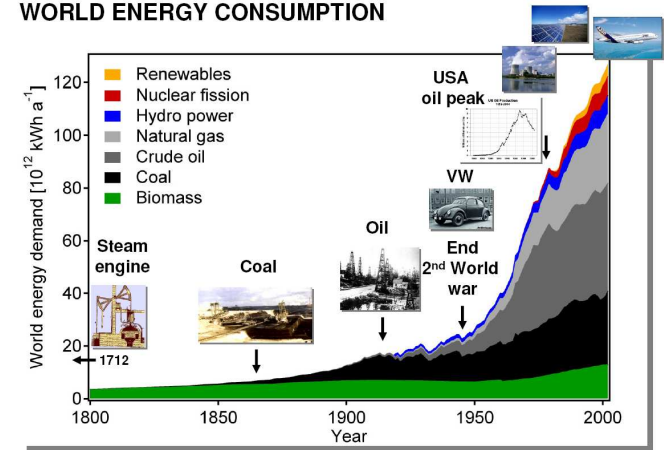


# L'énergie... vers quel futur?

Mercredi 1<sup>er</sup> juillet 2009  
Benoît Stempfel



## WORLD ENERGY CONSUMPTION



Ref.: Jean-Marie Martin-Amouroux, IEPE, Grenoble, France

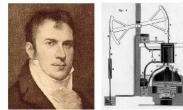
Andreas Zittel, Empa 2008

bs/090701

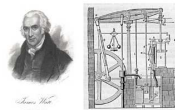
## THE EFFICIENCY PARADOX



Thomas Savary (1698)



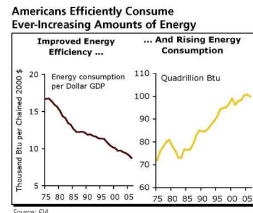
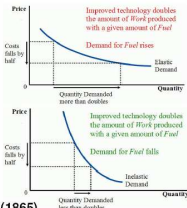
Thomas Newcomen (1712)



James Watt (1769)



William Stanley JEVONS  
Book: *The Coal Question* (1865)



Ref.: Jeff Rubin and Benjamin Tal, "Does Energy Efficiency Save Energy?", CIBC World Markets Inc. StrategEcon - November 27, 2007

Andreas Zittel, Empa 2008

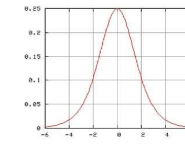
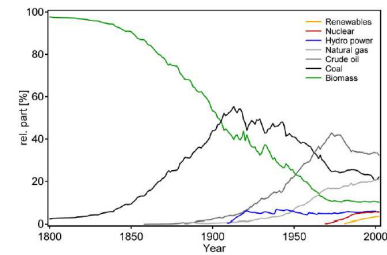
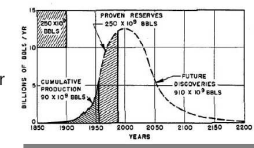
bs/090701

## PEAK OIL



M. King Hubbert  
October 5th, 1903 – October 11th, 1989

"Our ignorance is not so vast as our failure to use what we know."



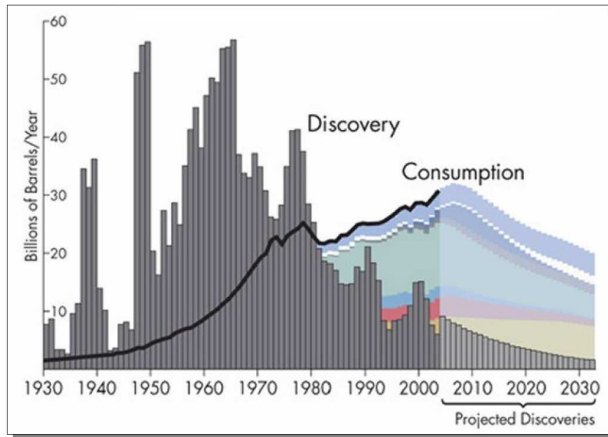
$$z = \frac{e^{-t}}{(1 + e^{-t})^2} = \frac{1}{2 + 2 \cosh t}$$

after M. King Hubbert, "Nuclear energy and the fossil fuels", Drilling and Production Practice (1956)

Andreas Zittel, Empa 2008

bs/090701

## THE GROWING GAP

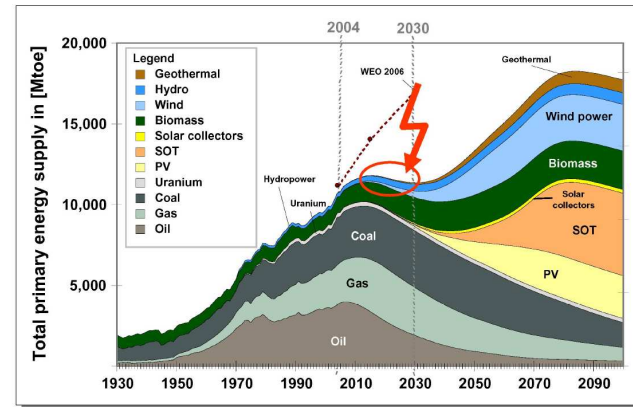


Andreas Zittel, Empa 2008

Ref.: Colin J. Campbell, Oil Depletion Analysis Centre ("ODAC")

bs/090701

## WORLD ENERGY OUTLOOK by LBST

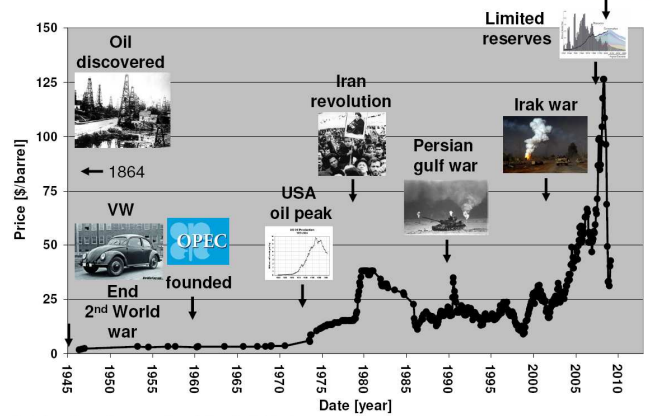


Ref.: Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST), Daimlerstr. 15, D-85521 Ottobrunn,

Andreas Zittel, Empa 2008

bs/090701

## WORLD OIL PRICE



Ref.: [http://www.ioga.com/Special/crudeoil\\_Hist.htm](http://www.ioga.com/Special/crudeoil_Hist.htm)

Andreas Zittel, Empa 2008

bs/090701

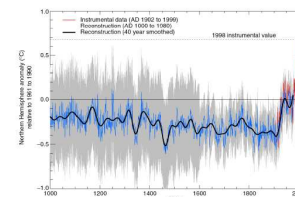
## CO<sub>2</sub> AND CLIMATE CHANGE



Svante Arrhenius (1859-1927)

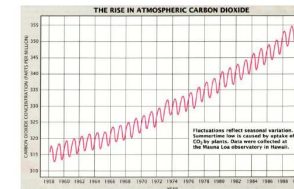
"On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground"

Philosophical Magazine 41, (1896), pp. 237-276

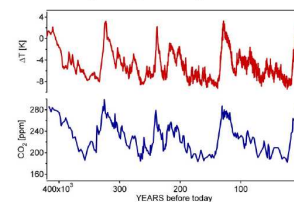


Climate Change 2002, published by the IPCC, Mann et al., Geophys. Res. Letters 26 (1999), pp. 759

Andreas Zittel, Empa 2008



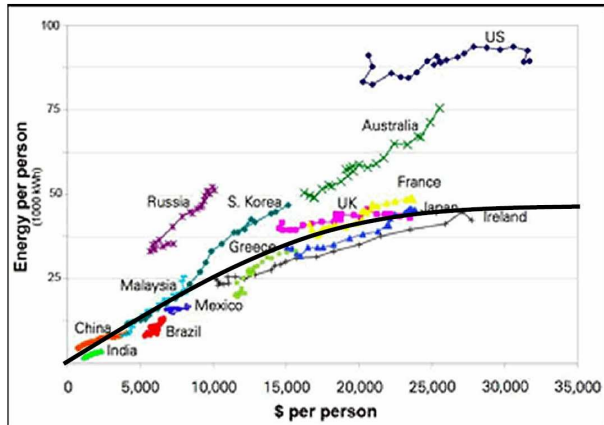
Climate Change 2002, published by the IPCC.



Petit, J.R. et al., "Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica." *Nature*, 399 (1999), pp. 429-436.

bs/090701

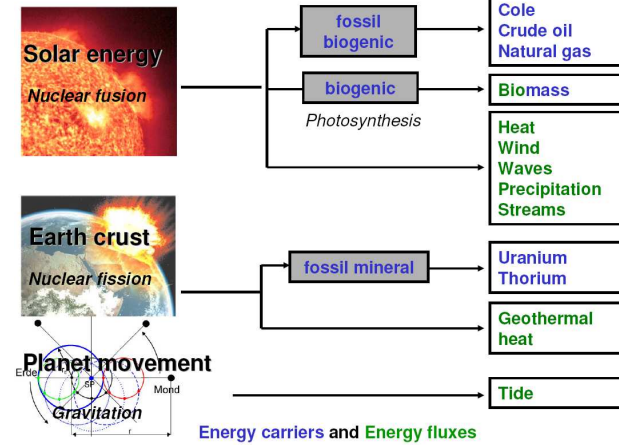
## ECONOMY AND ENERGY



Andreas Zittel, Empa 2008

bs/090701

## ENERGY "SOURCES"

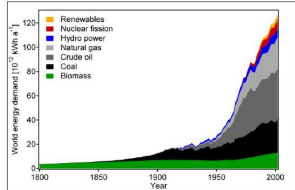


/ Andreas Zittel, Empa 2008

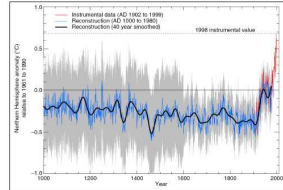
bs/090701

## MAJOR CHALLENGES OF THE 21<sup>st</sup> CENTURY

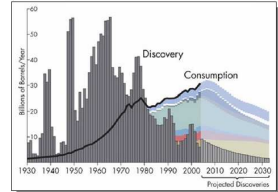
### ENERGY DEMAND



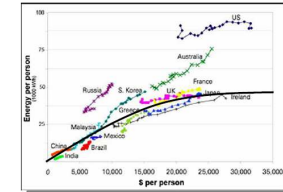
### CLIMATE CHANGE



### LIMITED RESOURCES



### ECONOMIC DEPENDENCY

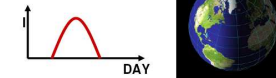


Andreas Zittel, Empa 2008

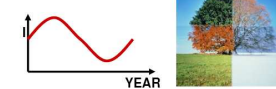
bs/090701

## RENEWABLE ENERGY

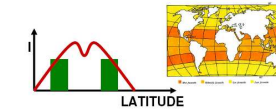
### DAY-NIGHT CYCLE



### SEASONAL CYCLE



### SPATIAL ENERGY DISTRIBUTION



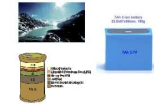
### CONVERSION



### RESIDENTIAL Heat



### STORAGE



### INDUSTRY Heat & Work



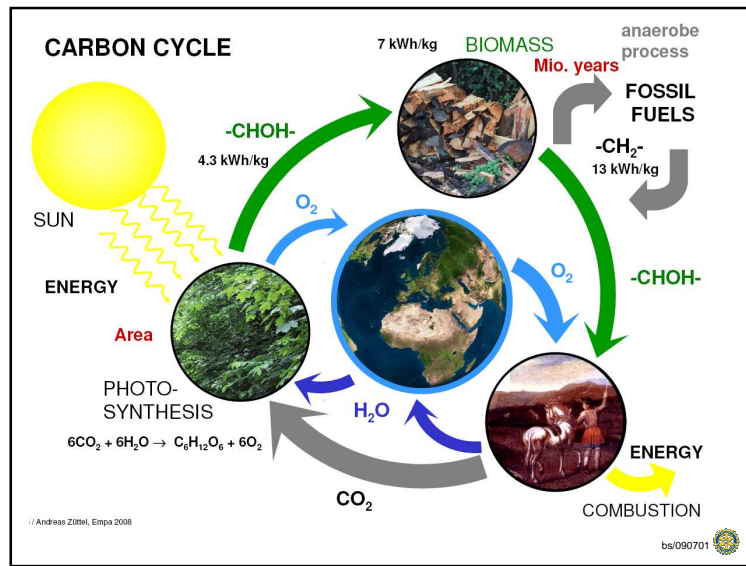
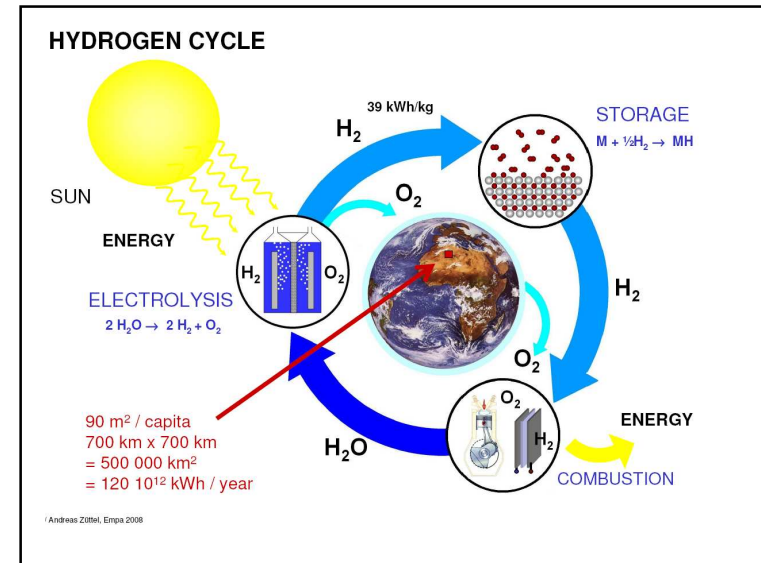
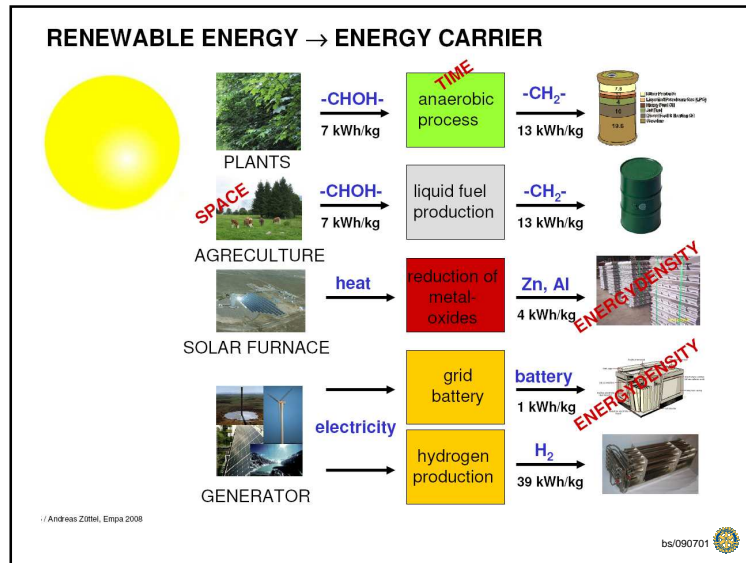
### TRANSPORT



### MOBILITY Work



bs/090701



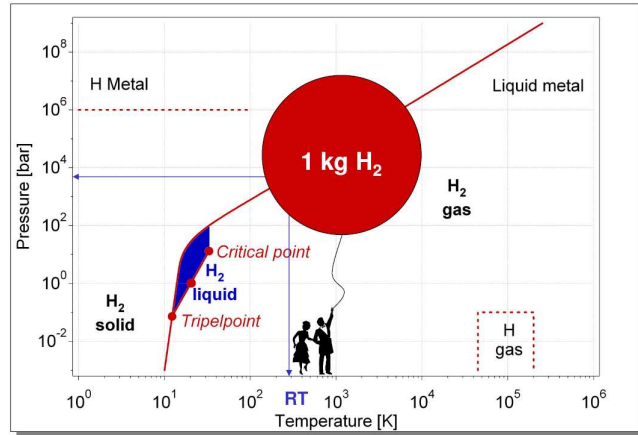
### LZ 129 "HINDENBURG"

New York / Lakehurst, May 6<sup>th</sup> 1937, 6 pm

**Accident:**  
While the airship was landing she has got on fire about 80 meters above ground level and crashed.  
Fatalities:  
13 of 36 passengers,  
22 of 60 crew members  
1 member of 228 ground staff holding the ship.

bs/090701

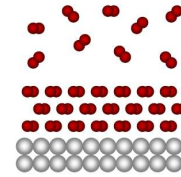
### PRIMITIVES PHASEDIAGRAM VON WASSERSTOFF



Ref: W. B. Leung, N. H. March and H. Motz, Physics Letters 56A (6) (1976), pp. 425-426  
 Andreas Zittel, Empa 2008

### HYDROGEN STORAGE

#### Liquid hydrogen



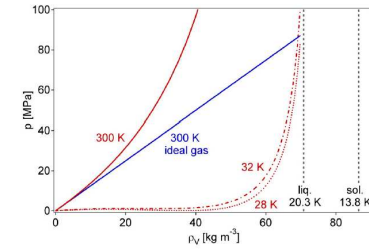
75% Orthohydrogen

at RT

25% Parahydrogen

$$\Delta H(T < 77\text{K}) = 523 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$$

$$\Delta H_{\text{vap}}(T = 21.2\text{K}) = 452 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$$



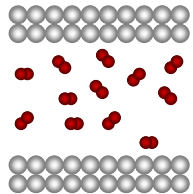
#### Energy use for liquefaction:

$$W_{\text{th}} = 3.92 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$$

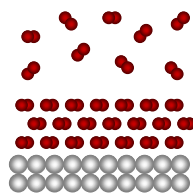
$$W_{\text{prac}} = 10 \text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$$

$$\text{Density (H}_2 \text{ liq.)} = 70.8 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

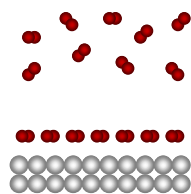
### HYDROGEN STORAGE



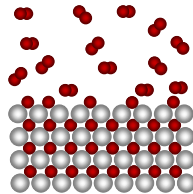
Hydrogen gas



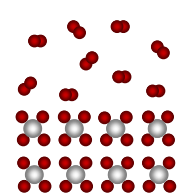
Liquid hydrogen



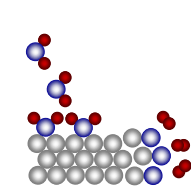
Physisorption



Metalhydride



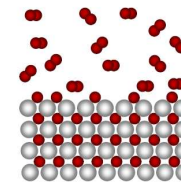
Complex hydrides



Chemical hydrides

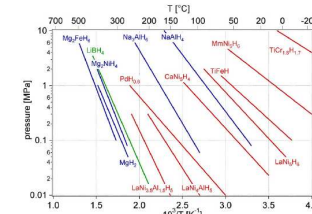
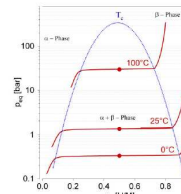
### HYDROGEN STORAGE

#### Metalhydride



$$\rho_V < 150 \text{ kg m}^{-3}$$

$$S^0(\text{H}_2) = 130 \text{ J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$$





bs/090701

### VOLUME OF HYDROGEN STORAGE MEDIA

**4 kg hydrogen = 560 MJ<sub>therm.</sub>**

**Mg<sub>2</sub>FeH<sub>6</sub>    LaNi<sub>5</sub>H<sub>6</sub>    H<sub>2</sub> (liquid)    H<sub>2</sub> (200 bar)**

3 l gasoline / 100 km = 9 kWh<sub>mech.</sub> / 100 km = 32 MJ<sub>mech...</sub> / 100 km

Ref.: L. Schlapbach & A. Züttel, NATURE | VOL 414 | 15 NOVEMBER 2001 | pp. 353-358

bs/090701

#### METAL HYDRIDES

$$x \text{MH}_{2/x} \rightarrow x \text{M} + \text{H}_2$$

$$\ln\left(\frac{p}{p_0}\right) = -\frac{\Delta H^0}{R} \cdot \frac{1}{T} + \frac{\Delta S^0}{R}$$

#### COMPLEX HYDRIDES

$$2/3 \text{ABH}_4 \rightarrow 2/3 \text{AH} + 2/3 \text{B} + \text{H}_2$$

$$T_{\text{dec}}(p = p_0) = \frac{\Delta H^0}{\Delta S^0}$$

Ref. K. Miwa, N. Ohba, S. Towata, Y. Nakamori, S. Orimo, Phys. Rev. B 69 (2004), 245120

Andreas Züttel, Empa 2008

bs/090701

### SYNTHETIC FUELS

Manzanares, Spain 1989

Electricity

H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub> + 1/2 O<sub>2</sub> ELECTROLYSIS

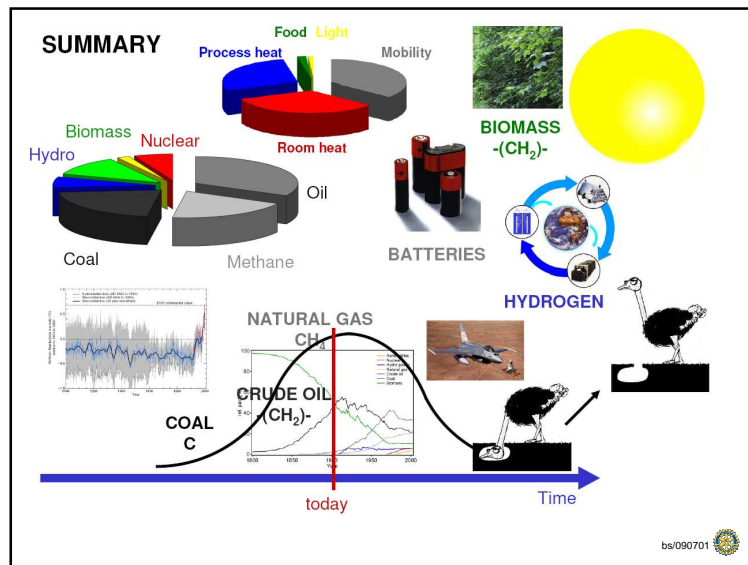
n CO<sub>2</sub> + (2n+1) H<sub>2</sub> → CH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>)<sub>n-1</sub> CH<sub>3</sub> + 2n H<sub>2</sub>O SYNTHESIS

COMBUSTION

ENERGY

Ing. Prof. Jörg Schlaich, Stuttgart Germany

bs/090701



**Une révolution dans le domaine de l'énergie solaire** Communiqués de presse

22 Juin 2009

Des chercheurs de l'EPFL et de l'Université de Stanford ont développé et testé à Lausanne des cellules photovoltaïques de nouvelle génération. Une révolution dans le domaine et une première mondiale en termes de technologie, qui fait l'objet d'une publication dans la revue *Nature Photonics*.

"Un nouveau paradigme dans la manière de capter la lumière et de la transformer en énergie électrique." Professeur à l'EPFL et concepteur du système de cellules solaires à colorants, Michael Graetzel décrit en ces termes la découverte publiée dans *Nature's photonics* par son équipe et ses partenaires de Stanford, Berkeley et GeorgiaTech. Grâce à l'adjonction d'un second colorant, les cellules solaires sont désormais capables de réagir à une plus grande partie du spectre lumineux.

Couramment désigné sous le nom de cellules solaires de Graetzel en référence à leur concepteur, le système voit le jour au début des années 90. Le professeur de l'EPFL développe un système à base de colorants qui, comme la chlorophylle naturelle, sont stimulés par la lumière et génèrent des charges électriques. La technique permet de produire des cellules solaires particulièrement efficaces en faible luminosité et à moindre coût – un enjeu capital qui compense largement le rendement légèrement plus faible que les cellules traditionnelles.

**Améliorer le rendement**


Les colorants utilisés par Michael Graetzel, appelés phthalocyanines, ne sont sensibles qu'à une partie restreinte du spectre lumineux. Les recherches menées conjointement entre les chercheurs de l'EPFL et leurs confrères américains permettent d'étendre la sensibilité spectrale de la cellule aux parties rouges, vertes et bleues de la lumière visible, et donc d'en améliorer l'efficacité. Cela est rendu possible grâce à l'adjonction de nouveaux colorants, les pérylènes (cf infographie jointe).

Les pérylènes ne génèrent pas directement de charge électrique. Mais ils réagissent aux parties bleues et vertes du spectre lumineux. Ils communiquent leur énergie aux phthalocyanines, qui à leur tour transmettent une charge électrique. Sans l'assistance de ces nouveaux colorants, les phthalocyanines seules ne réagiraient qu'à la partie rouge du spectre. «Il n'est pas possible pour un seul colorant d'être sensible à l'entier du spectre lumineux», précise Khaja Rabeeruddin, chercheur dans l'équipe de Michael Graetzel. D'où l'incorporation d'un second colorant. C'est une première mondiale.»

**Une technologie inspirée de la nature**

Ce mode de transfert d'énergie indirect s'inspire des modèles naturels. Dans le processus de la photosynthèse des plantes, certaines molécules de chlorophylle émettent des signaux, que d'autres reçoivent avant que se mettent en route des processus de transfert de charges électriques. «Il s'agit de ce que l'on appelle des transferts d'énergie par interactions dipolaires», explique Michael Graetzel. Jusqu'à présent, les colorants de nos cellules avaient pour unique rôle de générer directement les charges électriques.»

bs/090701

 11 Septembre 2003

**Percée mondiale dans le domaine du photovoltaïque**

La cellule photovoltaïque inédite développée il y a 12 ans à l'EPFL, passe le dernier test qui l'empêchait jusque-là d'être concurrentielle avec les cellules solaires traditionnelles. "Les coûts de fabrication pourraient diminuer par cinq", estime un expert. De nombreuses industries à travers le monde sont intéressées par ces travaux soutenus par le Fonds national suisse.

Elle a eu chaud, cette cellule solaire photovoltaïque de l'EPFL. Mais finalement, elle a passé haut la main l'épreuve du four et du solarium". Ce qui en fait la première candidate mondiale sérieuse dans la course industrielle vers des systèmes photovoltaïques à bas coûts. Le meilleur marché possible, efficaces, et résistantes à la chaleur et au rayonnement solaire. Telles sont en effet les trois qualités demandées à toute cellule photovoltaïque désirant concurrencer la technologie actuelle, basée sur le silicium. Il y a 12 ans, le professeur Michael Graetzel et son équipe étaient parvenus à créer la première cellule solaire nanocristalline à colorant; celle-ci ne réunissait pourtant que les deux premières conditions. Aujourd'hui, la troisième - une grande thermo-stabilité à haute température - vient aussi d'être remplie puisque ces chercheurs présentent, dans la revue scientifique renommée *Nature Materials* reprise par sa pendante *Science*, leur nouveau prototype qui satisfait au critère standard en la matière: garantir moins de 10% de pertes de performance après avoir été placée pendant 1000 heures (près de six semaines) dans un four chauffé à 80°C ainsi que dans un simulateur solaire à 55°C. Comme la photosynthèse, le procédé utilisé par les cellules photovoltaïque à colorant constitue un système de conversion de l'énergie solaire basé sur des molécules. "Et comme tout système moléculaire, il est fragile", glisse Michael Graetzel. Dans les premières cellules de l'EPFL, les interfaces entre les matériaux impliqués, soumises à un stress thermique, étaient très instables. "Mettez votre main dans un four à 80°C pendant un mois, et vous verrez ce qu'il en reste!", compare le chercheur. Le colorant se dissolvait par exemple dans les petites quantités d'eau inévitablement présentes dans la cellule. Autre problème: impossible d'utiliser un électrolyte volatil.

bs/090701