface
(sauf bio-inspirés)



Photosynthèse artificielle

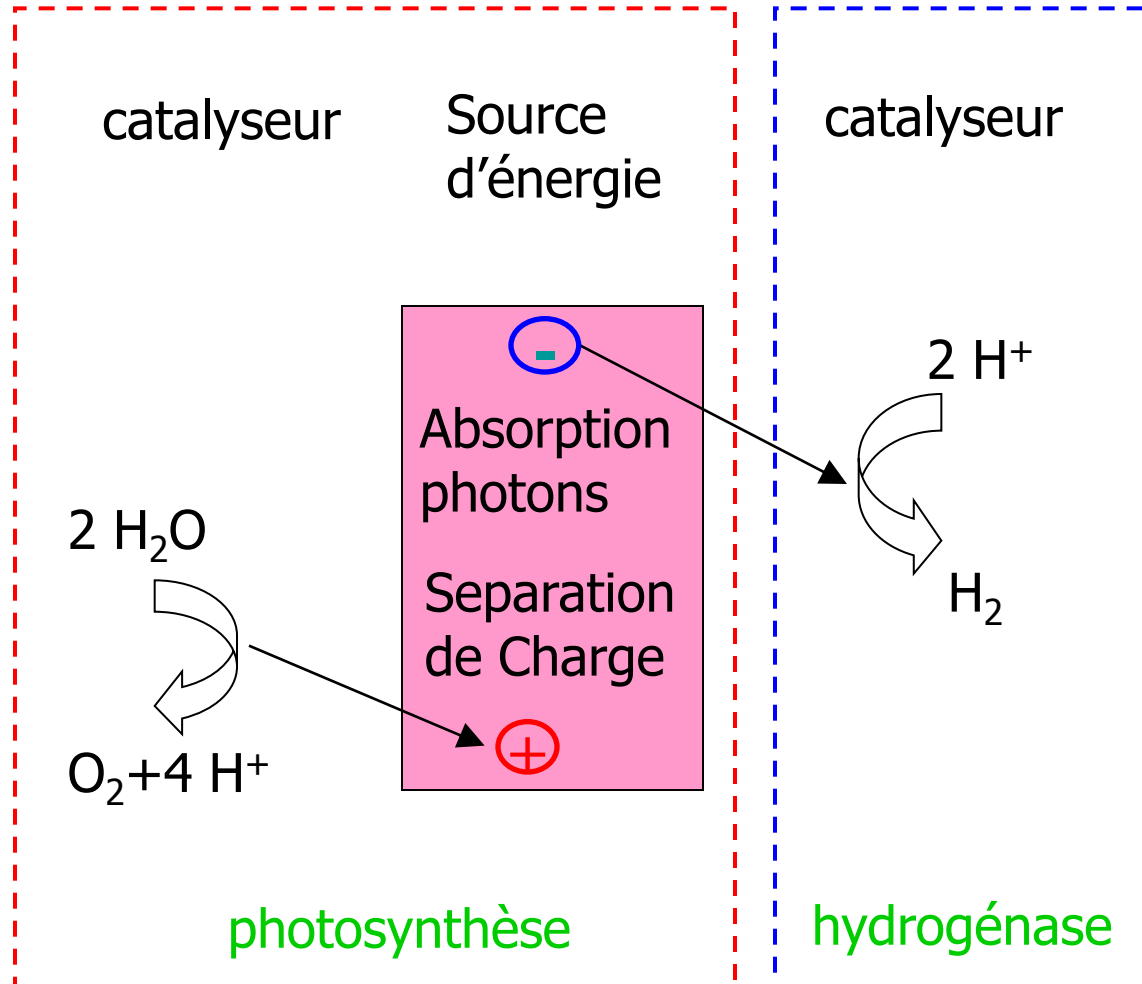


La nature: inspiration pour la conception des (photo)catalyseurs

Photocatalyse - Principe

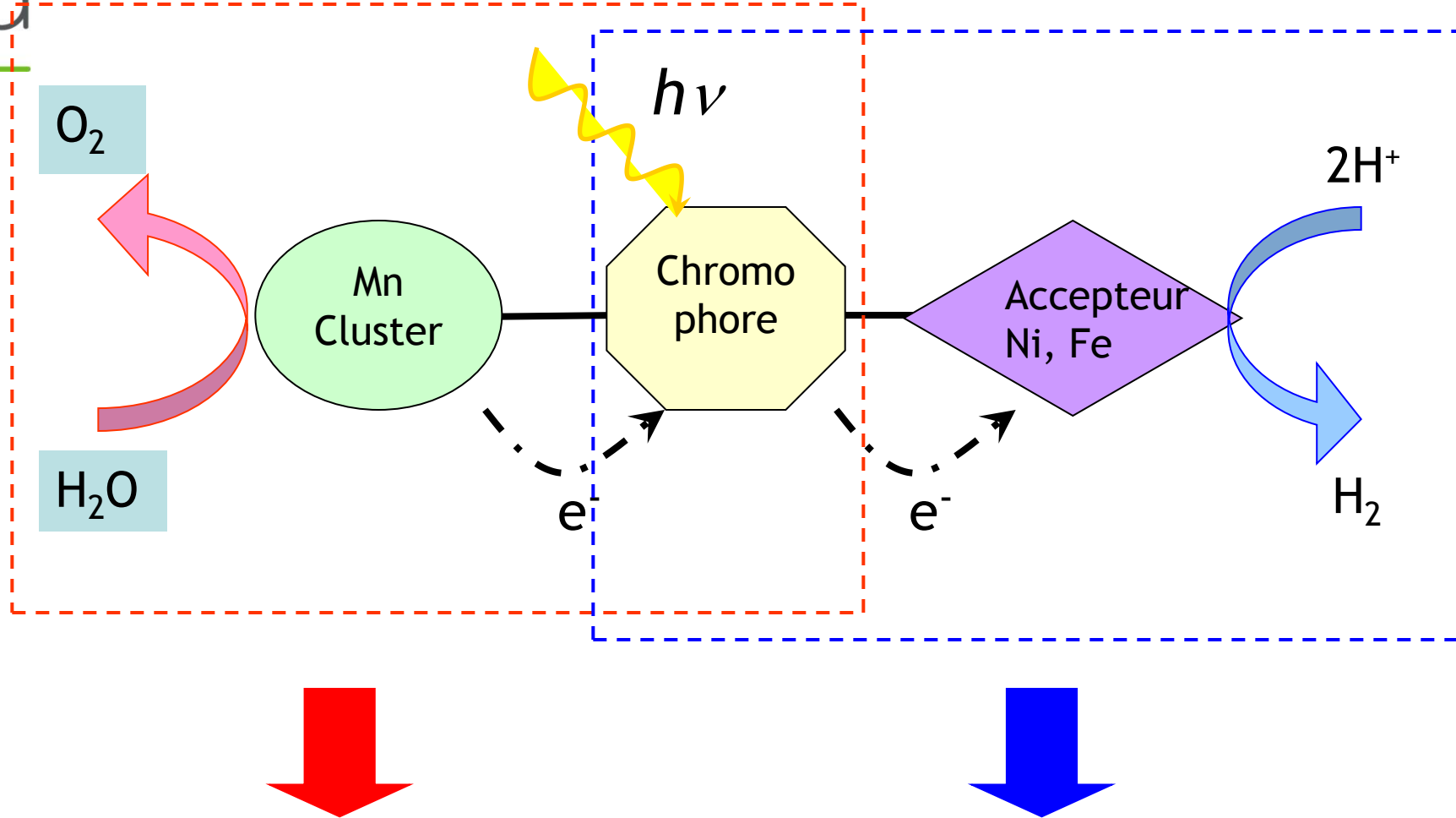


Schéma énergétique

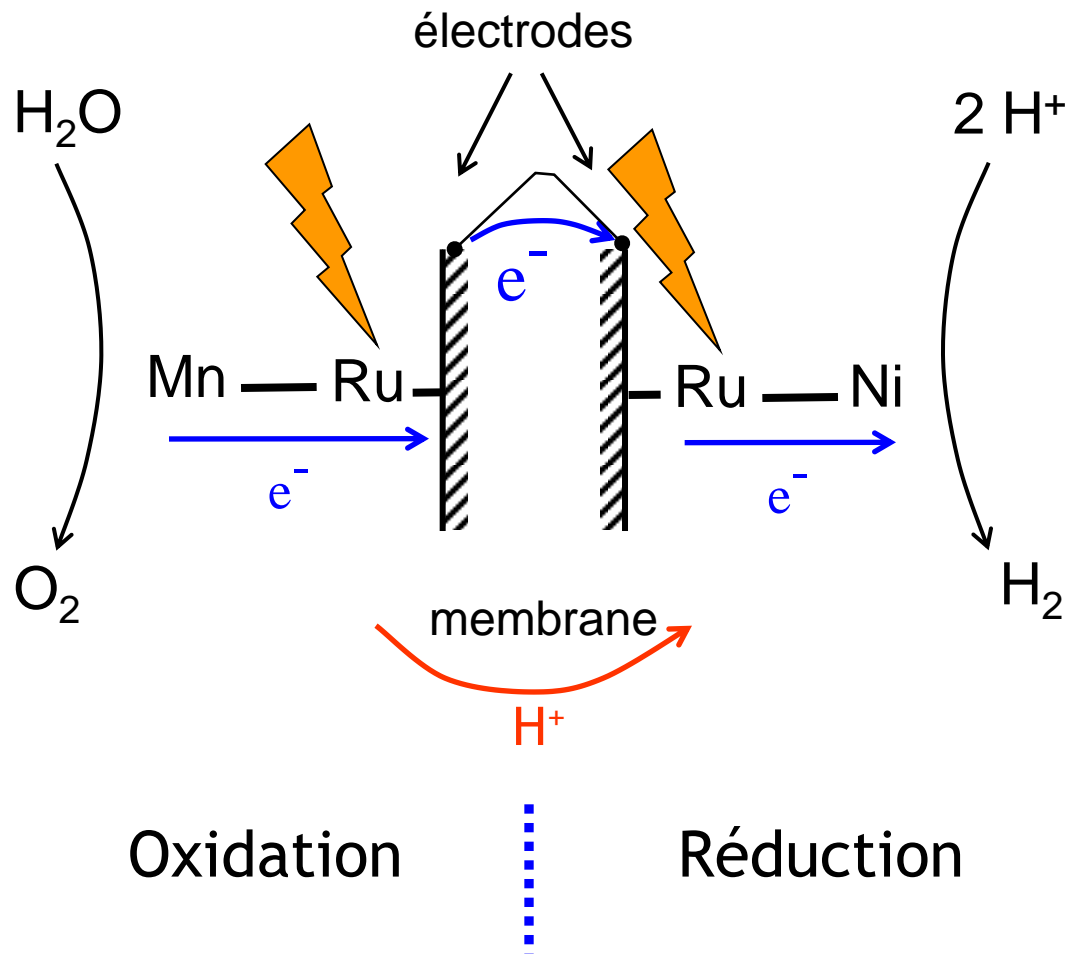


Photocatalyseur supramoléculaire

cea



Deux systèmes séparés, greffés sur électrodes



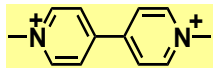
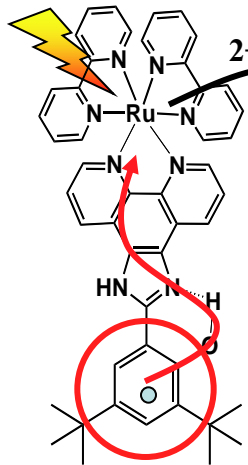
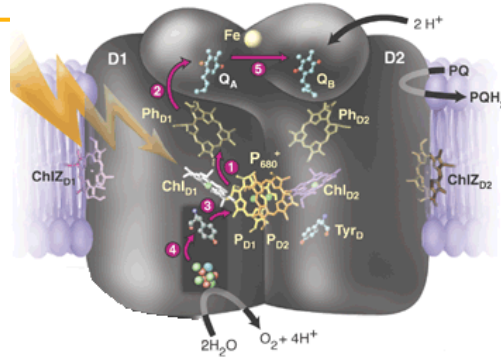
Développer les deux parties séparément et les assembler ensuite !

Approche interdisciplinaire bio-inspirée



Compréhension des
systèmes biologiques

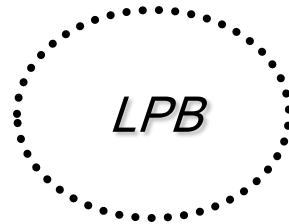
Biologie, Biophysique



Interprétation

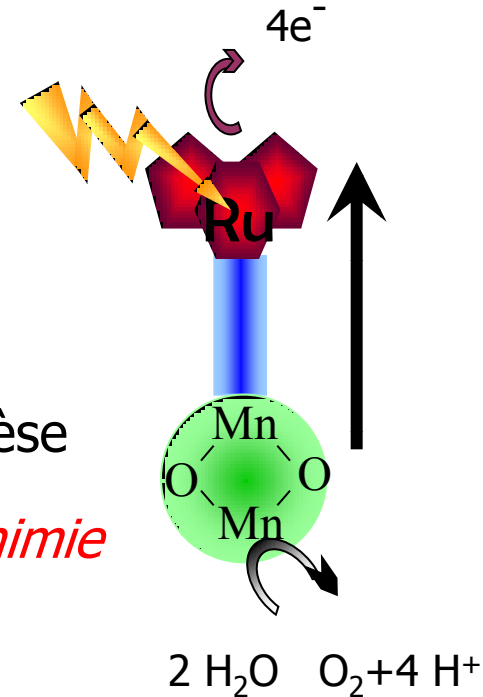
Calculs DFT

Idée



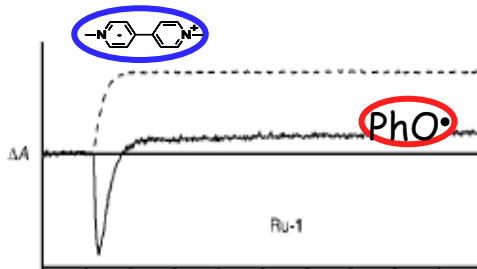
Synthèse

Chimie



Caractérisation
fonctionnelle

Spectroscopie, Electrochimie



Propriétés de systèmes bio-inspirés



Modules indépendants (chromophores, relais électroniques, catalyseurs)

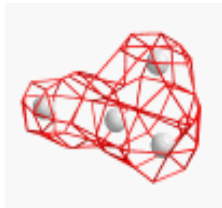
Composants moléculaires

Organisés (espace, énergétique)

Catalyseurs utilisent métaux non-nobles (Mn, Ni, Fe, Co...)

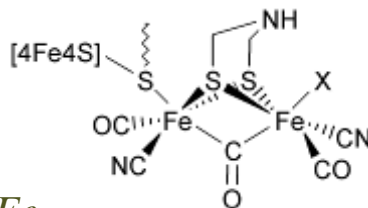
But : développement de photocatalyseurs artificiels

simples, efficaces, robustes, pas chers



Cluster CaMn_4

Photosystem II



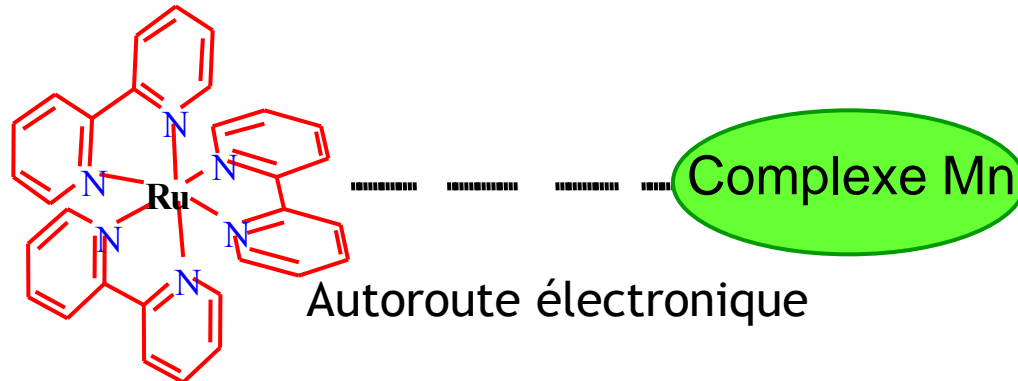
Hydrogenase FeFe

Manganese	Iron	Cobalt	Nickel	Copper	Zinc	Gallium	Germanium	Arsenic
Mn_{25}	Fe_{26}	Co_{27}	Ni_{28}	Cu_{29}	Zn_{30}	Ga_{31}	Ge_{32}	As_{33}
54.938049	55.845	58.933195	58.6934	63.546	65.39	69.723	72.61	74.92160
0.000254%	0.00294%	0.000161%	1.70x10 ⁻⁶ %	4.11x10 ⁻⁶ %	1.23x10 ⁻⁷ %	3.9x10 ⁻⁷ %	2.1x10 ⁻⁶ %	2.1x10 ⁻⁶ %
Technetium	Ruthenium	Rhodium	Palladium	Silver	Cadmium	Indium	Tin	Antimony
Tc_{43}	Ru_{44}	Rh_{45}	Pd_{46}	Ag_{47}	Cd_{48}	In_{49}	Sn_{50}	Sb_{51}
98	101.07	101.07	106.42	107.8682	112.411	114.818	118.710	121.760
6.1x10 ⁻⁸ %	1.12x10 ⁻⁶ %	1.12x10 ⁻⁶ %	4.5x10 ⁻⁶ %	1.58x10 ⁻⁶ %	5.3x10 ⁻⁶ %	6.0x10 ⁻⁸ %	1.25x10 ⁻⁶ %	1.01x10 ⁻⁶ %
Rhenium	Osmium	Iridium	Platinum	Gold	Mercury	Thallium	Lead	Bismuth
Re_{75}	Os_{76}	Ir_{77}	Pt_{78}	Au_{79}	Hg_{80}	Tl_{81}	Pb_{82}	Bi_{83}
186.207	190.23	192.22	195.078	196.96655	200.59	204.3833	207.2	208.98038
1.69x10 ⁻⁶ %	2.20x10 ⁻⁶ %	2.18x10 ⁻⁶ %	4.4x10 ⁻⁶ %	6.1x10 ⁻⁶ %	1.11x10 ⁻⁶ %	6.0x10 ⁻⁸ %	1.03x10 ⁻⁶ %	4.7x10 ⁻⁶ %

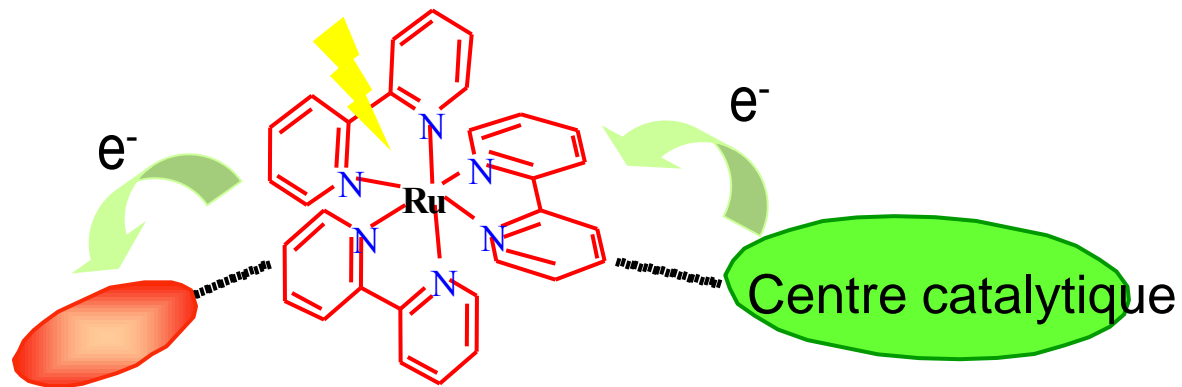
Paramètres à contrôler par les chimistes



➡ Distance intermétallique: communication électronique, mais propriétés des modules préservés

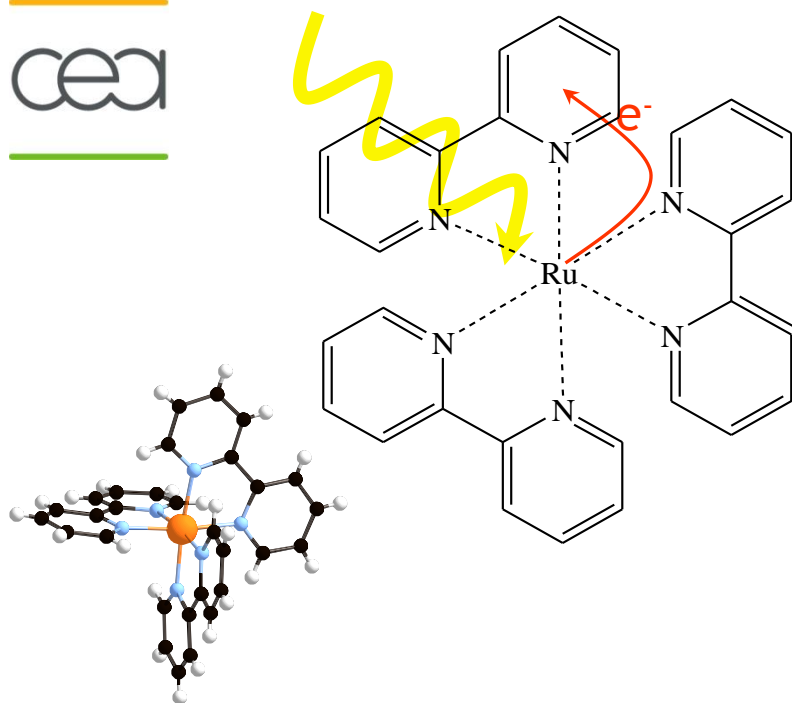


➡ Vectorialisation du transfert électronique



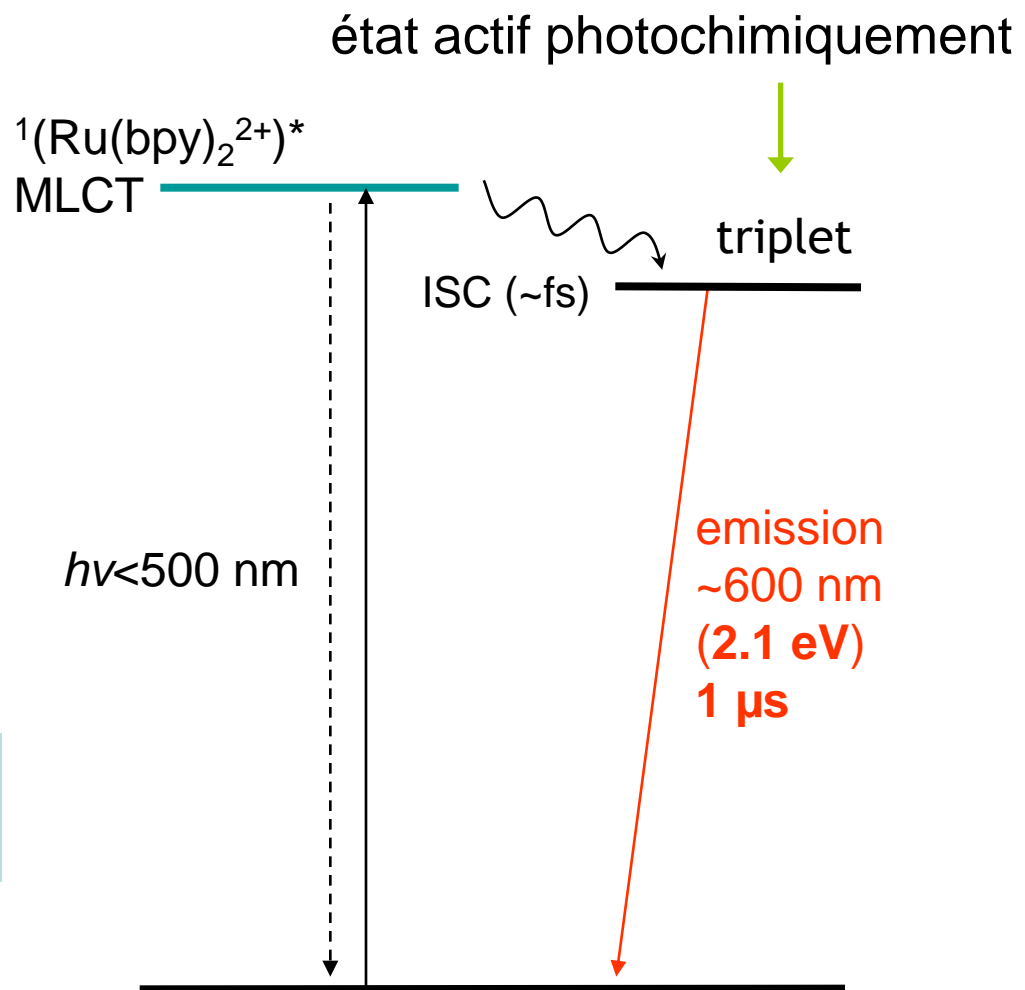
Accepteur d'électrons

Le chromophore : $[\text{Ru}(\text{bpy})_3]^{2+}$



$$\begin{aligned} E(\text{Ru}^{3+}/^*\text{Ru}^{2+}) &= -0.86 \text{ V / NHE} \\ E(\text{Ru}^{3+}/\text{Ru}^{2+}) &= \sim +1.25 \text{ V / NHE} \end{aligned}$$

comme le chromophore du PS 2



Méthodes spectroscopiques



Luminescence :

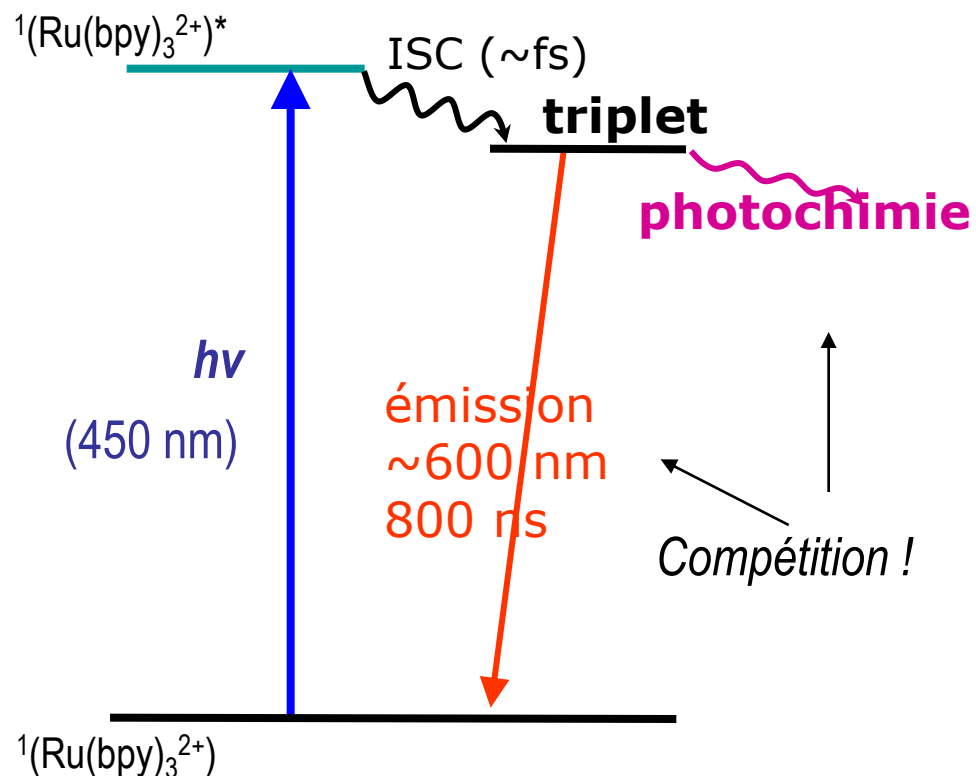
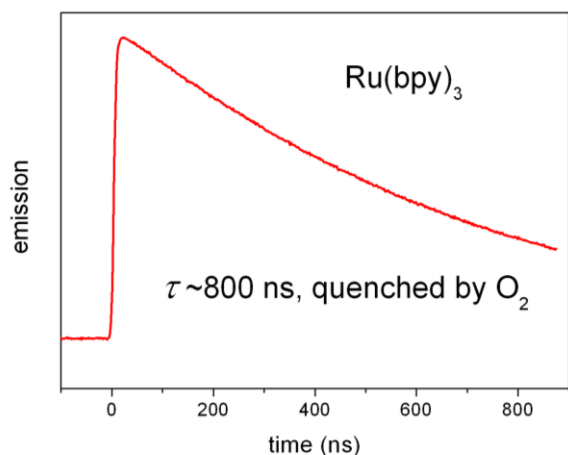
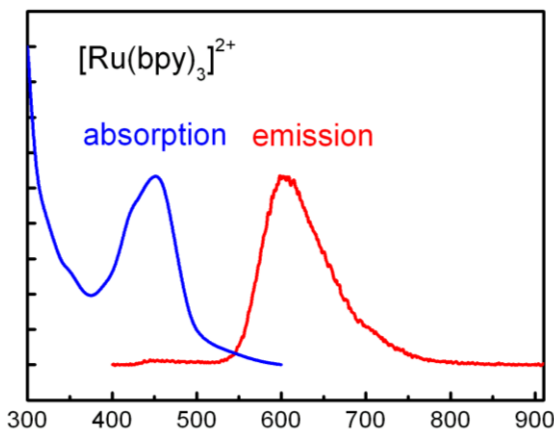
Absorption (visible) :

FTIR, RPE :

évolution de l'état excité

cinétiques de transfert d'électron

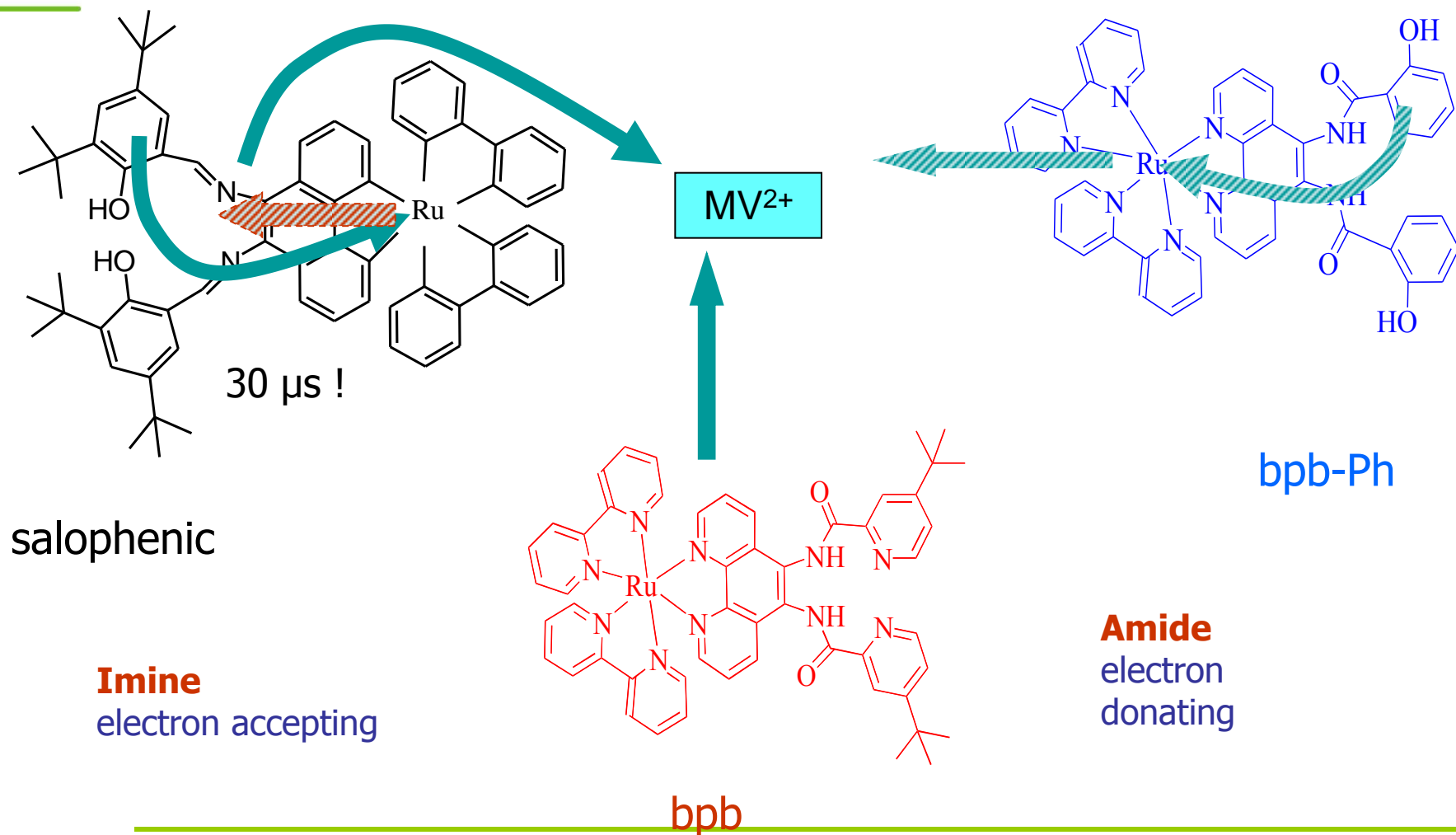
caractérisation des radicaux formés



Contrôle de la directionnalité du transfert d'électron

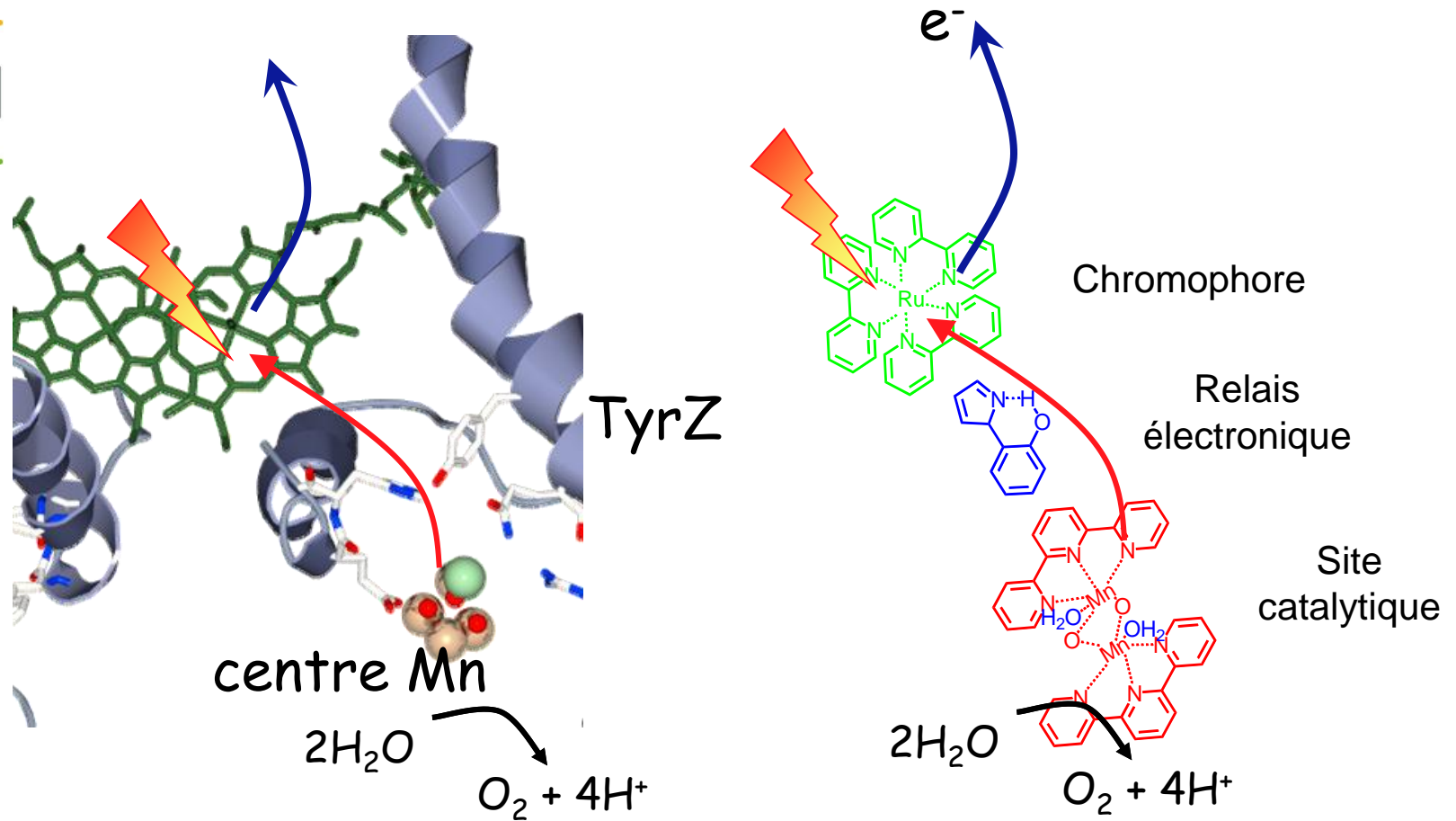


Oxydation des phénols



Modèles biomimétiques du Photosystème II

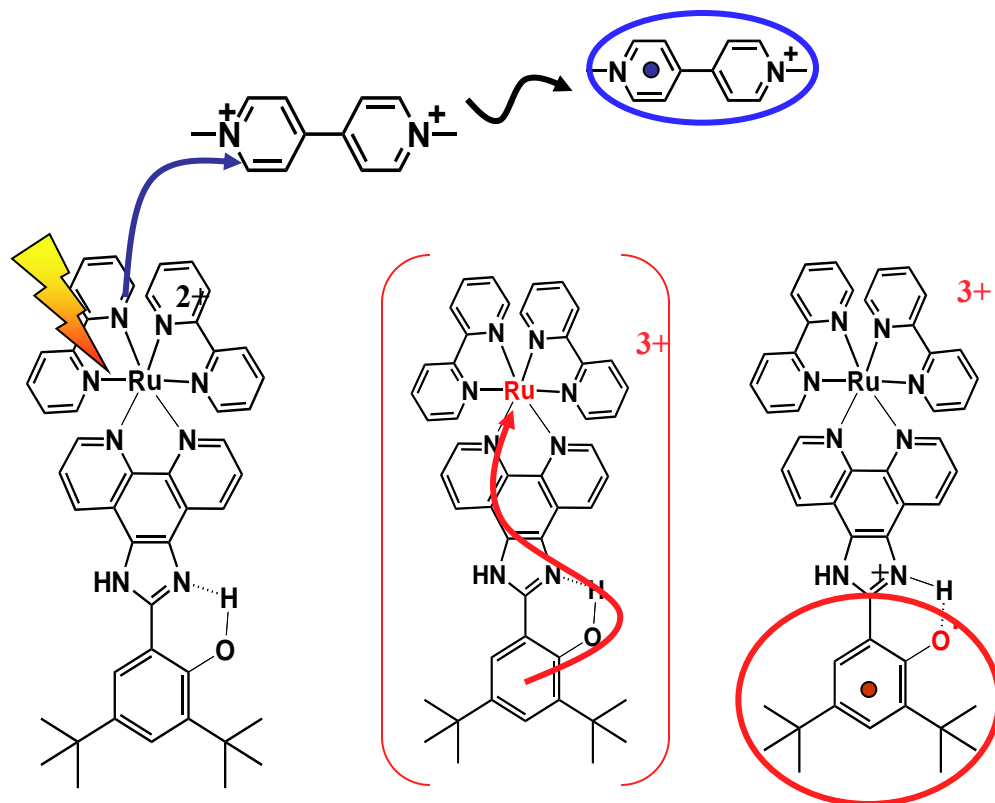
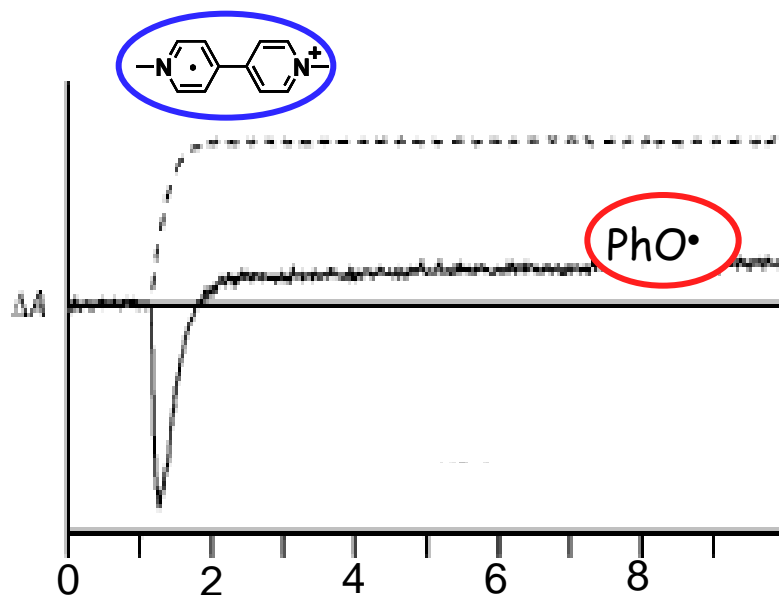
cea



Assemblage de modules fonctionnels par chimie de synthèse

Imidazole - Phénol comme relais électronique

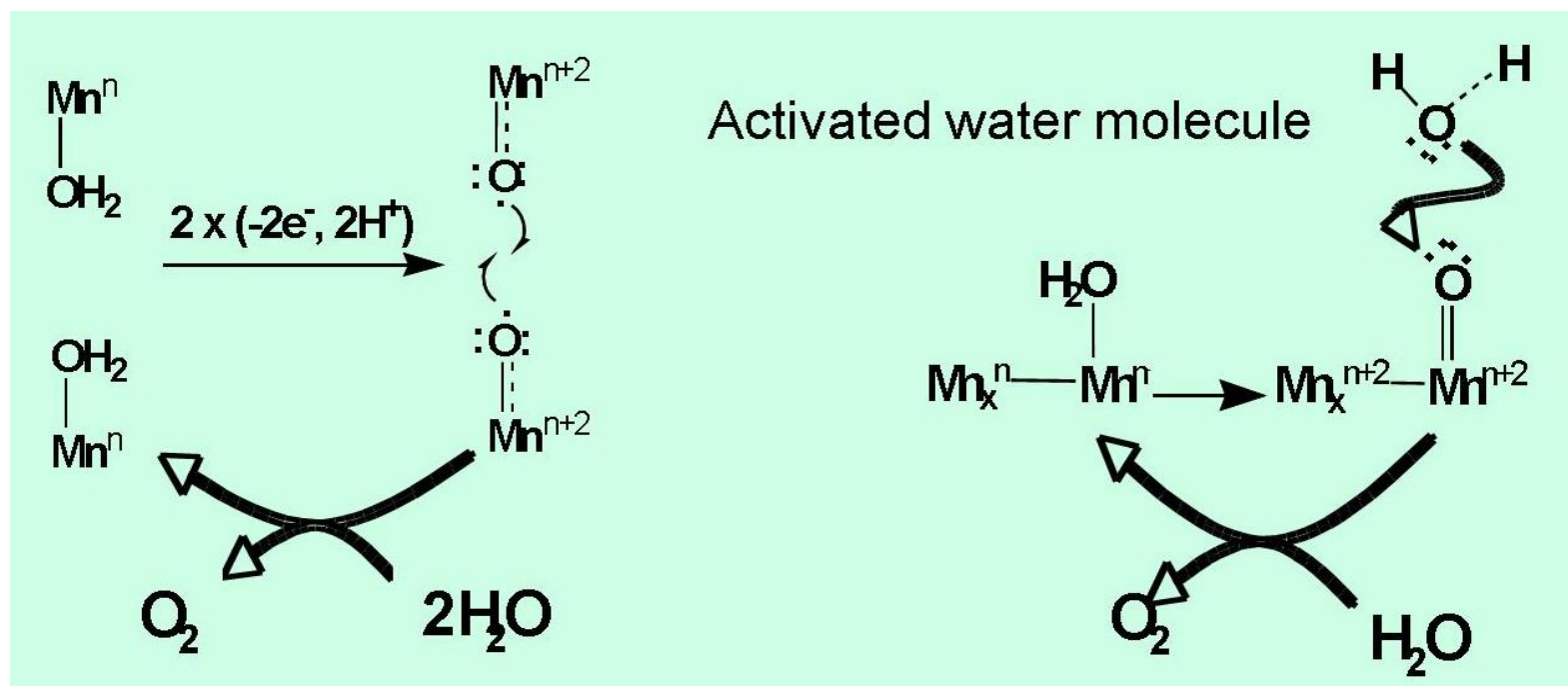
cea



photogénération du radicale phénoxy confirmée par RPE
Ajustement du potentiel du phénol

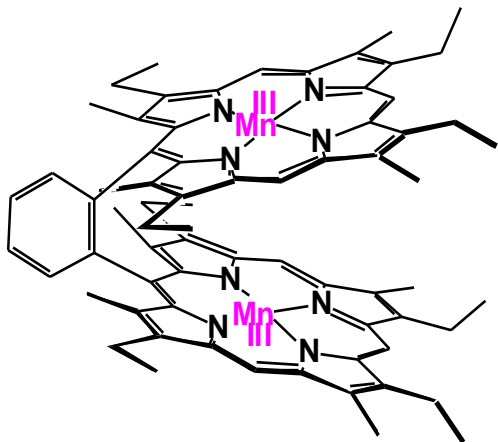
Lachaud et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2005

Le grand défi : le module catalytique pour l'oxydation de l'eau

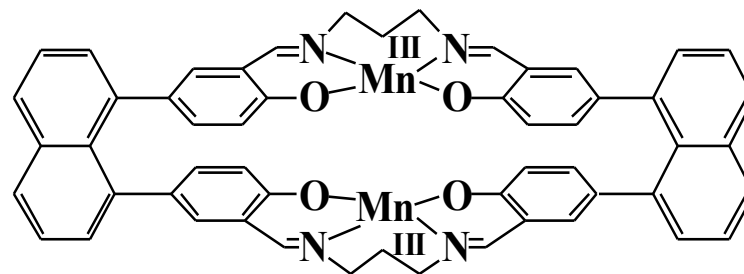


- Il faut stocker 4 charges positives
- à des potentiels proches -> gérer compensation des charges
- Stabilité des complexes dans l'eau
- Formation de la liaison O=O !

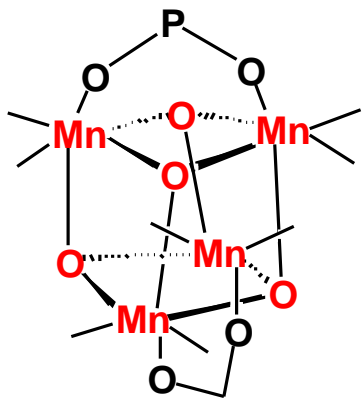
Les catalyseurs d'oxydation - modèles fonctionnels



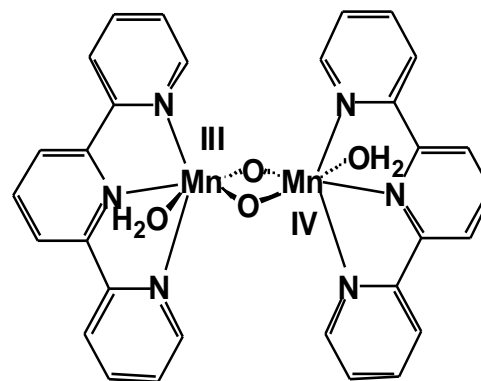
Naruta 1994



McAuliffe 1994



Dismukes 2000

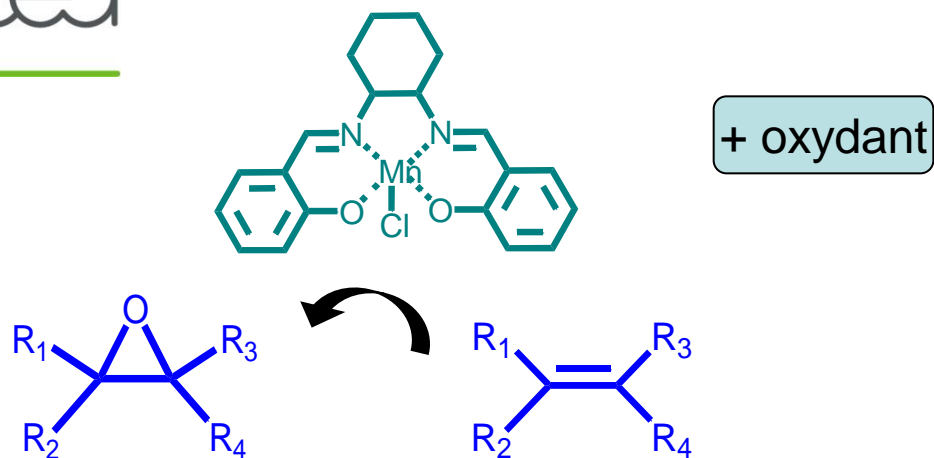


Brudwig 1999

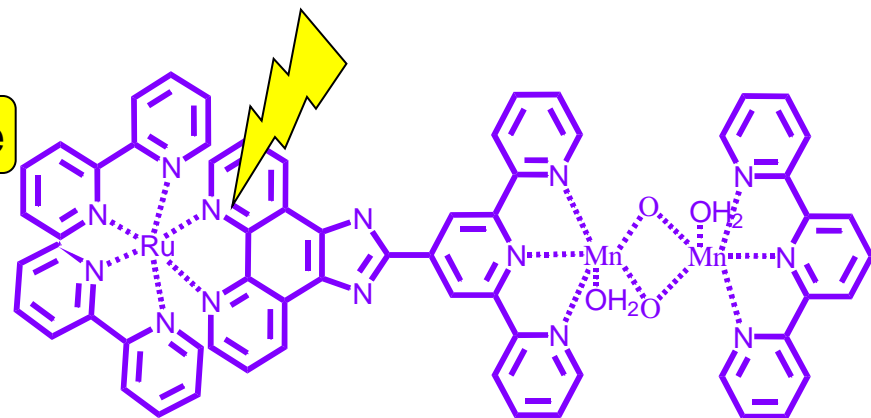
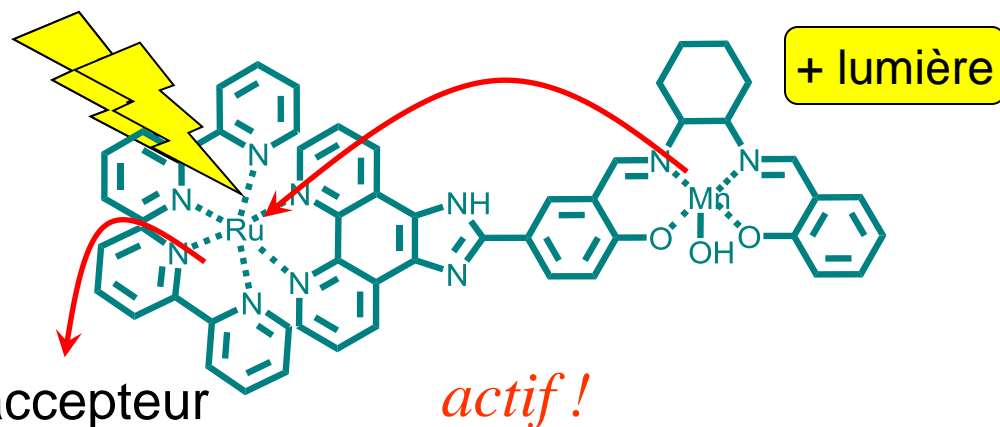
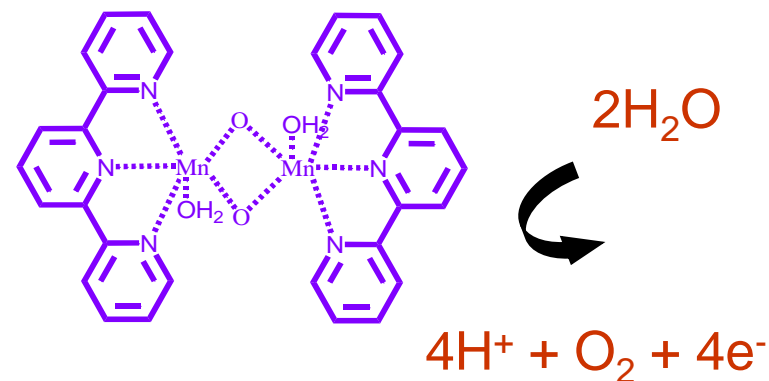
Catalyseurs d'oxydation



Catalyseur de Jacobsen



Catalyseur de Brudvig

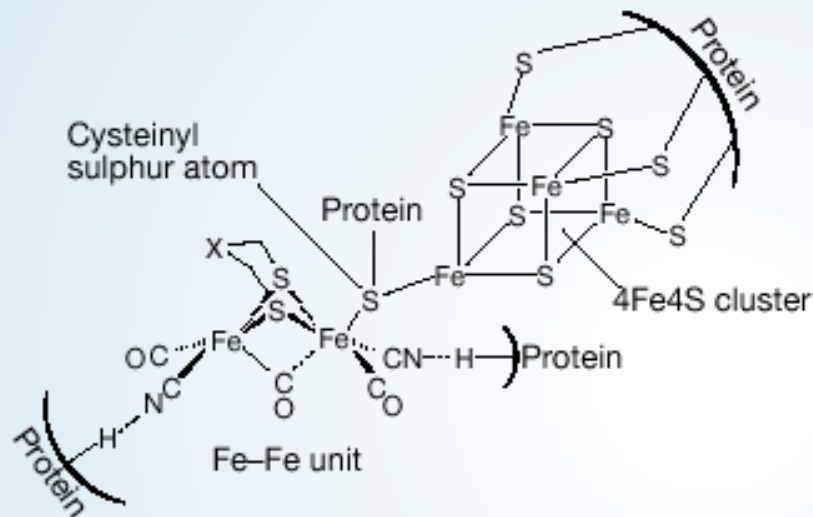


But : créer l'espèce réactive **Mn=O**

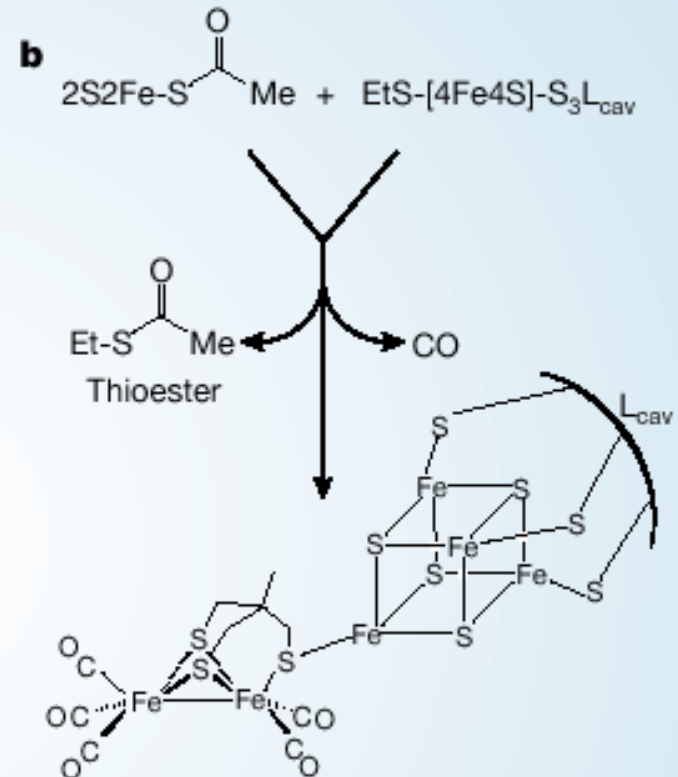
Complexes mimétiques du site active des H2ases à Fer



a Site active de l'hydrogénase



Tard et al., *Nature* (2005)



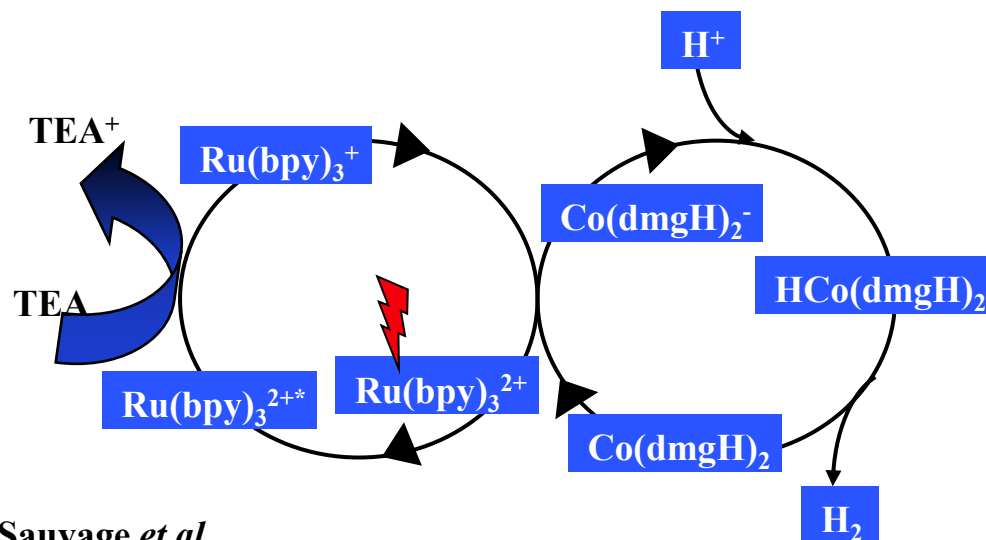
Analogue Synthétique

Analogue Synthétique active on électrocatalyse. Pb potentiel très bas

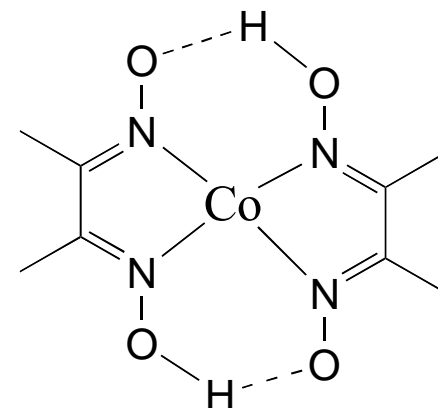
Catalyseurs pour la réduction : Co ou Ni au lieu de Pt



Catalyse homogène (en solution) :



Sauvage *et al*



cobaloxime
 $\text{Co}(\text{dmgH})_2$

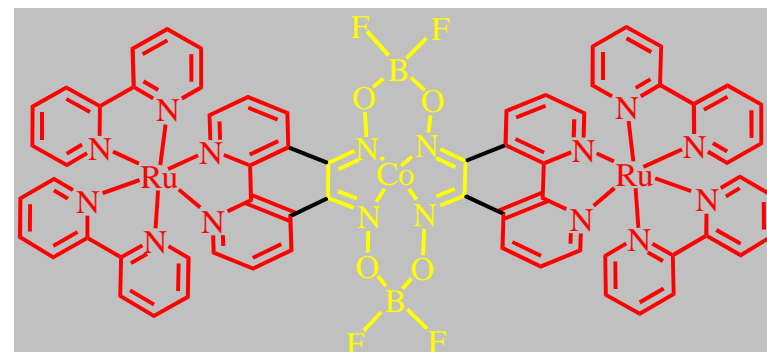
Assemblage supramoléculaire

Avantages attendus:

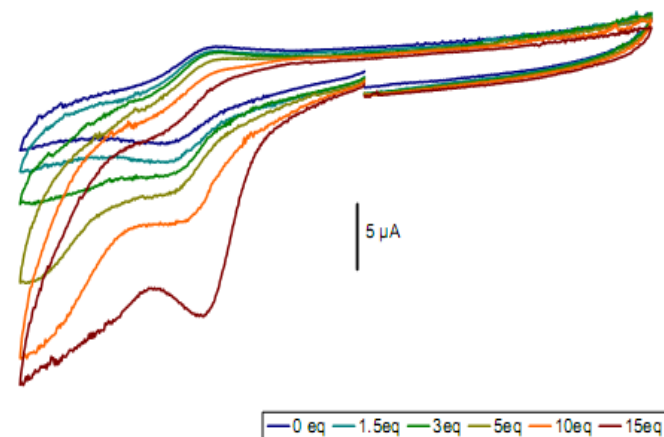
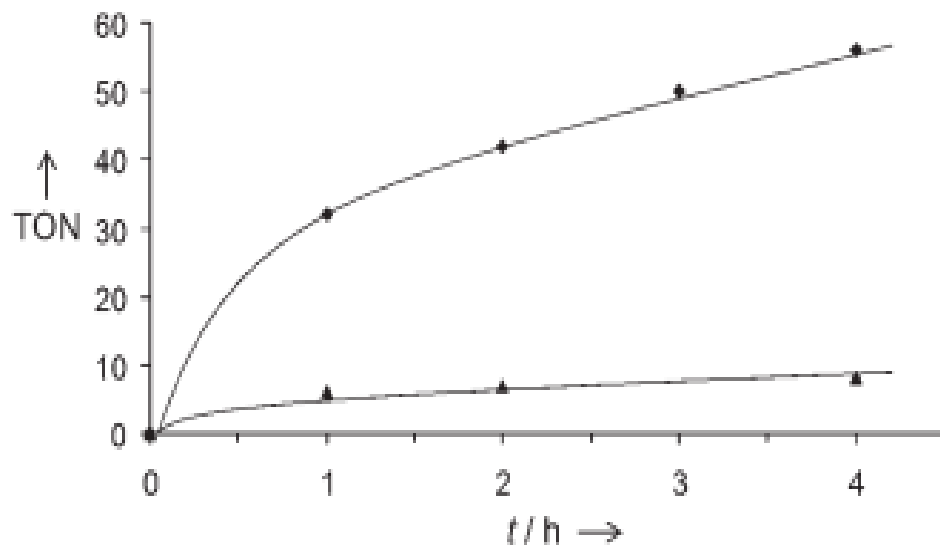
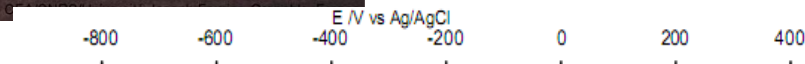
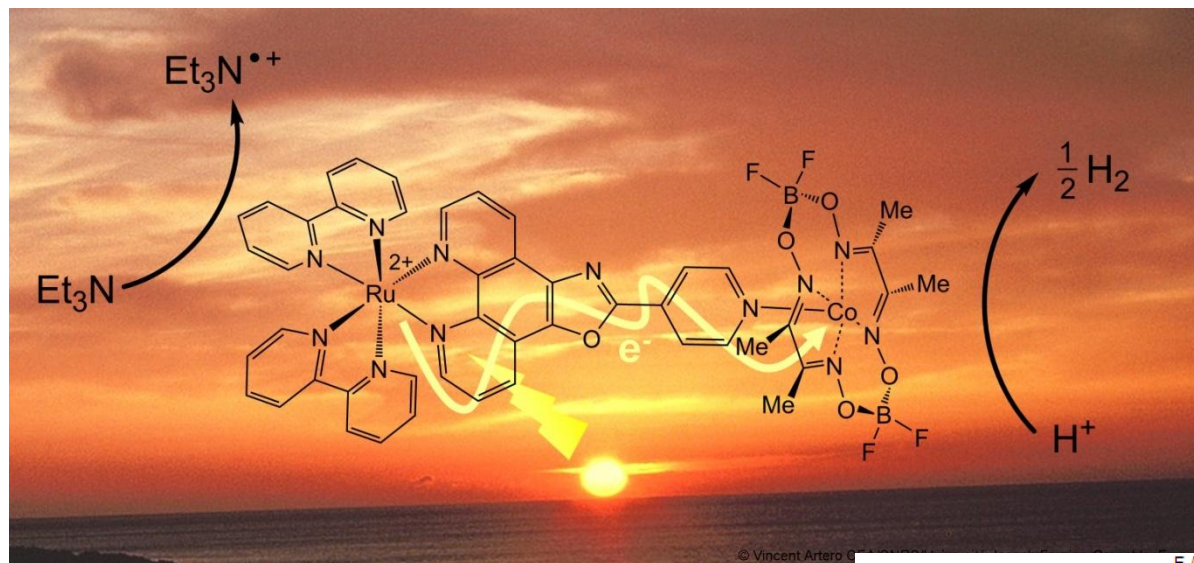
Vitesse de transfert e^-

Plus stable

Fixation sur surface électrode possible

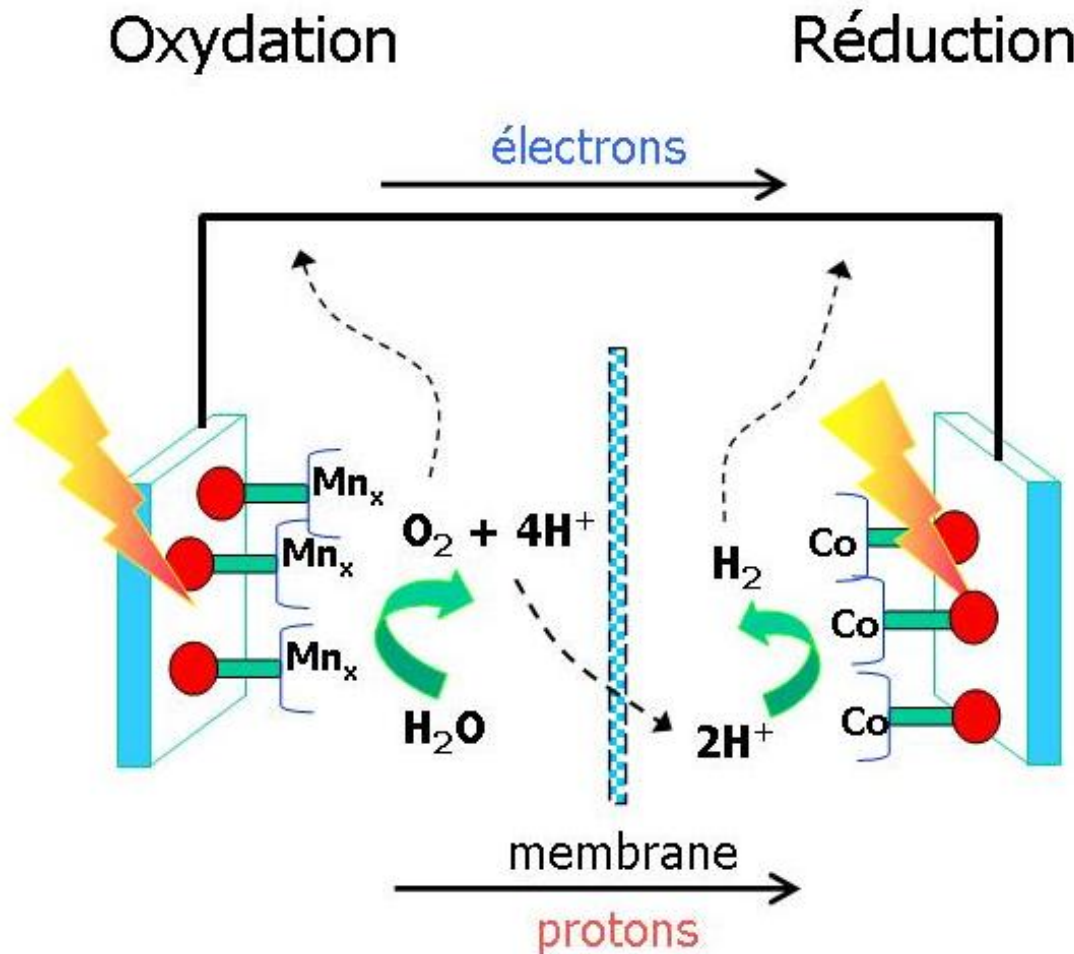


Photoproduction d'hydrogène avec un complexe Ru-cobaloxime



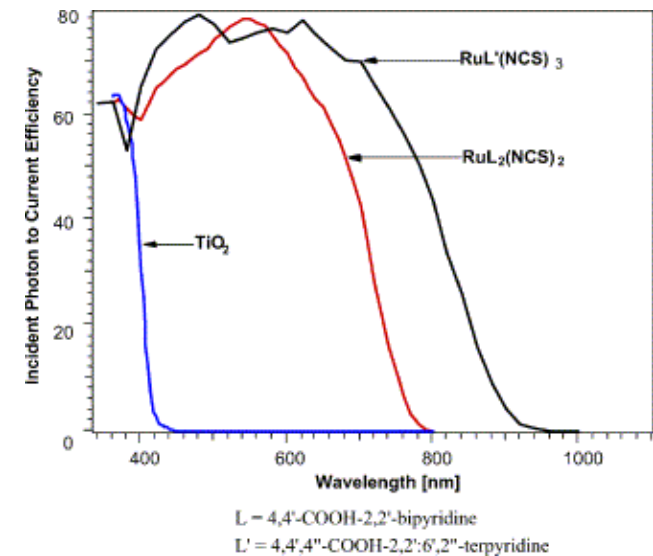
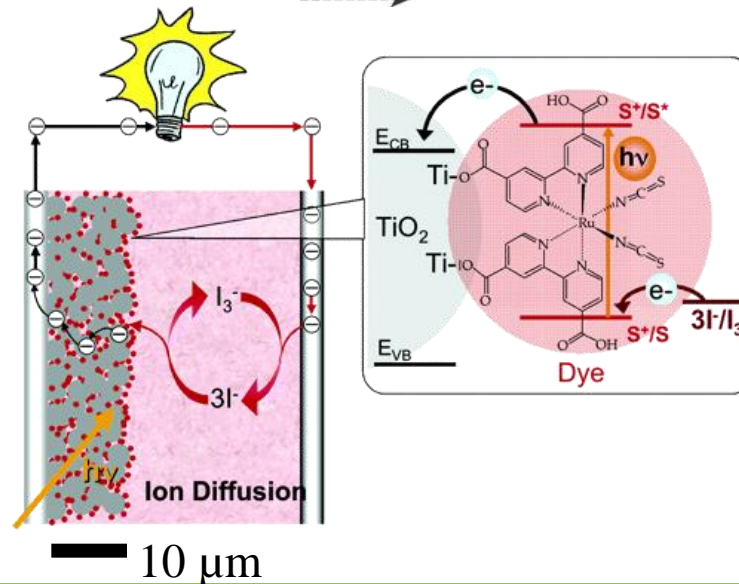
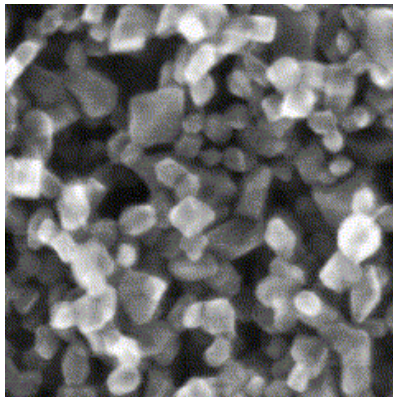
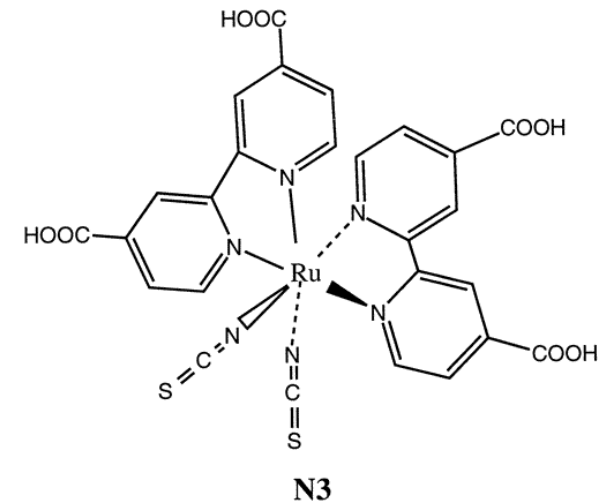
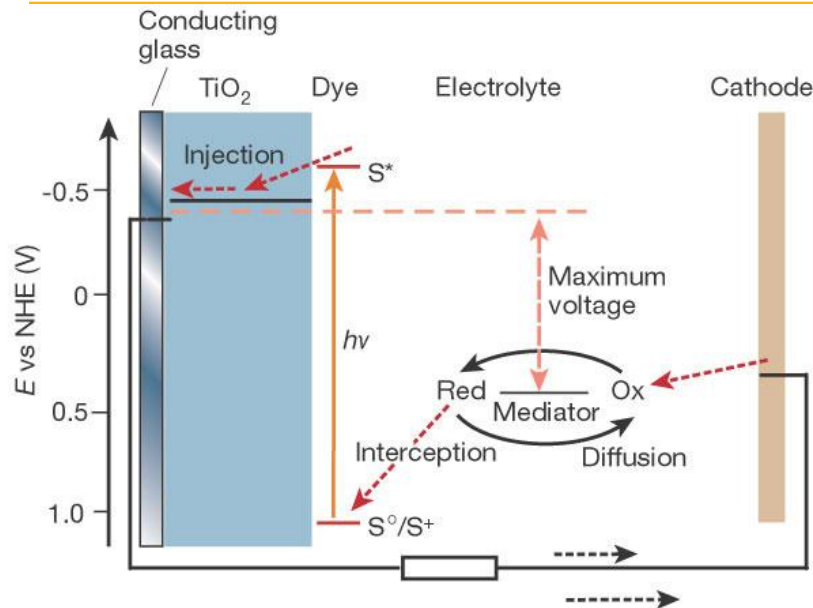
Fihri et al. *Angew. Chem. Int. Ed.* 2008,

Connexion des deux modules → cellule photo-electrochimique



Greffage des complexes sur électrodes nécessaire

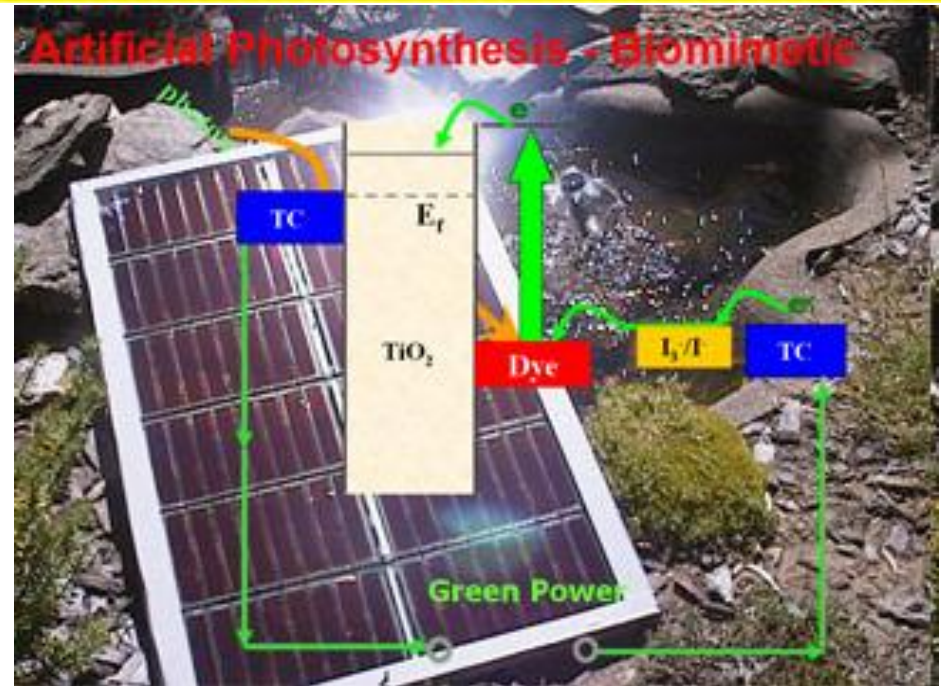
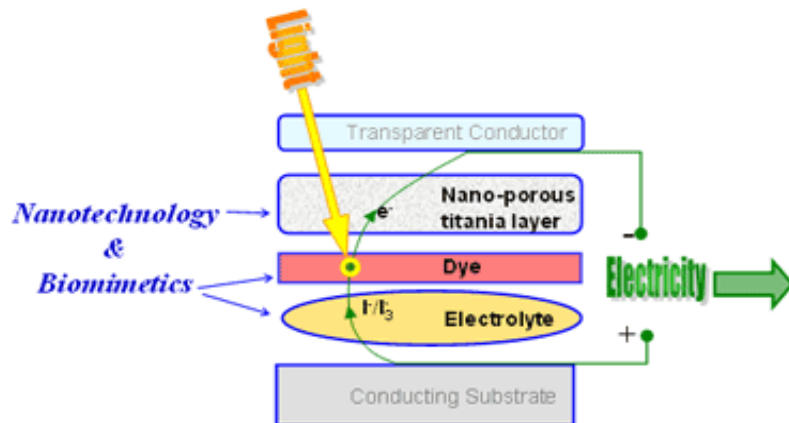
La cellule photovoltaïque de Grätzel



DYESOL : DyeSolarCell (DSC), a 3rd generation photovoltaic technology



Dyesol BIPV Panel
(registered design)



<http://www.dyesol.com/page/Technology>

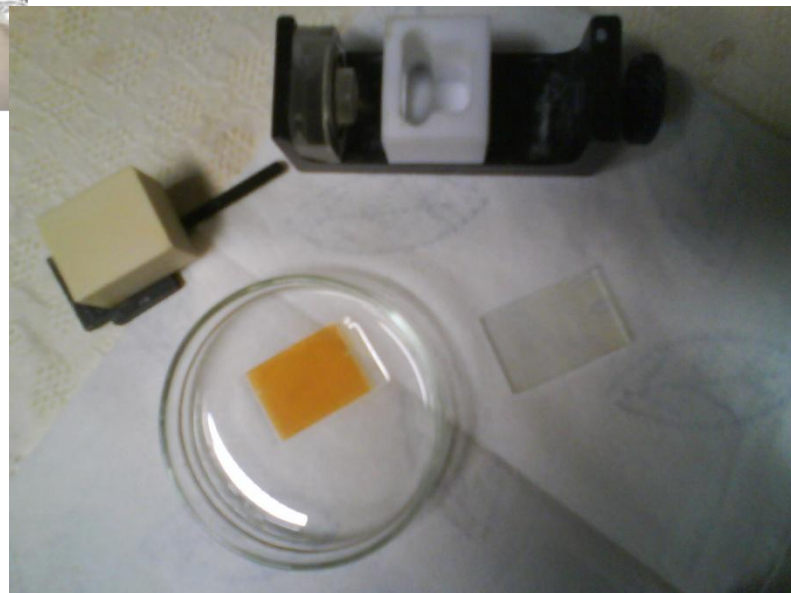
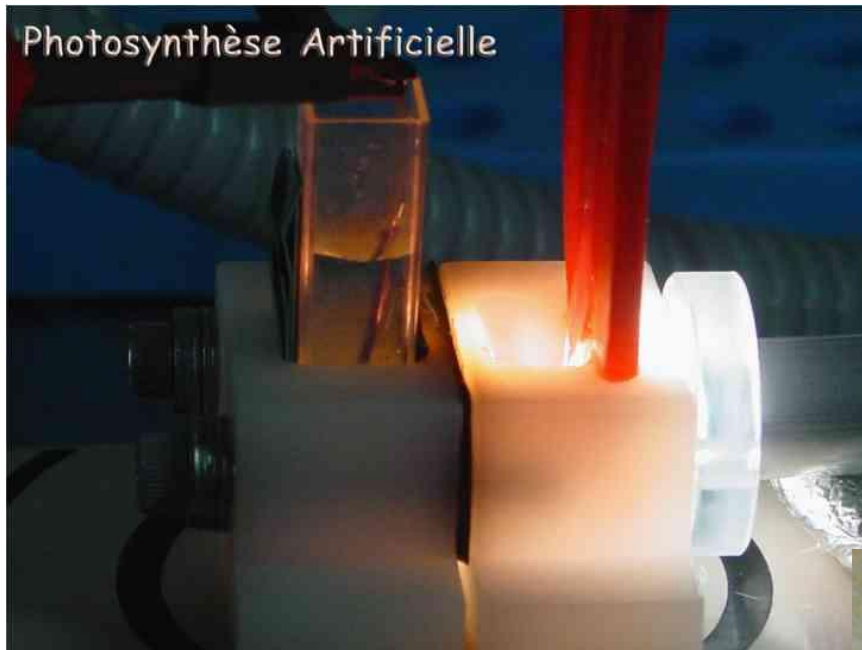
Résumé des avantages de la technologie DSC



- ✓ Surface nanostructurée – absorption important (*1000, 1 g/m²)
- ✓ moins cher que technologie Si
- ✓ 1 chromophore = 1 site catalytique : TOF faible acceptable (Grätzel : ~0.2 s⁻¹)
- ✓ Transfert d'électron chromophore - semi-conducteur rapide : directionnalité
- ✓ TiO₂ : n-type, NiO: p-type
- ✓ Dispositif Tandem (combinaison de 2 chromophores différents, meilleur rendement) facile

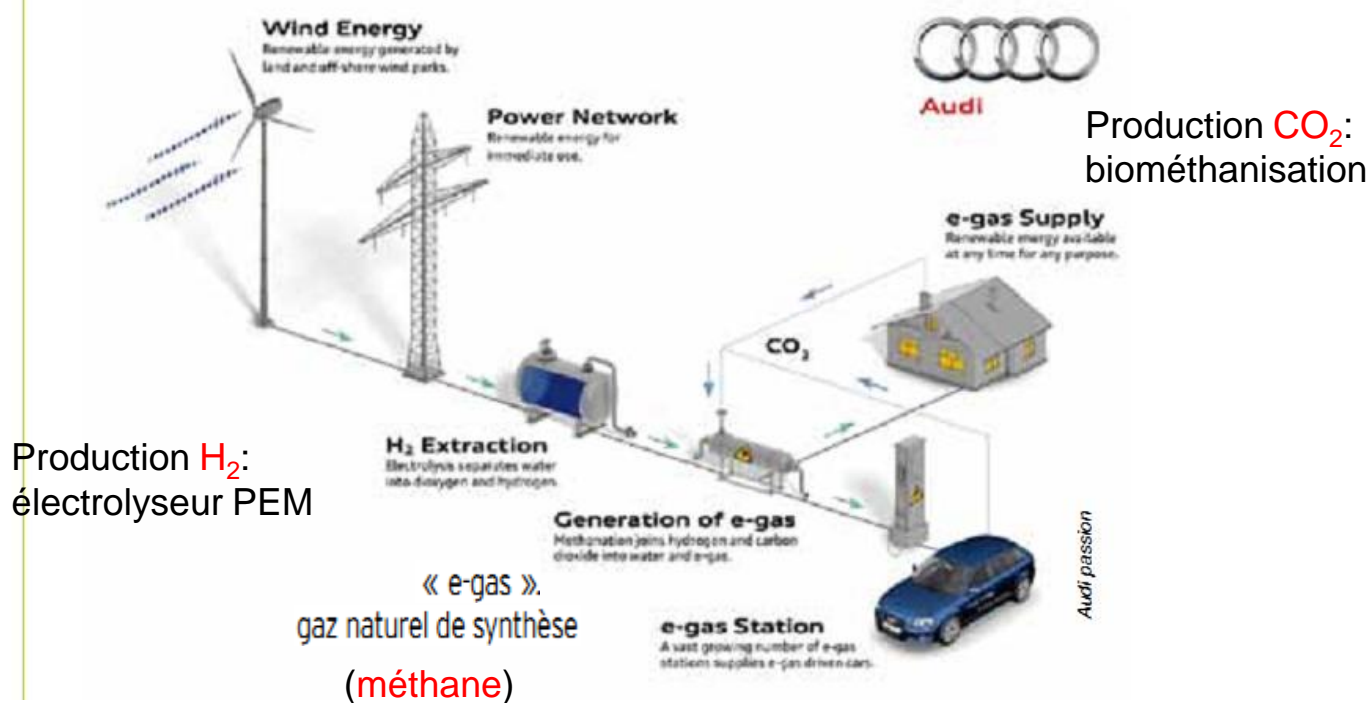
Qu : comment se comporte le gaz dans la couche nanoporeuse ??
(porosité 50-65%, taille pores 15 nm, diamètre particules 15-20 nm)

Photosynthèse Artificielle



Audi s'intéresse à la chaîne de l'énergie

actualités internationales (suite)



« Gazette de l'Hydrogène » Juin 2011
www.observ-h2.fr

Concept Raffinerie solaire

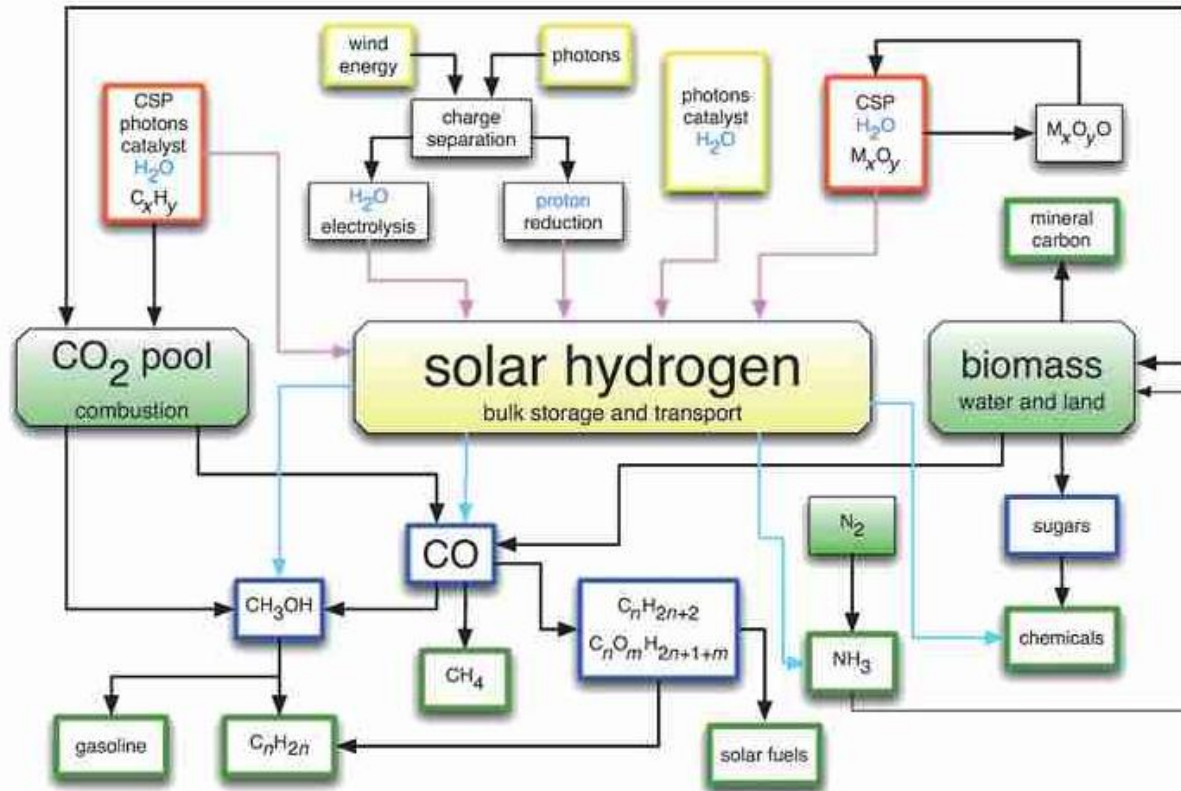
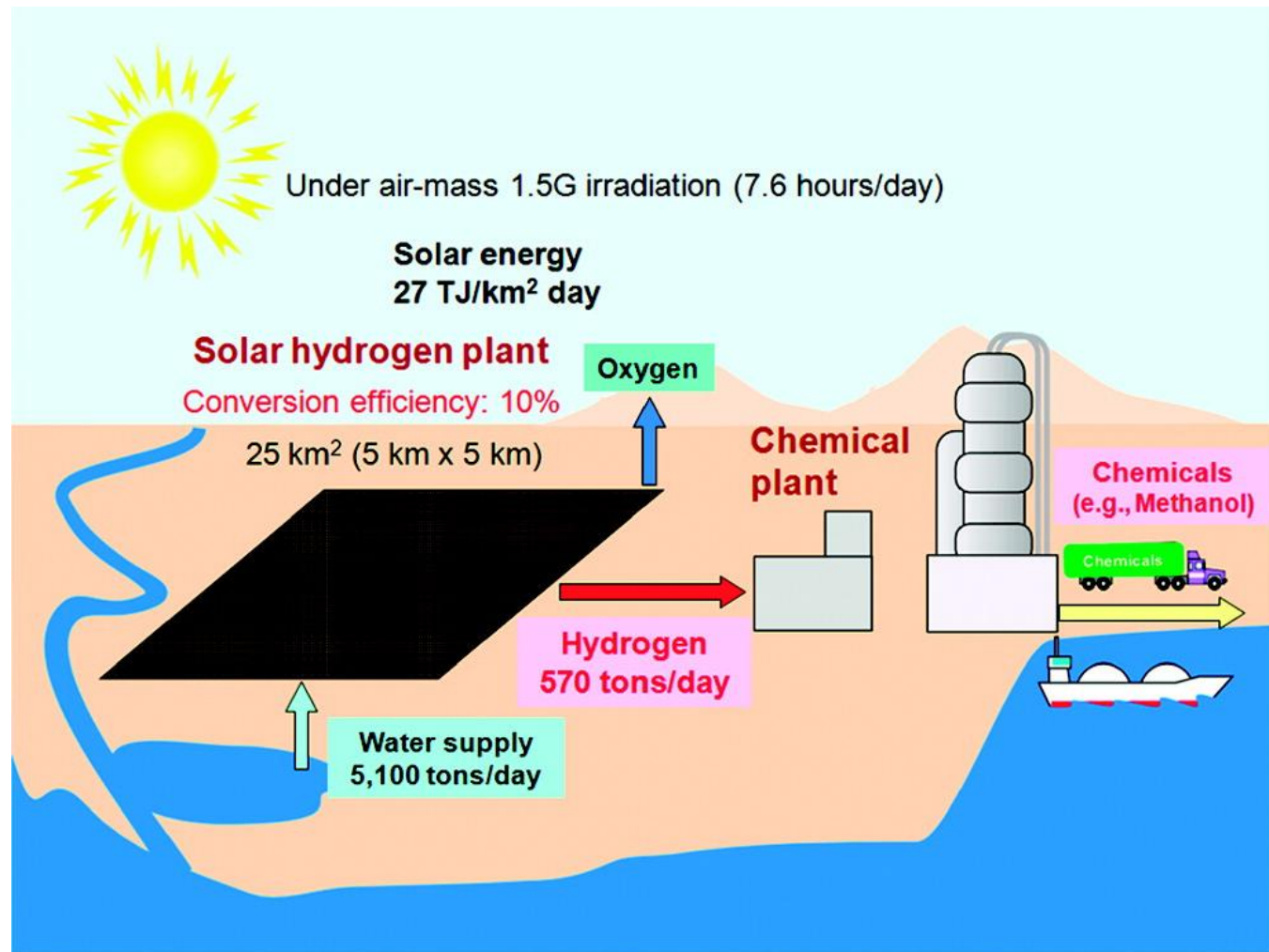


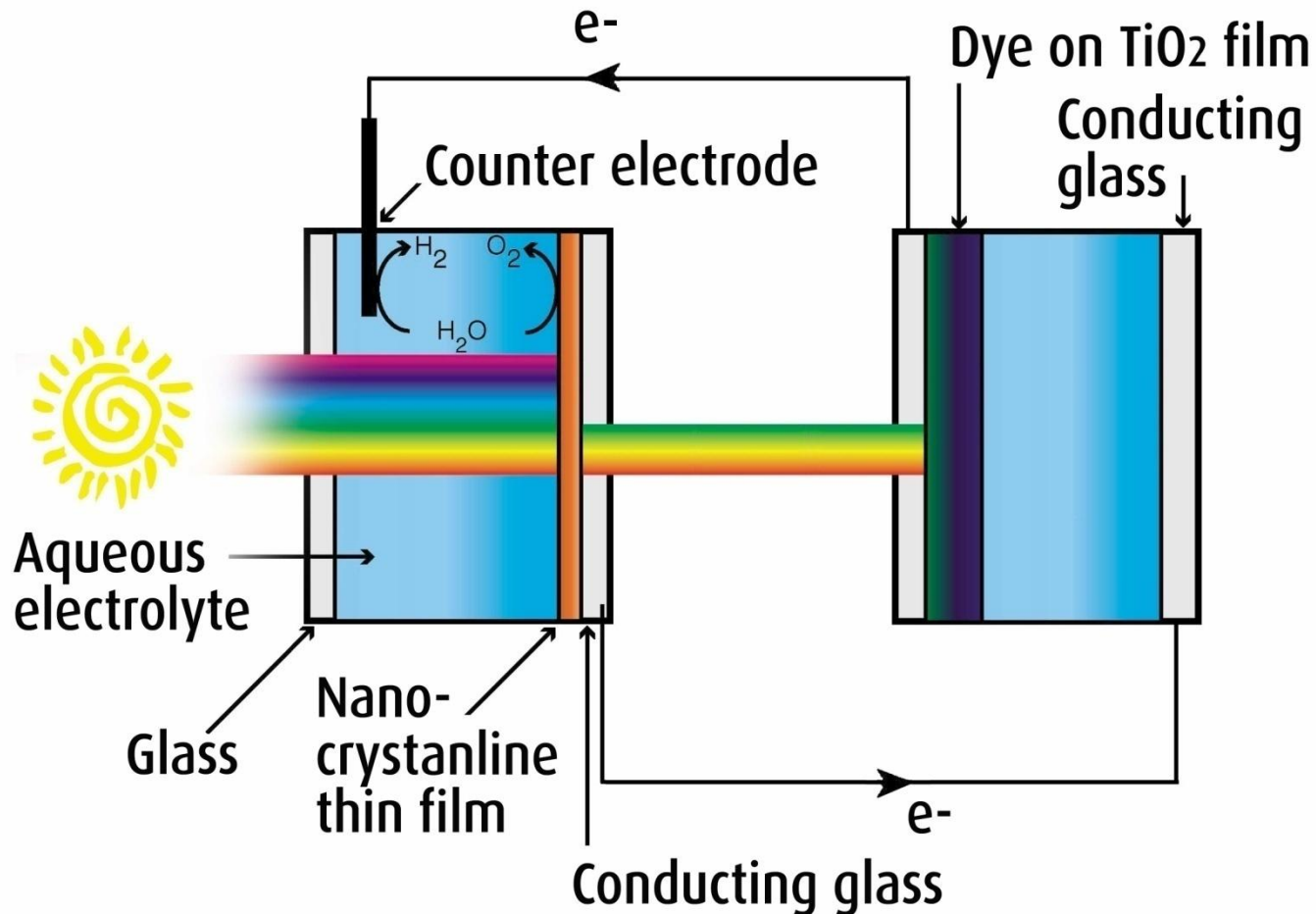
Figure 3. The solar refinery as a concept for chemical energy storage science and technologies. Several concepts allow the generation of solar hydrogen (top, CSP=concentrated solar power, one method of solar thermal energy harvesting). Combination with carbon or nitrogen allows the synthesis of platform molecules (blue) that can be further converted to typical refinery products (green boxes) as energy carriers suitable for application in many existing technologies. Mineral carbon is a form of CO₂ sequestration that uses waste biomass and contributes to the control of greenhouse-gas emission without creating risks for future generations. Multiple interconnects exist, such as the use of ammonia as fertilizer for biomass. The availability of large amounts of clean water is a prerequisite, but this resource may be scarce in the future.

Production à grande échelle d'Hydrogène par photolyse solaire de l'eau



Kazuhiko Maeda; Kazunari Domen; *J. Phys. Chem. Lett.* **2010**, 1, 2655-2661.

Cellule "Tandem" PEC (PV → él. "bias")



Résumé



- Importance croissante des énergies renouvelables
- Potentiel de l'énergie solaire, pb stockage
- Réaction clé: oxydation de l'eau
- Problème: catalyseurs (Pt etc). Solutions bio-inspirées?
- Produit clé: Hydrogène ou vecteurs d'hydrogène liquides, exemple: acide formique pour stocker l'hydrogène $\text{HCOOH} \rightleftharpoons \text{H}_2 + \text{CO}_2$!
- Valorisation du CO_2 (20^{ème} siècle: fixation N_2 , 21^{ème} siècle: fixation CO_2)
- Solutions décentralisées, diversifiées

Remerciements



CEA/iBiTecS

Spectroscopie:

A. Quaranta
S. Andriana
V. Dichiarante
S. Protti

Chimie:

C. Herrero
A. Baron
S. Sheth

Biologie:

AW. Rutherford
A. Boussac

P. Sétif
H. Bottin
K. Sybirna
B. Lagoutte

Univ. Paris XI

Chimie:

A. Aukauloo
MF. Charlot
B. Vauzeilles



CEA/IRTSV (Grenoble)

V. Artero
A. Fihri
C. Baffert

CEA/IBEB (Cadarache)

G. Peltier
L. Cournac

