



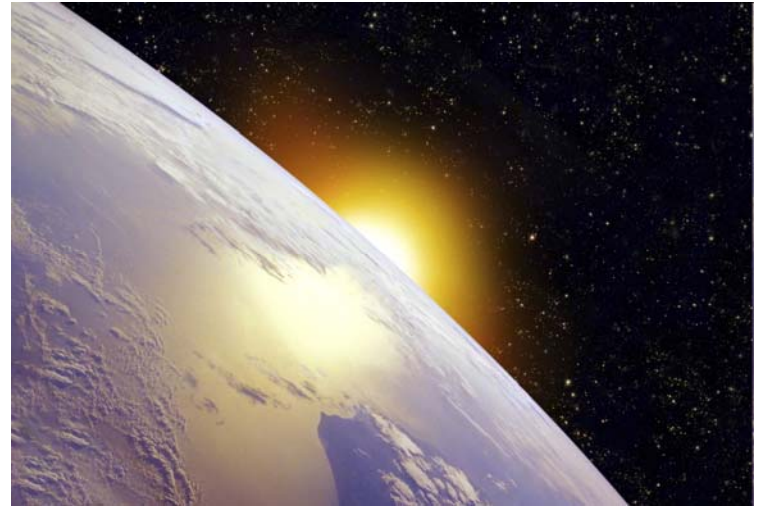
# ***Les nanotechnologies et l'avenir de l'énergie***

Alexandre ROJEY



# ***Les nanotechnologies et l'avenir de l'énergie***

- **Un nouveau paradigme?**



- **Les espoirs de la recherche de base**

- **Les limitations actuelles, économiques et pratiques**

# La convergence NBIC et l'énergie

- Rôle des nanotechnologies
- Prédominance de l'information:  
*it from bit (Wheeler)*
- Progrès scientifique illimité  
*La Singularité (Kurzweil)*



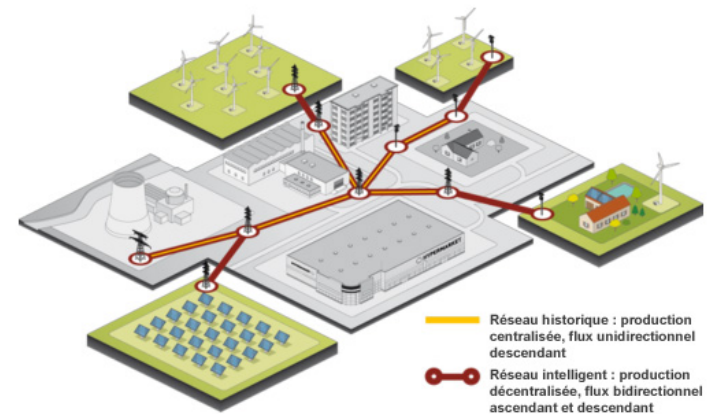
Roco et Bainbridge,  
National Science Foundation, 2002



# L'Internet de l'énergie

## Version J. Rifkin

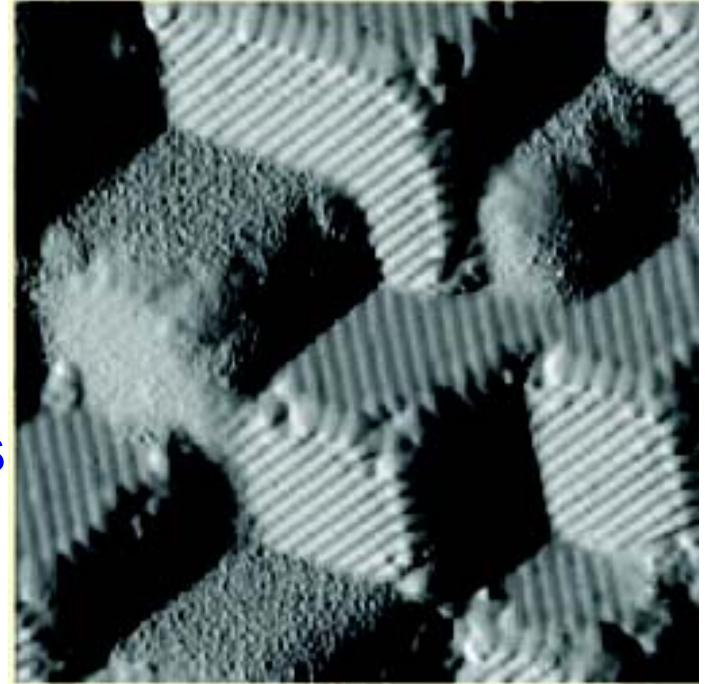
- Production individuelle d'énergie  
= microordinateur
- Stockage d'énergie (hydrogène)  
= mémoire numérique
- Transfert d'énergie (réseau hydrogène)  
= Internet





## ***Les espoirs : recherches de base***

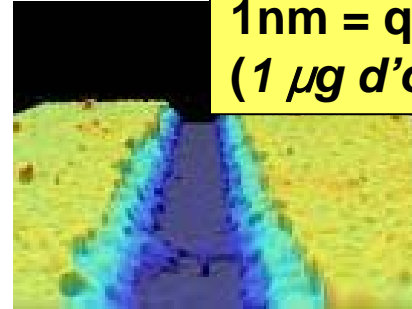
- **Photopiles**
- **Batteries / supercondensateurs**
- **Piles à combustibles**
- **Systemes thermoélectriques**
- **Photolyse de l'eau / Photosynthèse artificielle**



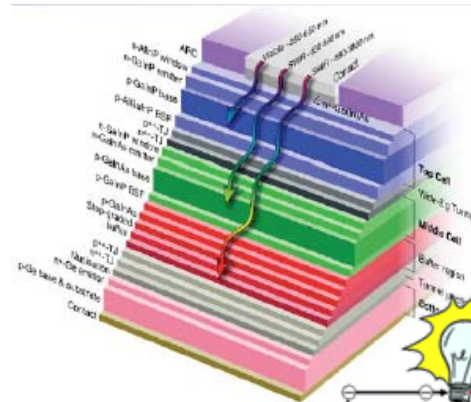
# Ruptures possibles: capteurs photovoltaïques

Couche de  
1mm = qqes kg / m<sup>2</sup>  
1μ = qqes g/m<sup>2</sup>  
1nm = qqes μg / m<sup>2</sup>  
(1 μg d'or fin = 3 c)

- Couches minces  
→ revêtements épaisseur moléculaire



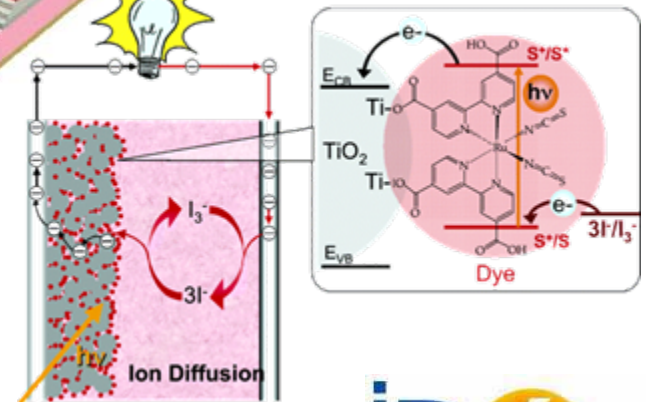
- Couches multi-jonctions  
(et à concentrateurs)



- Membranes souples



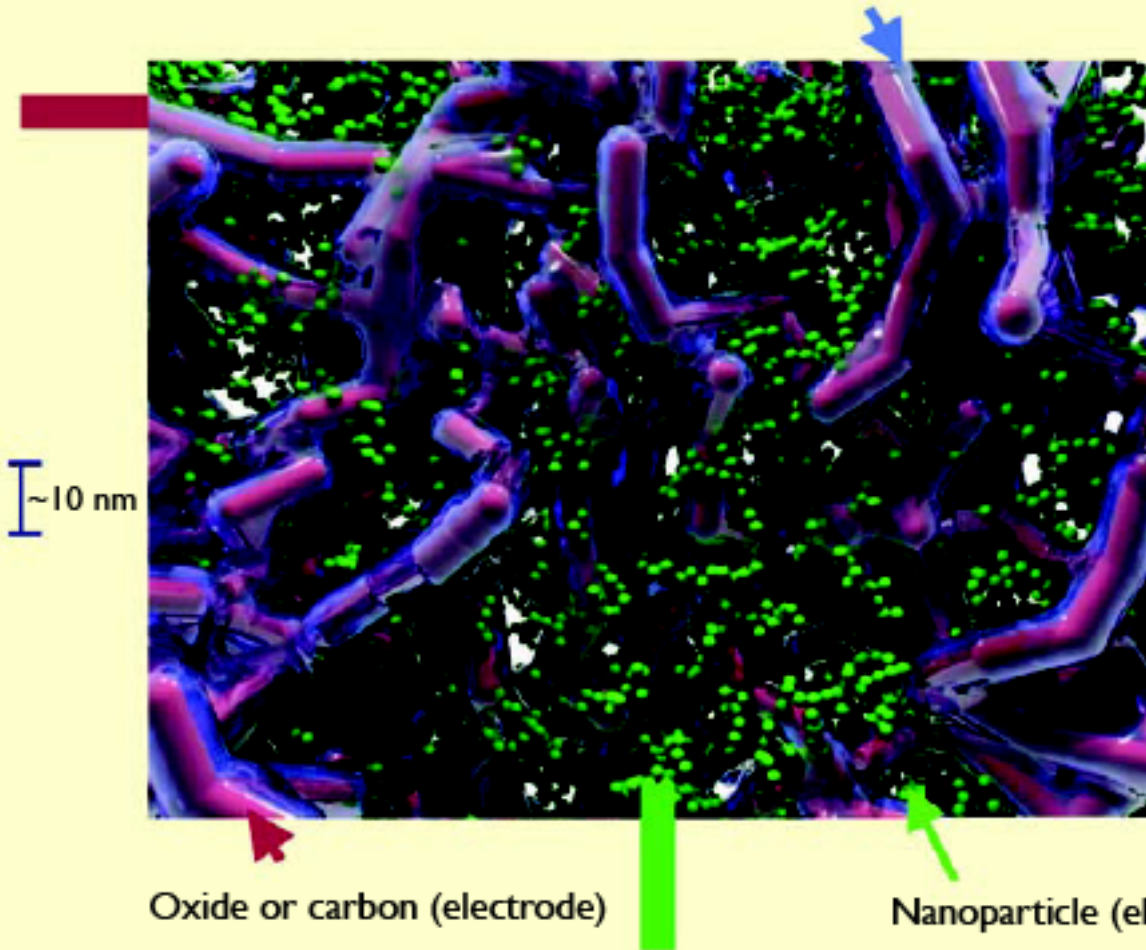
- Cellules organiques /  
cellules de Graetzel



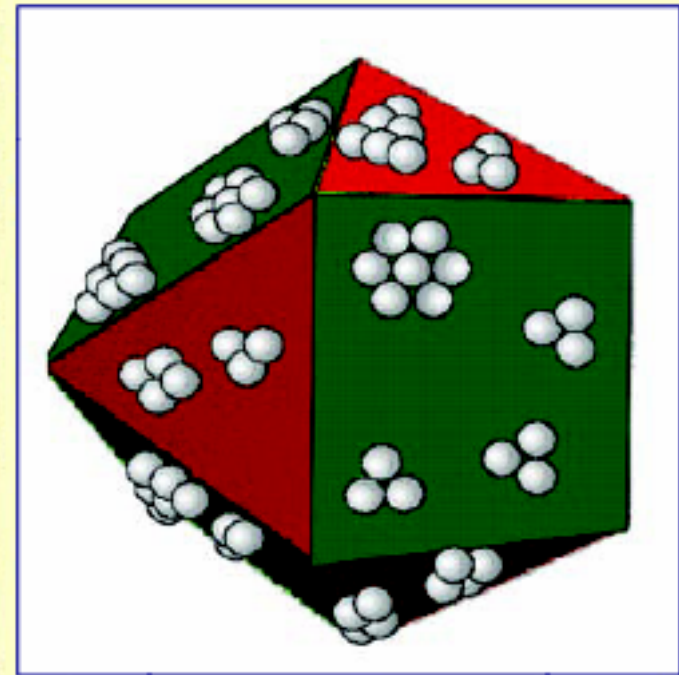


# Nanomaterials for electrodes (fuel cells, batteries)

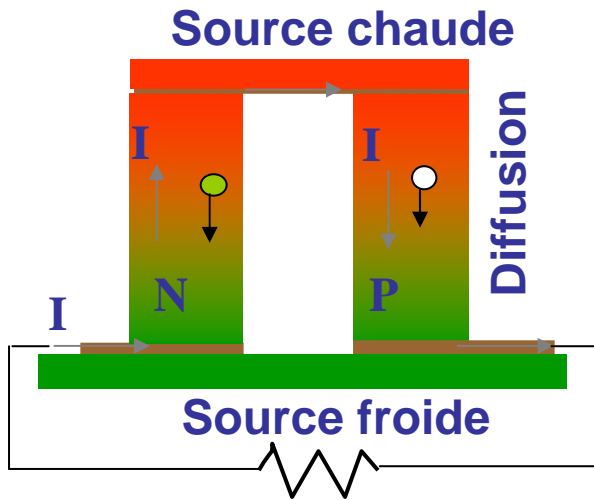
Polymer (separator/electrolyte)



CO tolerant fuel-cell catalyst



# Systemes thermoélectriques



Génération d'électricité

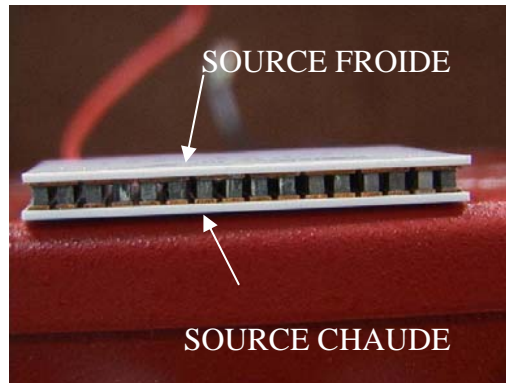
Facteur de mérite:

Conductivité électrique      Coefficient de Seebeck

$$ZT = \frac{\sigma S^2 T}{k_e + k_p}$$

Conductivité électrique

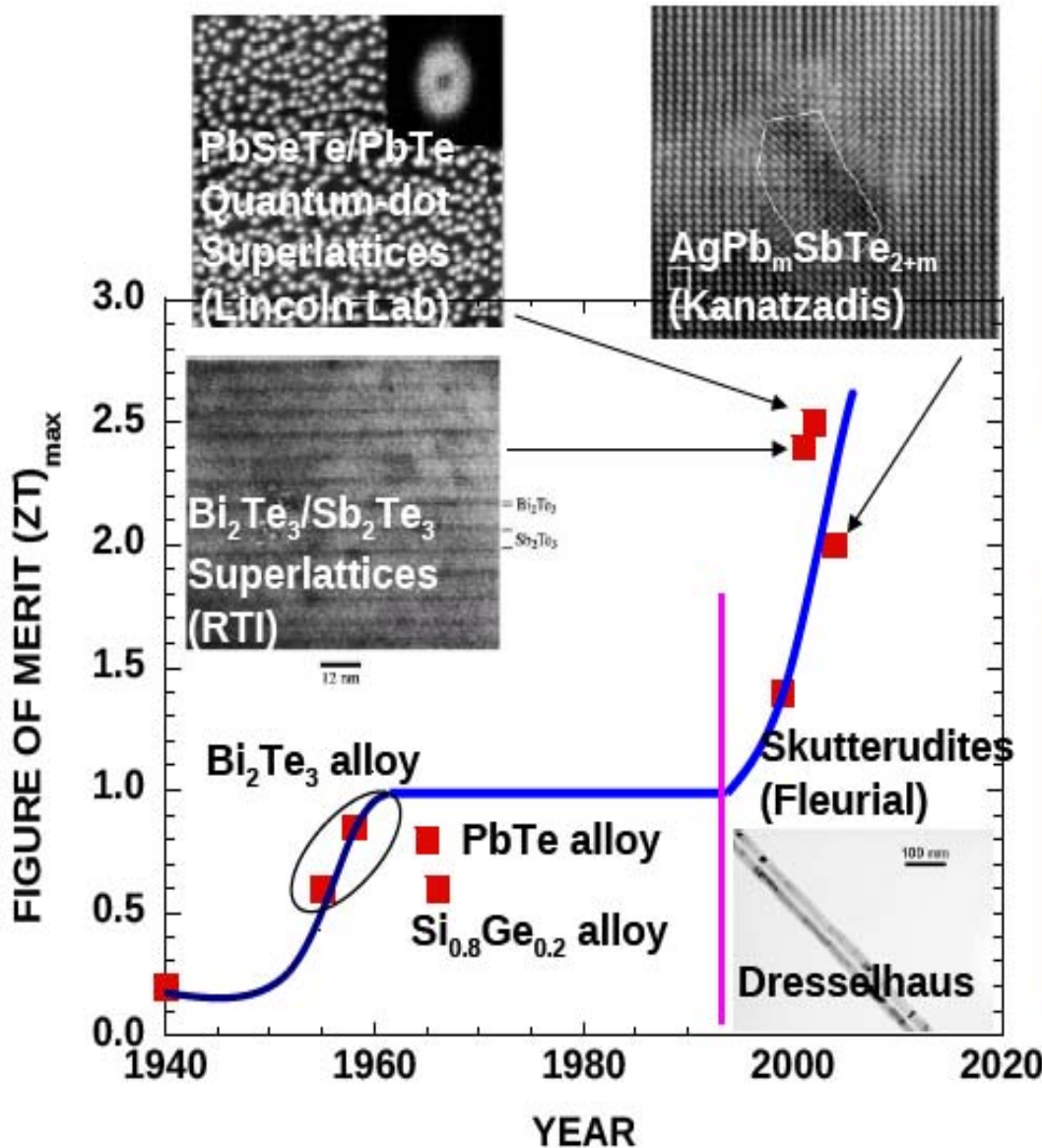
Conductivité thermique



- Réfrigération (Peltier)
- Génération d'électricité (Seebeck):  
 $T(\text{chaud})=500^\circ\text{C}$ ,  $T(\text{froid})=50^\circ\text{C}$   
 $ZT=1$ , Efficacité = 8 %  
 $ZT=3$ , Efficacité = 17 %  
 $ZT=5$ , Efficacité = 22 %
- Réduire la conduction des phonons en améliorant le transport des électrons



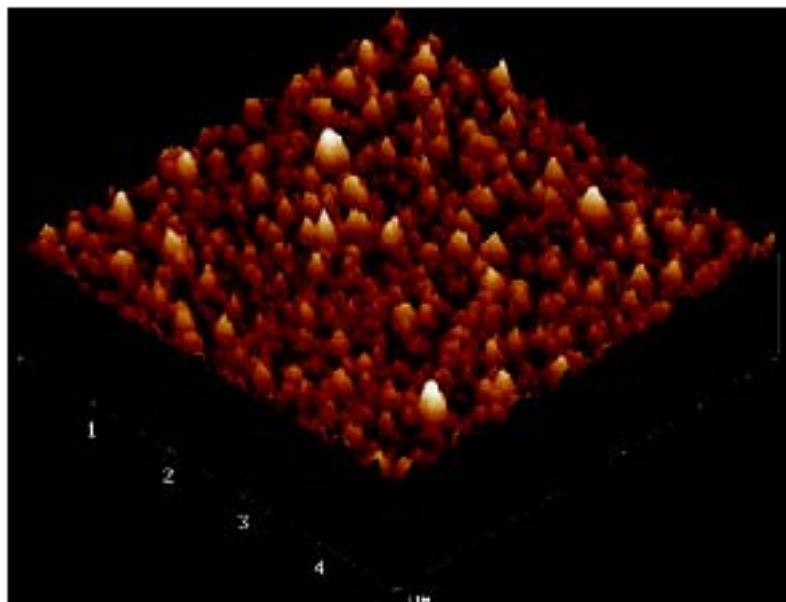
# Nanomatériaux pour systèmes thermoélectriques



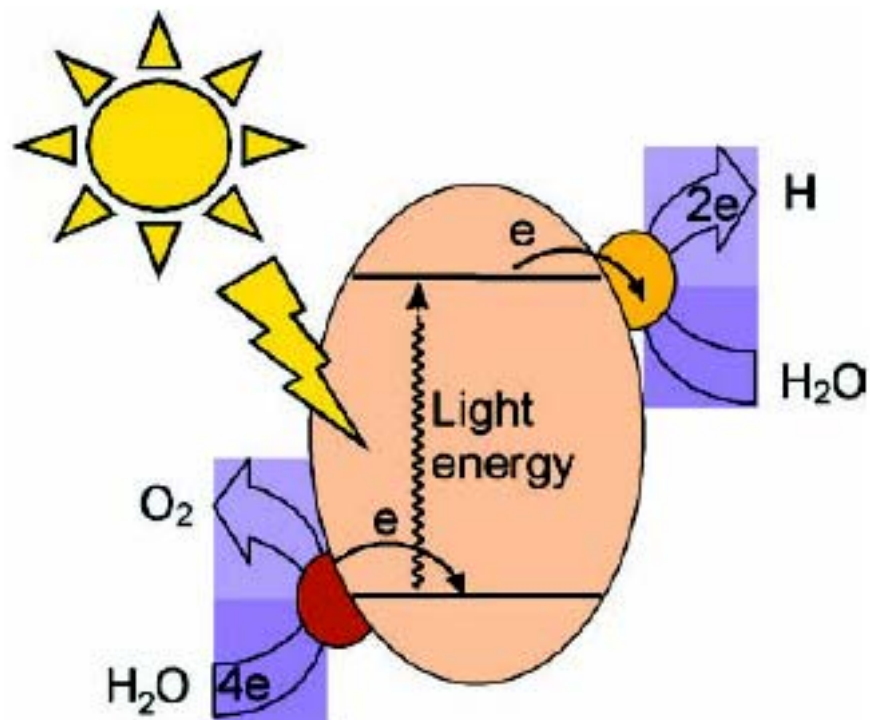
PbTe/PbSeTe	Nano	Bulk
$S^2\sigma$ ( $\mu\text{W}/\text{cmK}^2$ )	32	28
$k$ (W/mK)	0.6	2.5
$ZT$ (T=300K)	1.6	0.3
Harman et al., Science (2003)		

Bi <sub>2</sub> Te <sub>3</sub> /Sb <sub>2</sub> Te <sub>3</sub>	Nano	Bulk
$S^2\sigma$ ( $\mu\text{W}/\text{cmK}^2$ )	40	50.9
$k$ (W/mK)	0.6	1.45
$ZT$ (T=300K)	2.4	1.0
Venkatasubramanian et al., Nature, 2002.		

# Photolyse de l'eau

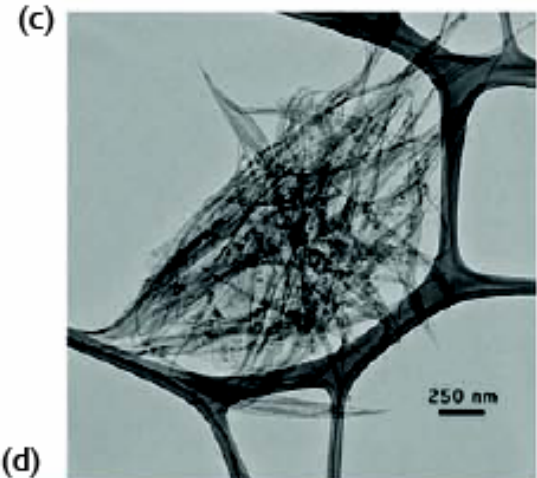


Left: Atomic force microscopy image of titanium dioxide photocatalysts for water splitting. Right: Schematic of the catalytic water splitting process (courtesy of T. Vogt, E. Fujita and J. Muckerman, Brookhaven National Laboratory).

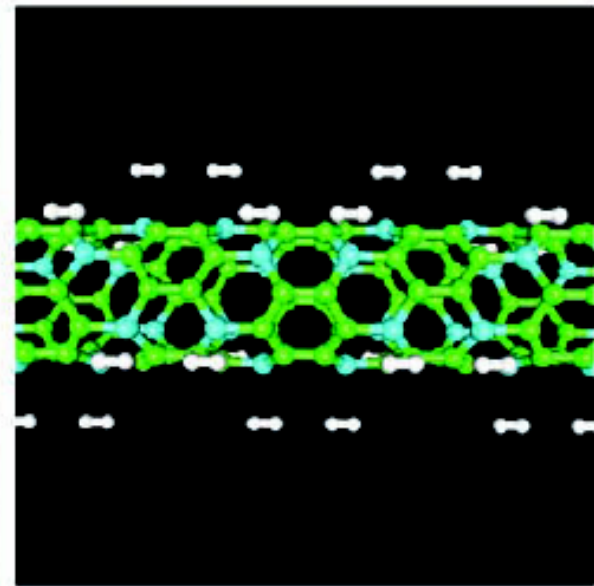


# Stockage de l'hydrogène en phase solide

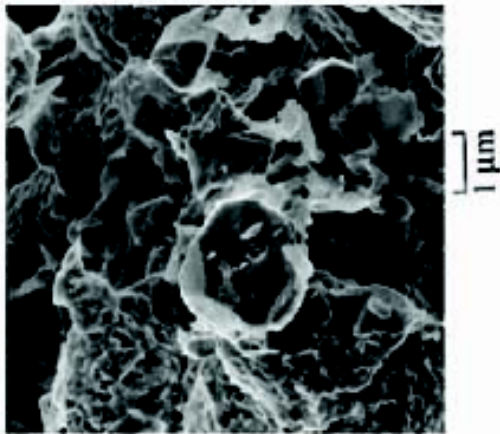
(a) Electron microscope image of Ti doped  $\text{NaAlH}_4$  hydrogen storage material (courtesy of R. Stumpf, Sandia National Labs). (b) Crystal structure of the  $\text{NaAlH}_4$  hydrogen storage material. Al atoms are red, Na atoms are light blue and H atoms are blue (<http://www.sc.doe.gov/bes/reports/abstracts.html#NHE>). (c) Carbon nanotube storage material with nanoscale Ti clusters for enhanced performance (courtesy of M. J. Heben, A. C. Dillon, K. E. H. Gilbert, P.A. Parilla, T. Gennett, J. L. Alleman, G. L. Hornyak, and K. M. Jones, National Renewable Energy Laboratory). (d) Calculation of  $\text{H}_2$  storage on a boron doped carbon nanotube (courtesy of Y. H. Kim, Y. Zhao, M. J. Heben, and S. B. Zhang, National Renewable Energy Laboratory).



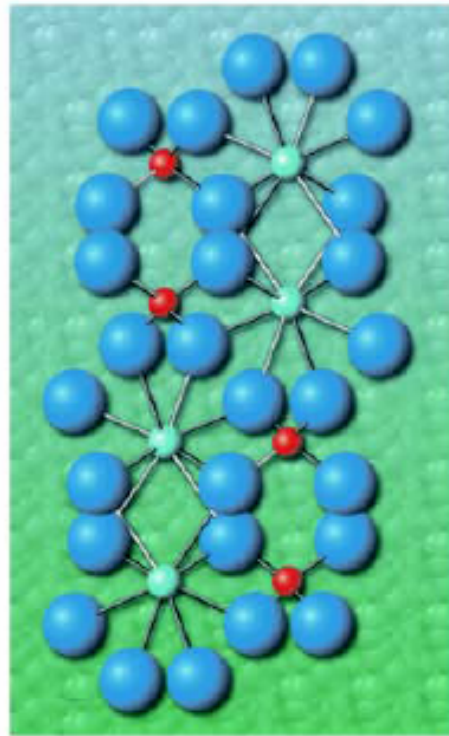
(d)



(a)



(b)





# Nanotubes pour transport de l'électricité

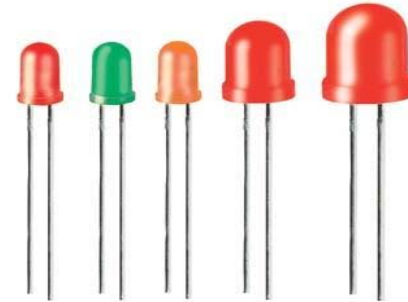




## ***Bilan actuel***



- **Technologies numériques pour gestion de l'énergie en temps réel, mécatronique, électronique embarquée**
- **Diodes électroluminescentes**
- **Progrès, mais non ruptures:**



***Batteries, piles à combustible, photopiles***

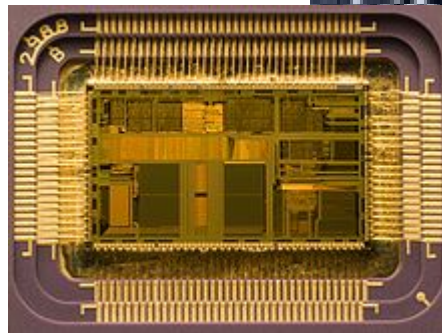


# Les limitations

- Les systèmes énergétiques ne se situent pas à l'échelle des nanotechnologies
- Les progrès, notamment économiques, sont relativement lents
- Le stockage d'énergie demeure un verrou majeur



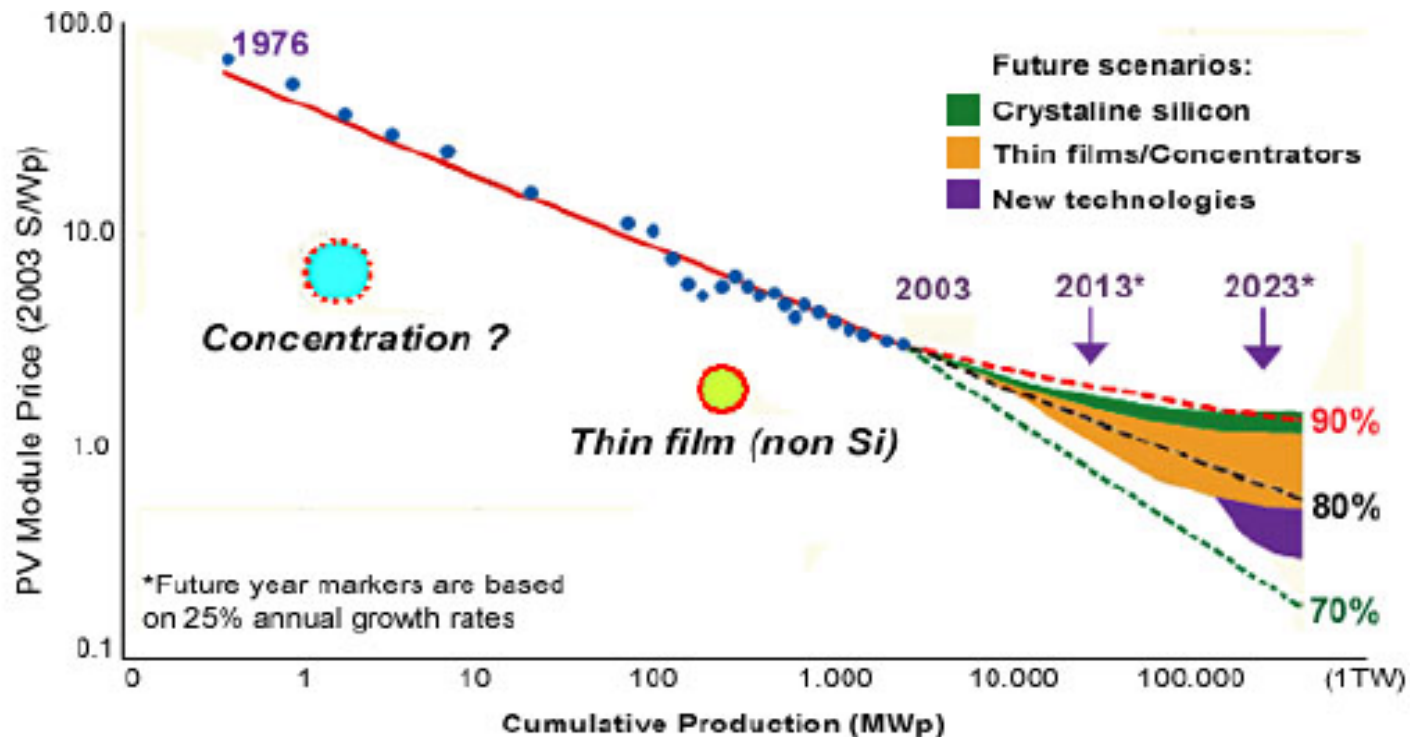
# *Les systèmes énergétiques ne se situent pas à l'échelle des nanotechnologies*



**Puce d'un microprocesseur dans son boîtier  
(taille réelle : 12 × 6,75 mm)**

**Panneaux photovoltaïques  
Echelle X 1000 à 10 000  
Surface X 10<sup>6</sup> à 10<sup>8</sup>**

# Solaire photovoltaïque: l'évolution ne suit pas la loi de Moore



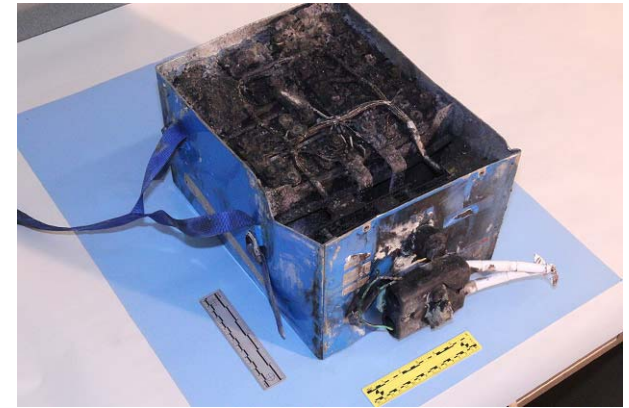
## De réelles possibilités de baisse des coûts

- Le solaire photovoltaïque est une technologie encore émergente, dont les coûts actuels (près de 500 €/MWh en France) devraient baisser jusqu'aux environs de 100 €/MWh en 2020-2030, avec les technologies en développement (silicium cristallin, couches minces).
- Les nouvelles technologies (génération 3) pourraient prolonger cette baisse... et permettre d'atteindre à terme des niveaux proches de 50 €/MWh ? Ces coûts n'incluent pas l'éventuel stockage, ni l'insertion dans le système électrique.
- Les pays plus ensoleillés que la France bénéficient de coûts encore plus bas

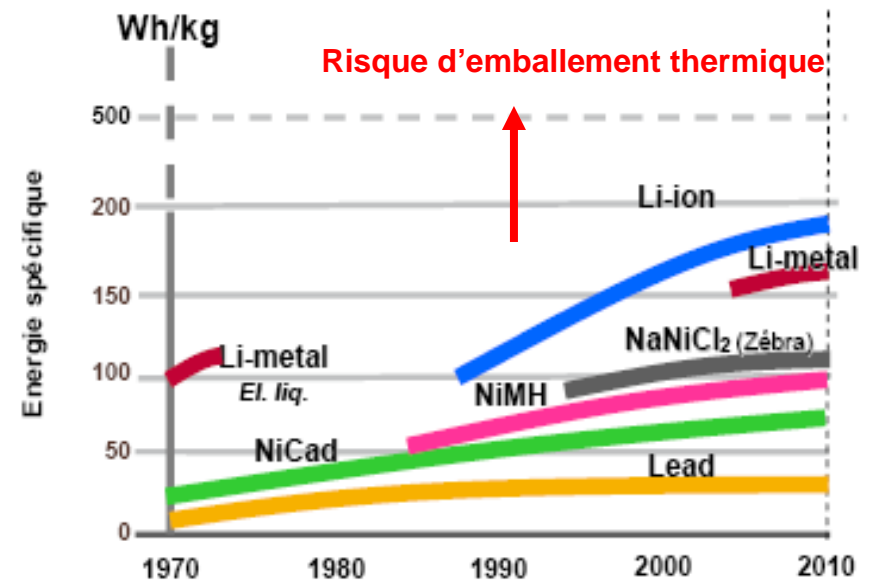
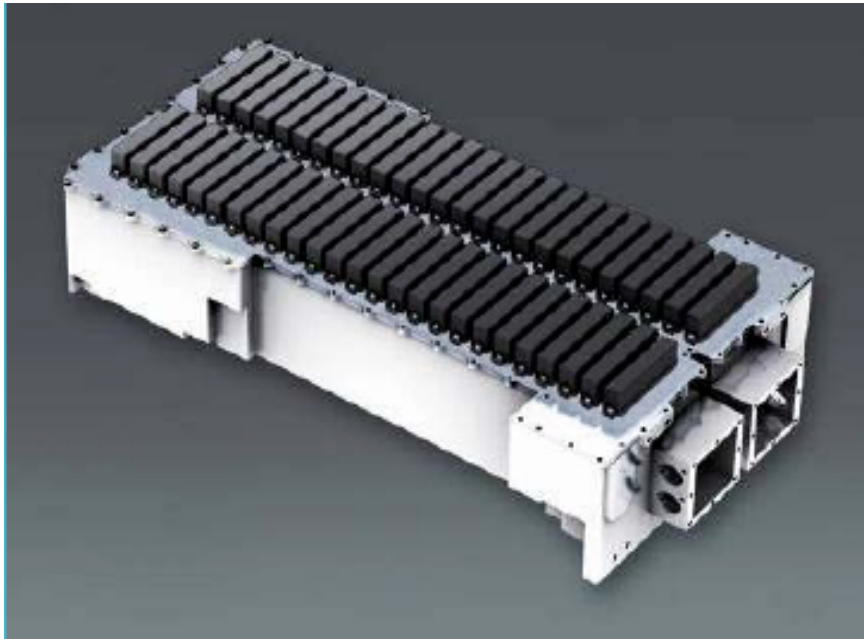




# Les progrès des batteries restent limités



Batterie lithium ion Boeing 787 « Dreamliner »





## ***Conclusion:***

- **Les nanotechnologies ouvrent des perspectives considérables dans le domaine de l'énergie.**
- **Les progrès effectifs restent cependant relativement lents**
- **Des limitations physiques doivent être prises en compte**
- **Il serait illusoire d'imaginer un « changement de paradigme » à court terme**