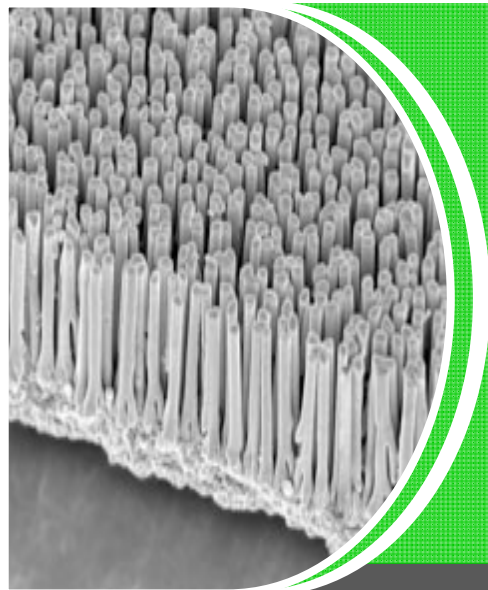




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire **Développement durable**
Environnement, Énergie et Société

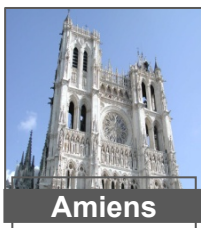
Chaire annuelle – Année académique 2010-2011



Stockage et conversion de l'énergie: synthèse et perspectives

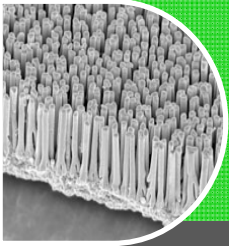
23 Mars 2011

Prof. Jean-Marie Tarascon



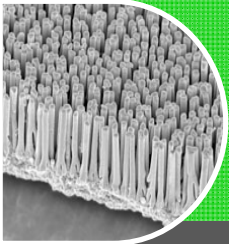
Amiens



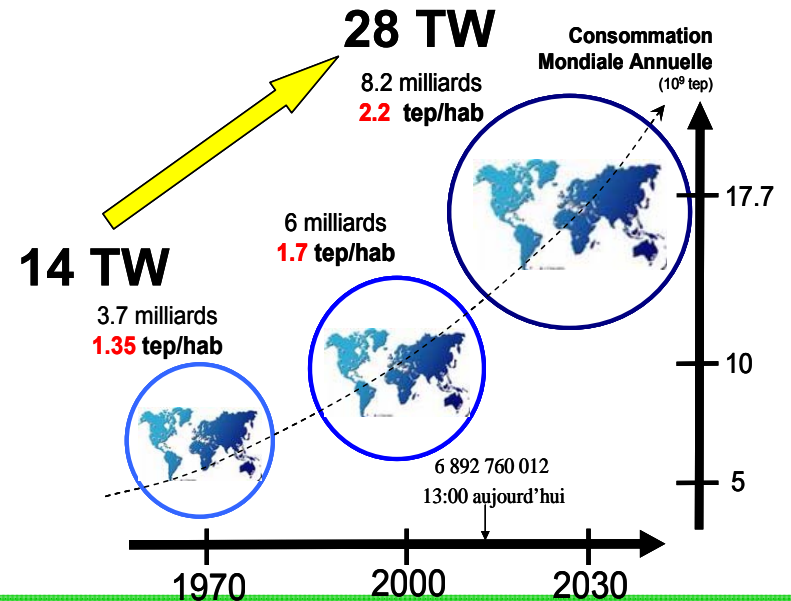
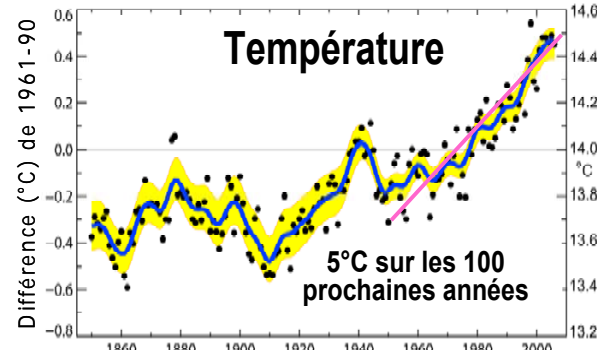
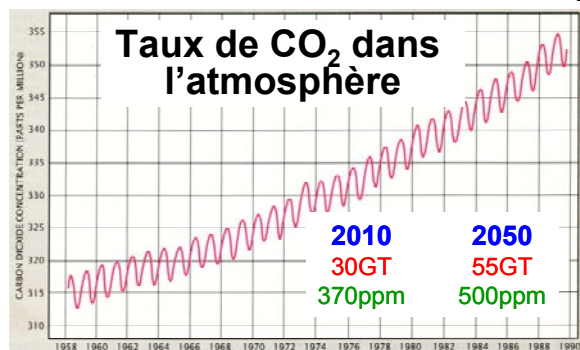
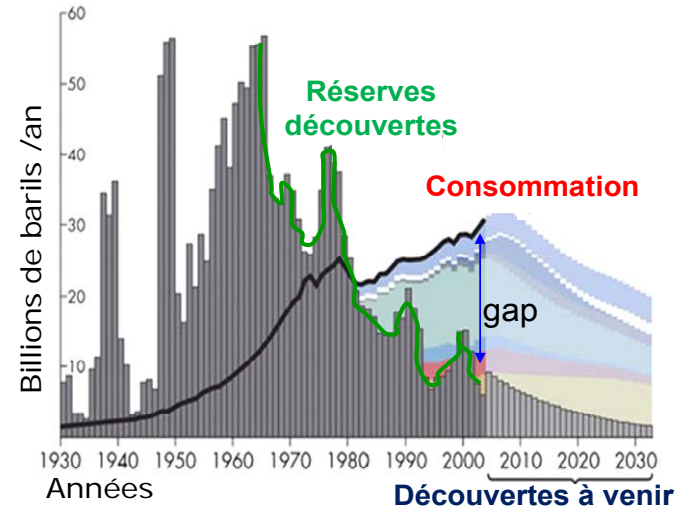
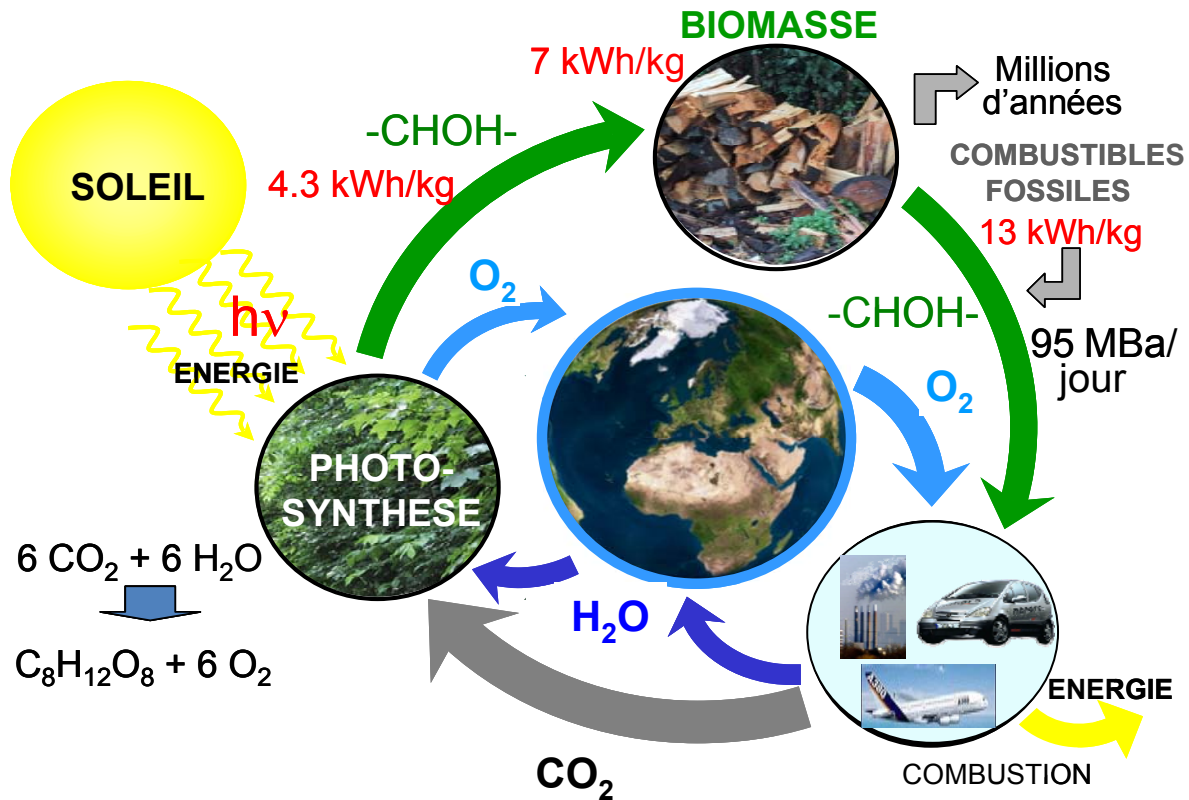


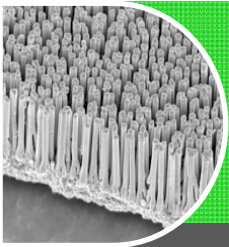
Plan de l'exposé

- Bref rappel des enjeux énergétiques
- Problèmes intrinsèques à la chaîne énergétique
- Approches et tendances scientifiques poursuivies ?
- Chances de répondre à notre challenge de 2050 ...
- Conclusions

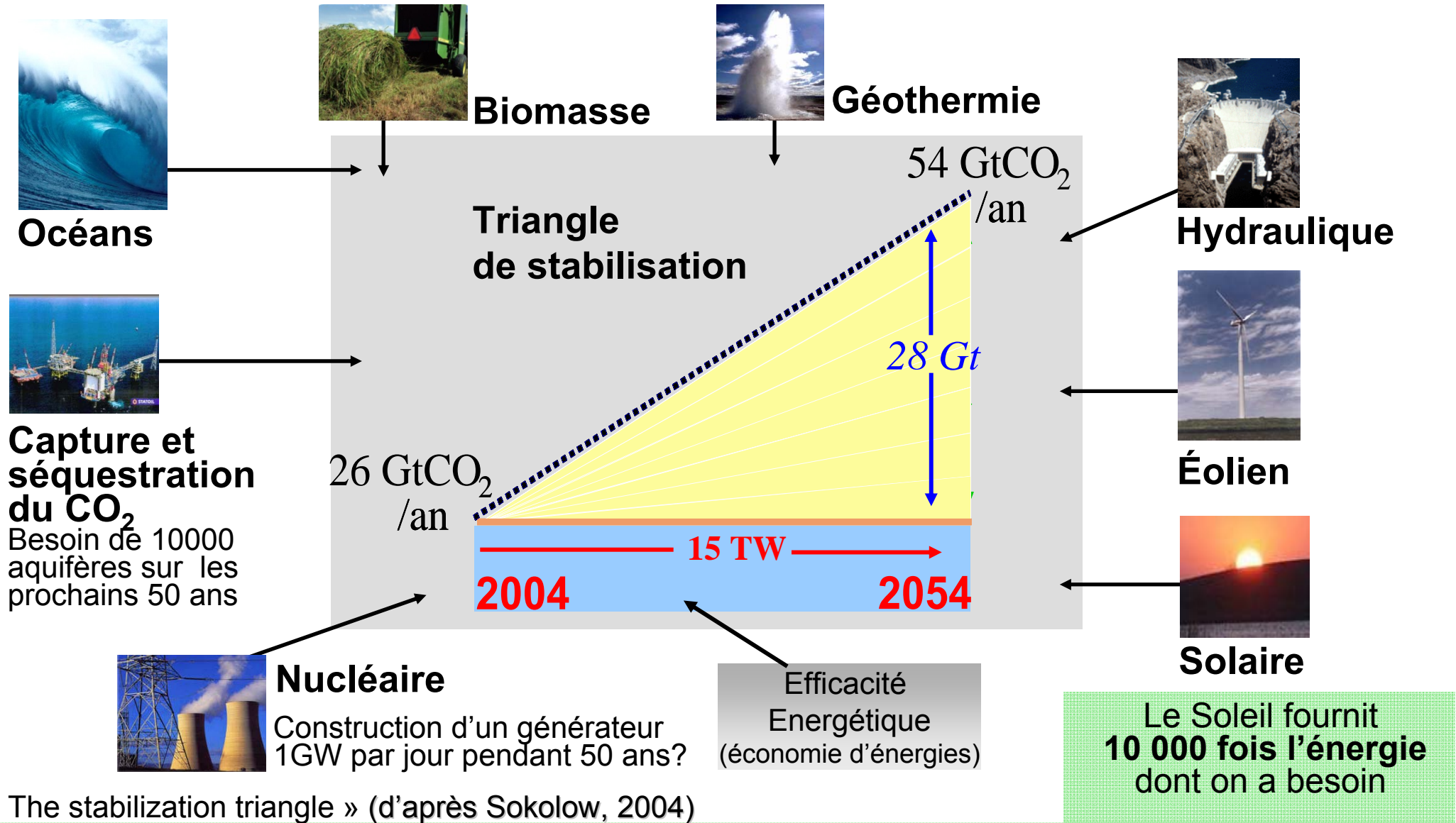


ENERGIE SUR LA PLANETE: D'où on vient où on va?

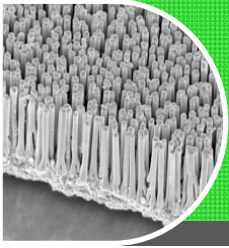




Différentes stratégies pour fournir 14 TW d'énergie décarbonée pour 2050

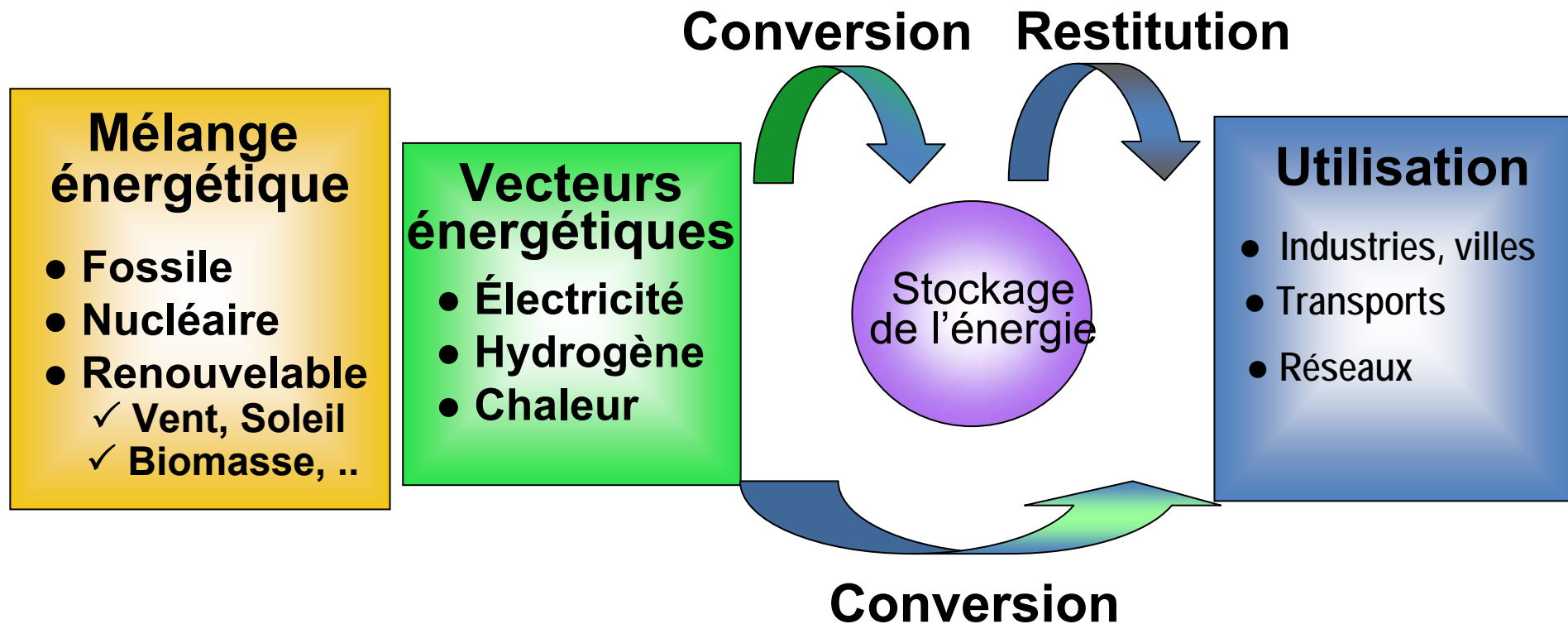


« The stabilization triangle » (d'après Sokolow, 2004)

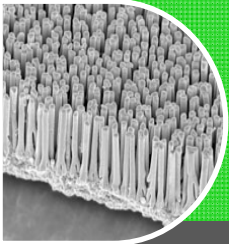


L'énergie: De sa production à son utilisation

➤ Procédé complexe

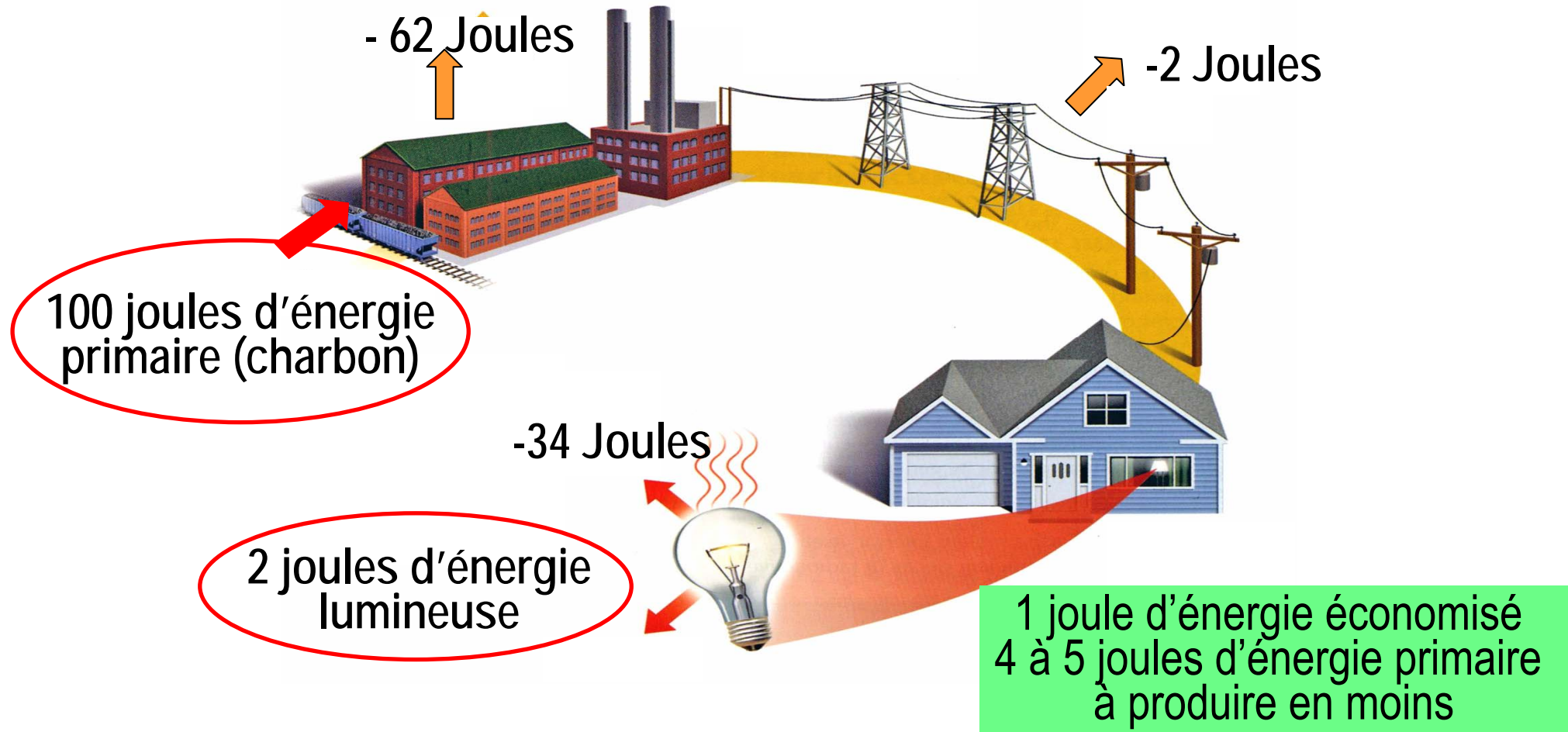


➤ Inefficacité énergétique de la chaîne P-D-U

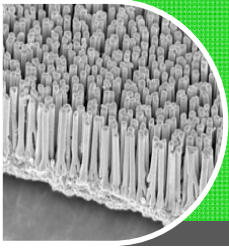


Problèmes associées à la conversion: transport d'énergie

➤ Efficacité énergétique d'une ampoule incandescente (~ 2%)



Conversion + Distribution d'énergie = Pertes



L'efficacité énergétique: plusieurs scénarios

➤ Quand est-il de l'efficacité de la chaîne énergétique ...

Énergies renouvelables



Vent



Soleil



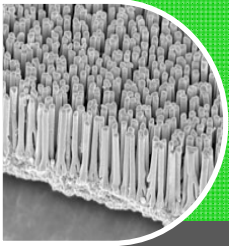
Marées



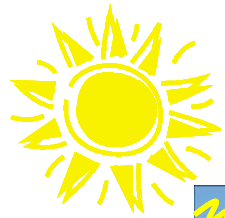
Biomasse

Véhicules électriques





Efficacité de la chaîne Solaire => Hydrogène => Véhicule électrique

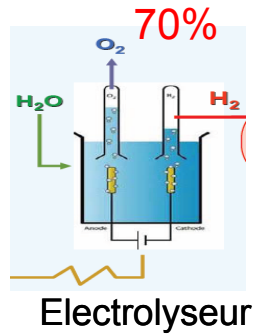
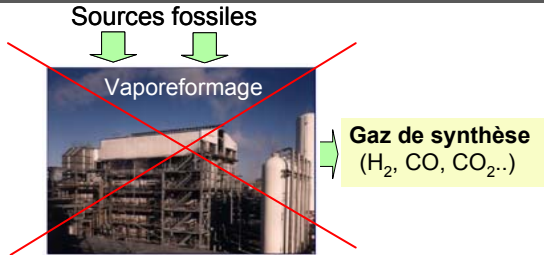


15%

Photovoltaïque

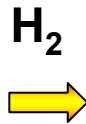
Conversion
Soleil
↓
Électricité

Photovoltaïque
15%



70%

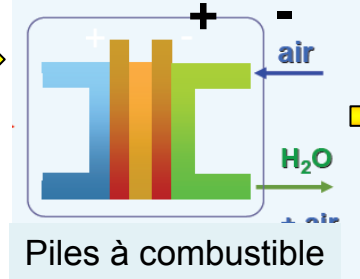
Electrolyseur



60%

Stockage
de H₂

50%



Piles à combustible

90%

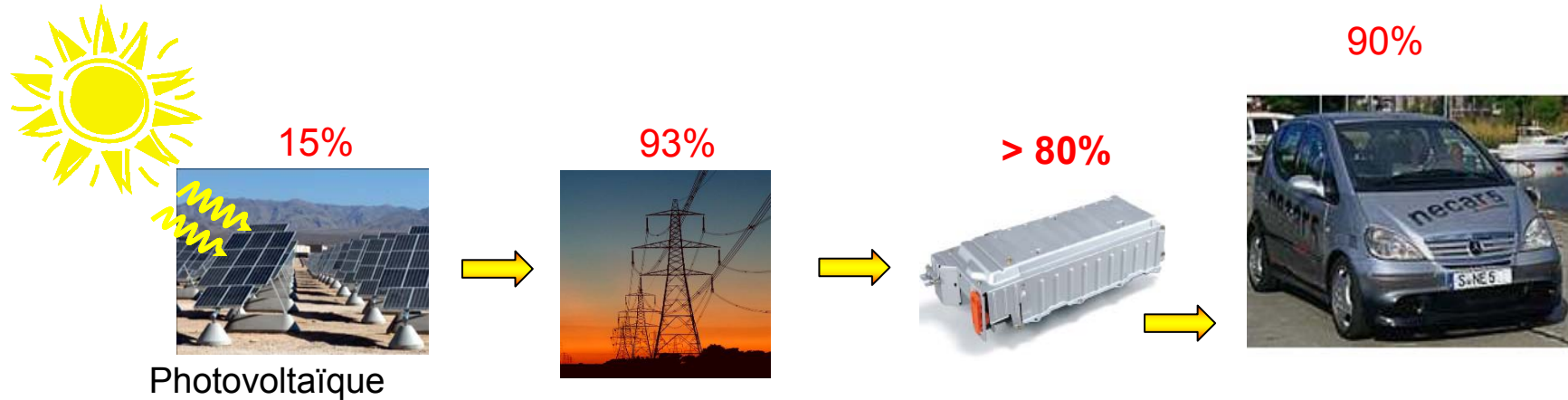


Rendement global 2.8%

Électrolyse de l'eau 70%	Compression H ₂ et distribution 60%	Pile à combustible 50%	Motorisation électrique 90%	$0.15 \times 0.70 \times 0.60$ $\times 0.50 \times 0.90$ $= 0.028$
--------------------------------	--	------------------------------	-----------------------------------	--

Coûts principaux : les maillons photovoltaïque et pile à combustible ..

Efficacité de la chaîne Solaire => Batterie => Véhicule électrique



Conversion
Soleil
↓
Électricité

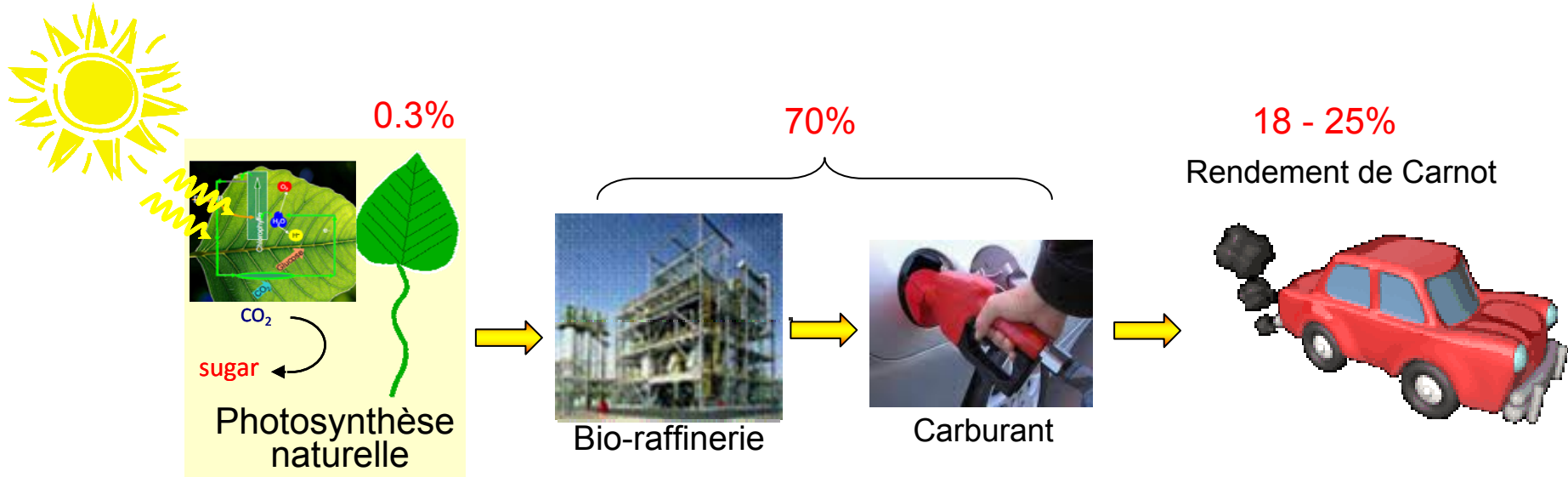
Photovoltaïque
15%

Rendement global : > 10%

Distribution Haute Tension => Maison 93%	Rendement charge/décharge Batterie > 80%	Motorisation électrique 90%	au total 0.15×0.93 $\times 0.80 \times 0.90$ $= 0.10$
---	---	-----------------------------------	---

Coûts principaux : le photovoltaïque et la batterie à un moindre degré

Efficacité de la chaîne Solaire => Agro-bio => Véhicule thermique



Rendement global : 0.04 à 0.05 %

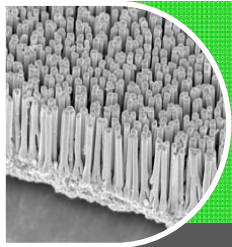
Efficacité de la
photosynthèse
(Biomasse)
0.3%

de la Biomasse
au carburant
à la pompe
70%

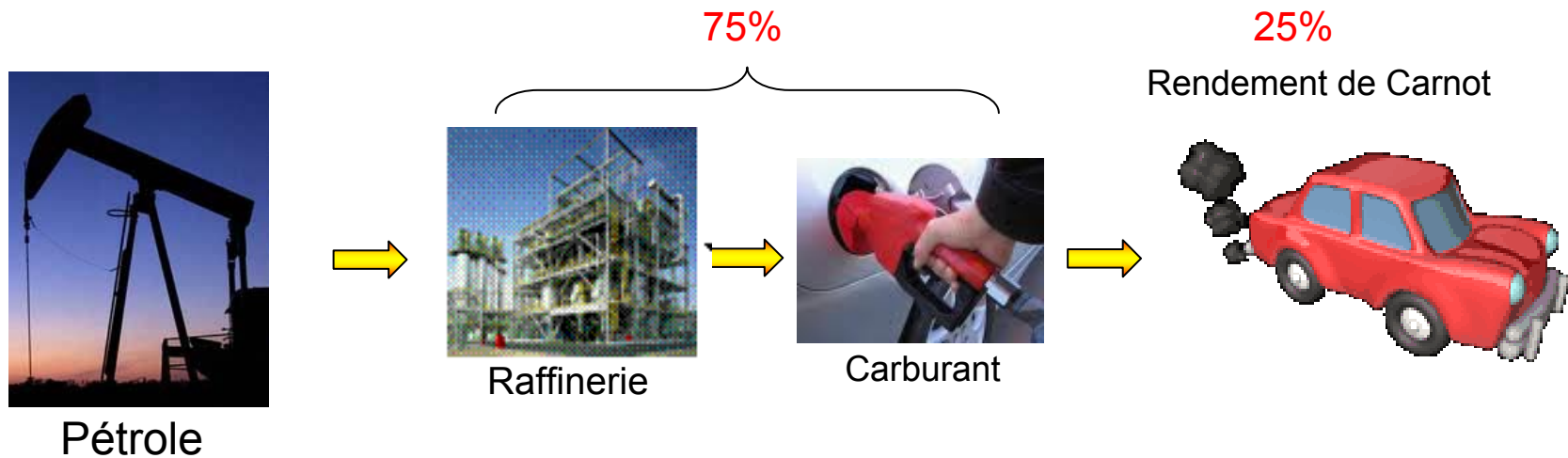
du réservoir
à la roue :
Éthanol : 18%
Biodiesel : 23%

au total :
 $0.003 \times 0.70 \times 0.18 = 0.0004$
 $0.003 \times 0.70 \times 0.23 = 0.0005$

Coût principal : la Bio raffinerie ...



Efficacité de la chaîne Combustible fossiles => Véhicule thermique

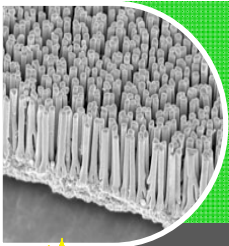


Rendement global : 18.5 %

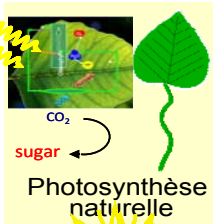
Du pétrole au carburant
à la pompe
75%

Du réservoir
à la roue :
25%

au total :
 $0.75 \times 0.25 = 0.185$



Comparaison de l'efficacité énergétique des différentes options pour l'automobile



Solaire-Agro-bio-VTh



0.05%

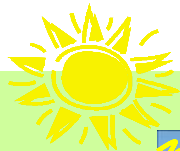


Photovoltaïque

Solaire-Hydrogène-VE

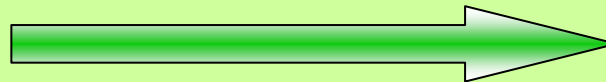


2.8%



Photovoltaïque

Solaire-Batterie-VE



10%

Energies fossiles



Pétrole

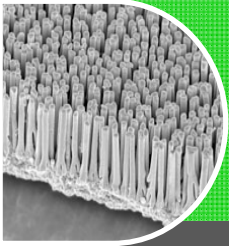
Pétrole-VTh



Encore 50 ans ...



18.5%



Raisons de cette limite d'efficacité

Stockage électrochimique

Batteries

Redox flow

Piles à combustible

Supercondensateurs

Photovoltaïque

PV Inorganique

PV Organique

Cellules à colorant

Stockage de H₂

✓ Comprimé, cryogénique, hydrures métalliques

Nucléaire

Présentes et futures générations de réacteurs

Electrochrome

Dispositifs EC + à émissivité variable

Stockage mécanique

✓ Volants tournants,

Solaire thermique

Stockage CO₂

✓ ≠ Options

➔ Limitations à deux niveaux

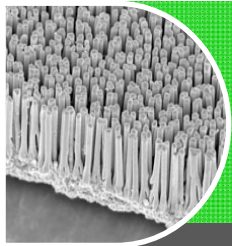
Matériau



Intégration système

Performances constamment limitées par le manque de matériaux adéquats

Certaines défaillances au niveau de la recherche intégrée



14 TW d'énergie propre pour 2050: Innovations significatives au niveau des matériaux nécessaires

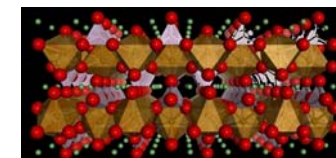
➤ Stockage de l'hydrogène

- Besoin de matériaux capables d'absorber et de désorber plus de H_2 à température et pression adéquates pour le véhicule électrique



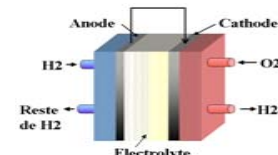
➤ Batteries

- Nécessite des matériaux d'électrodes et d'électrolytes plus performants présentant de plus larges domaines de stabilité chimique et électrochimique



➤ Piles à combustible

- Meilleurs catalyseurs pour remplacer Pt qui est coûteux



➤ Cellules solaires

- Pigments + efficaces pour cellules à colorants ainsi de meilleurs réseaux donneurs-accepteurs interpénétrés pour PV organique

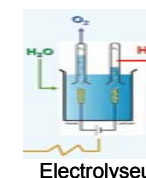


➤ Énergie nucléaire

- Combustibles fossiles plus abondants (dévier de ^{235}U)

➤ Photoélectrolyse

- Semi-conducteurs résistant à la corrosion dans l'eau et un 'band gap' optique adéquat



➤ Photosynthèse (meilleur catalyseur) , thermoélectriques (meilleur ZT)



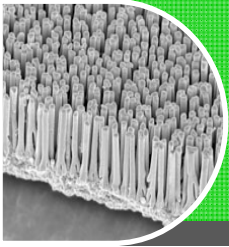
Les matériaux pour l'énergie: Cahier des charges pour le futur

➤ **Matériaux plus performants quelle que soit l'application**

➤ **Matériaux conçus dans le contexte du développement durable**

- Développer de nouvelles méthodes de synthèse éco efficaces
- Choisir des matériaux composés d'éléments chimiques abondants et peu coûteux
- Maîtriser toutes les étapes de la vie du matériau, de son élaboration à sa dégradation
- Prendre en compte l'aspect recyclage

"Matériaux cœur de toute innovation - révolution technologique"



Comment trouver de nouveaux matériaux ?

➤ Recours à la chimie

- Concevoir, dessiner et assembler de nouveaux composés à propriétés exacerbées et adaptées à l'application visée

- ✓ Intuition chimiste
- ✓ Boîte à outils reposant sur des considérations thermodynamiques, structurales, ?

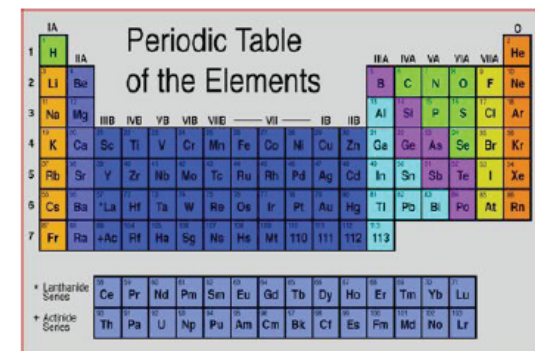


Échelle de temps limité  2050

➤ Apport de la chimie théorique combinatoire

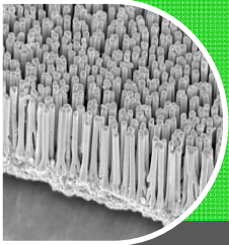
Des milliers de combinaisons possibles pour préparer de nouveaux composés, comment faciliter le choix des gagnants ???

- Faire au niveau des matériaux ce que tente de faire la génomique au niveau de la biologie...



Periodic Table of the Elements

1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg							Al	Si	P	S	Cl	Ar				
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac	Rf	Ha	Sg	Bh	Hs	Mt	110	111	112	113					
* Lanthanide Series																		
+ Actinide Series																		



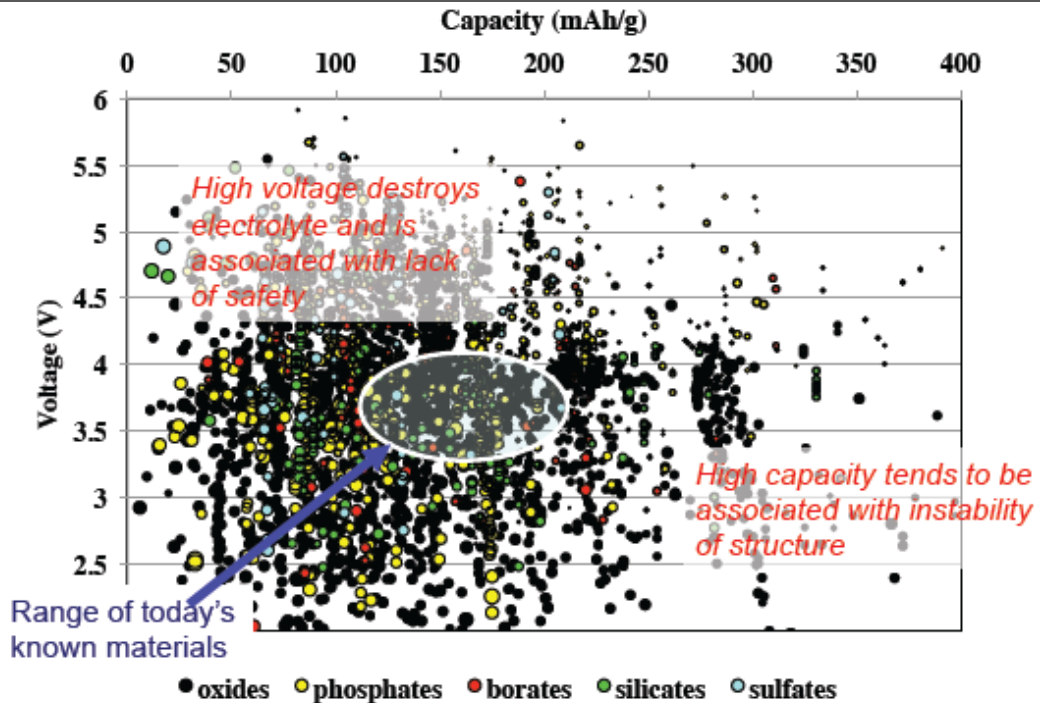
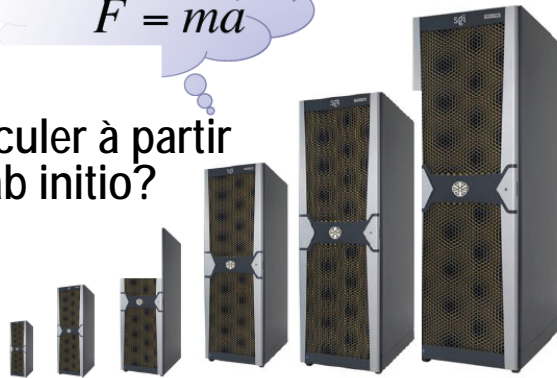
Étude prédictive de nouveaux composés

$$H\Psi = E\Psi$$

$$E = mc^2$$

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

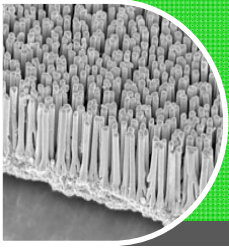
Peut-on tout calculer à partir de calculs ab initio?



- Atteindre le point où les propriétés des composés peuvent être calculées

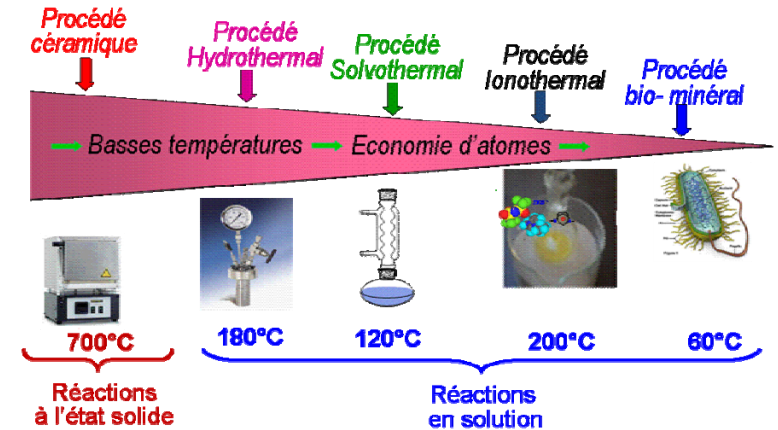
Établir un "génomme des matériaux"

- Compter sur la «main verte» des chimistes pour les synthétiser

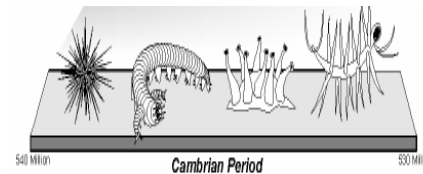


Recherche de Procédés d'élaboration de matériaux éco-efficaces: tendances

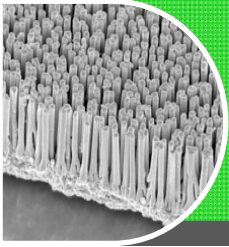
➔ De la chimie haute température à la chimie de solution



➔ Retour à la chimie du vivant

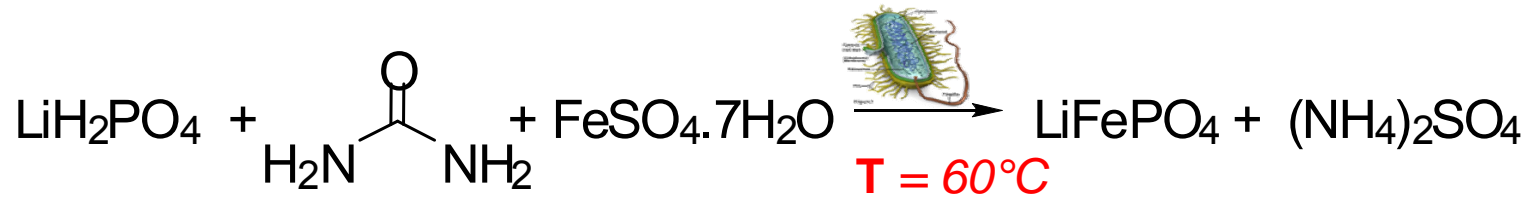


- Développer des approches de synthèses bio-assistées, bio-inspirées ou biomimétiques pour
 - ✓ l'élaboration de nouveaux matériaux
 - ✓ la conception de nouveaux systèmes

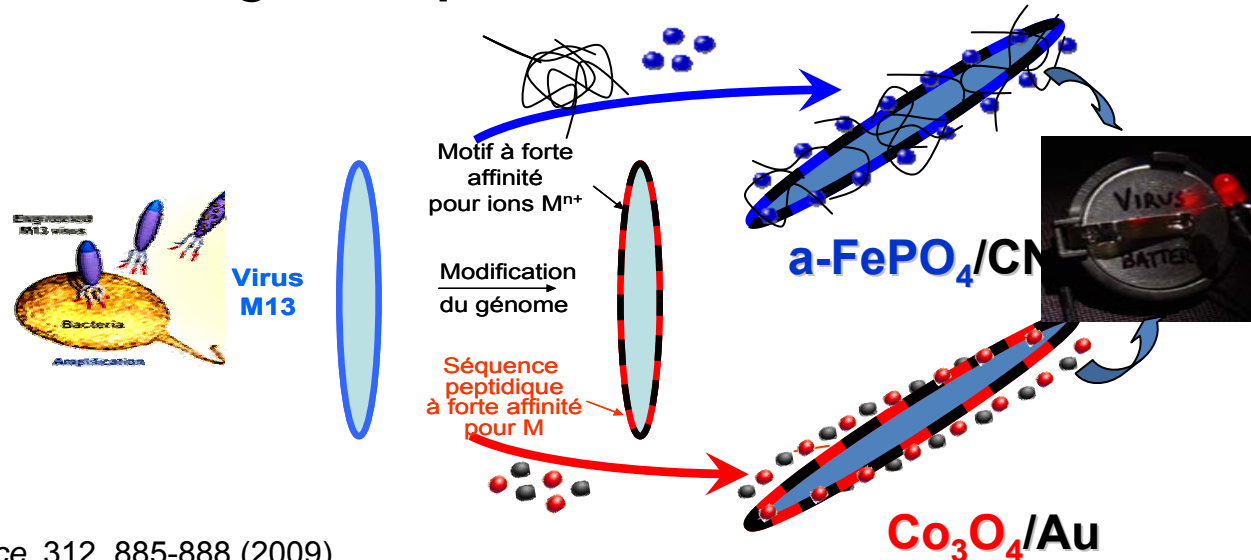


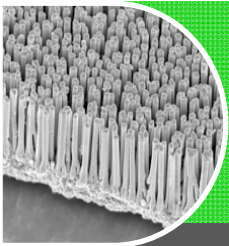
Procédés de synthèse à température ambiante basés sur la bio-minéralisation

➤ Synthèse de LiFePO_4 par bio-minéralisation

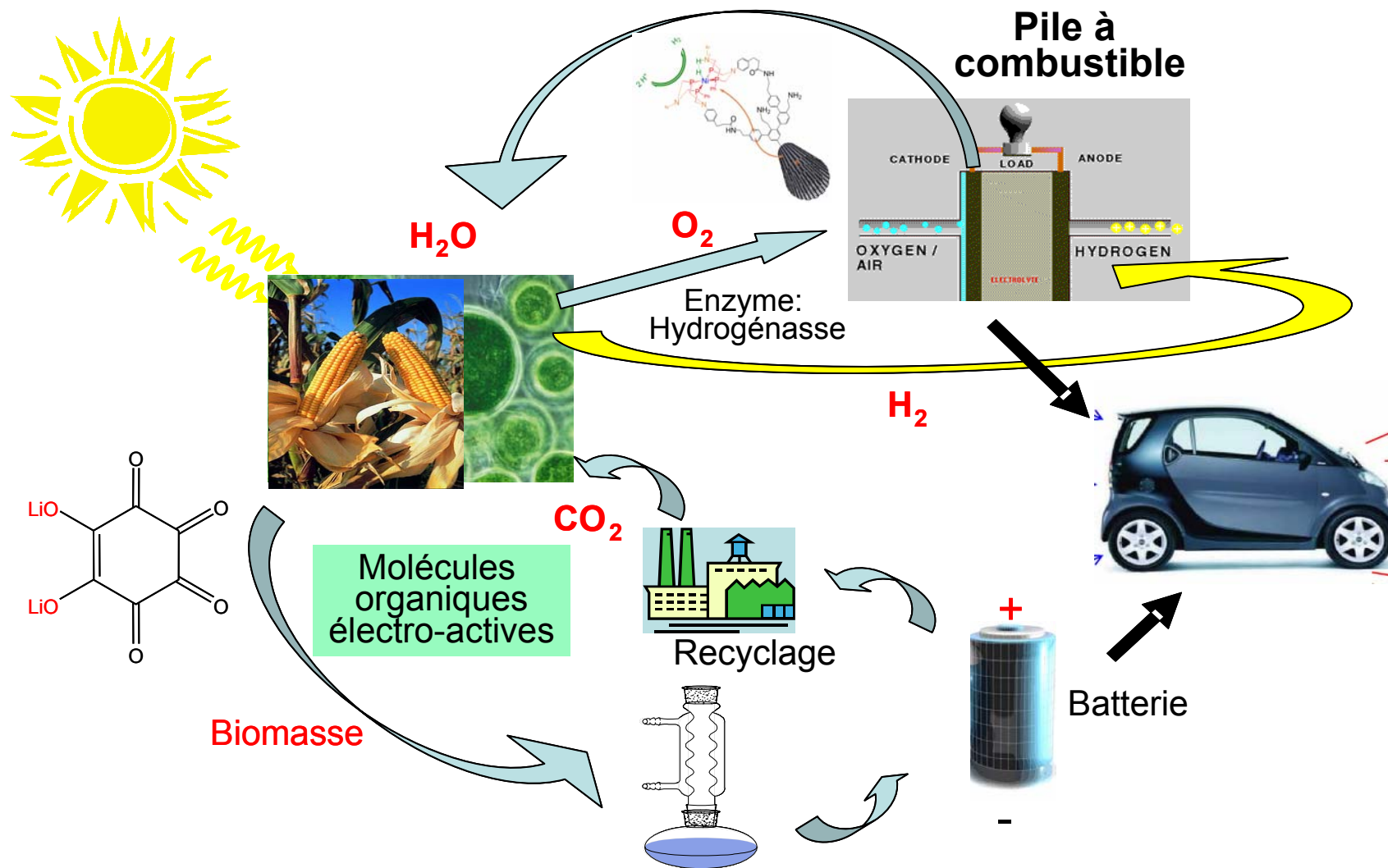


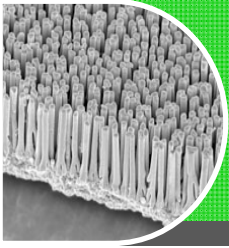
➤ De virus M13KE génétiquement modifiés aux batteries





Cycles de conversion et stockage de l'énergie étudiés dans le cadre du développement durable



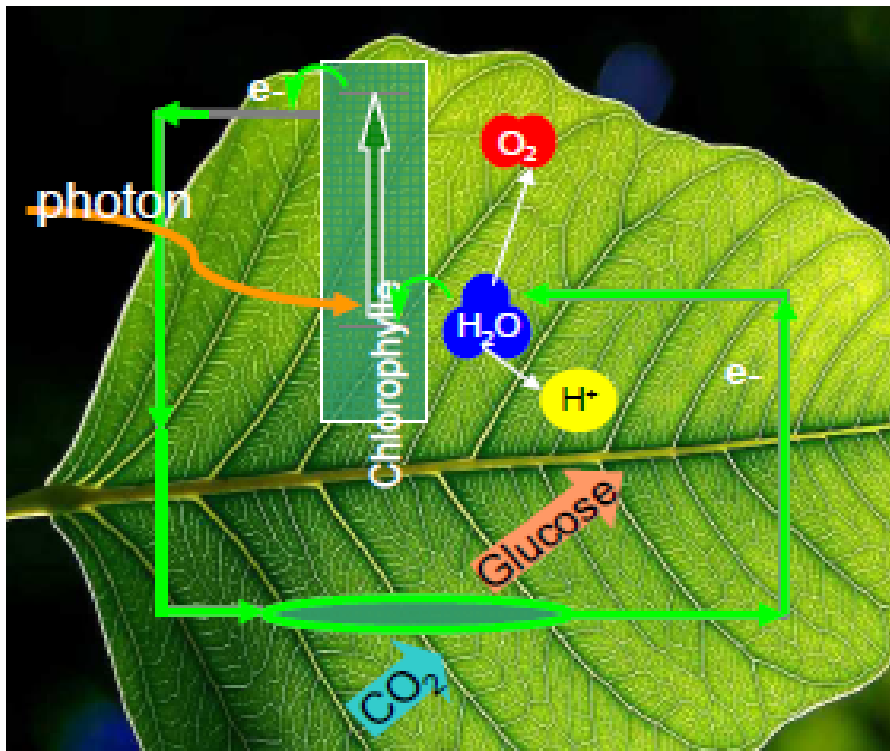


Bio-inspiration: des matériaux au système

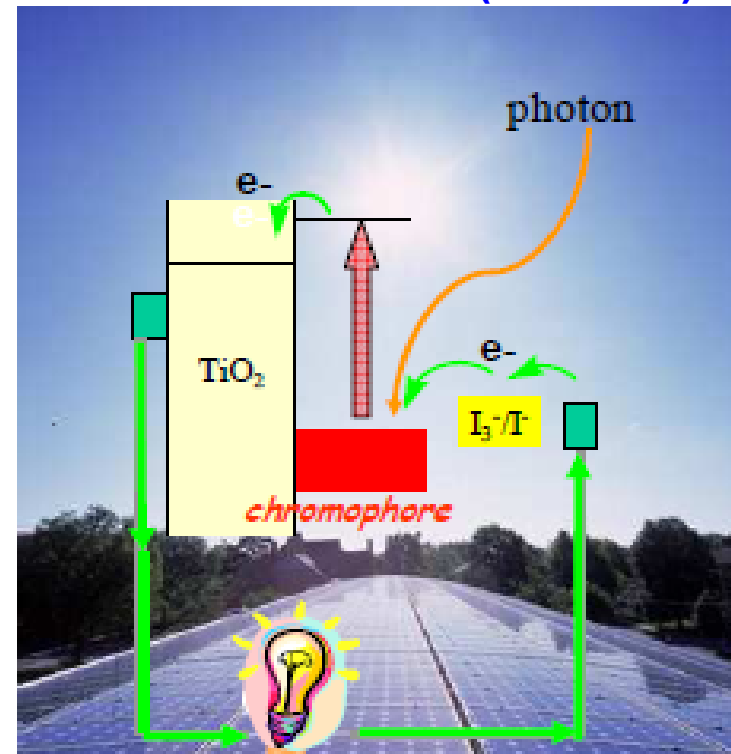
➤ Approche bio-inspirée au niveau du photovoltaïque

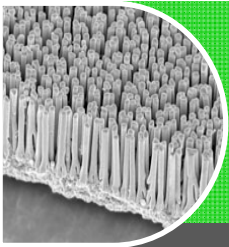
- Énergie lumineuse en énergie chimique

La Nature



Cellules à colorant (Graätzel)

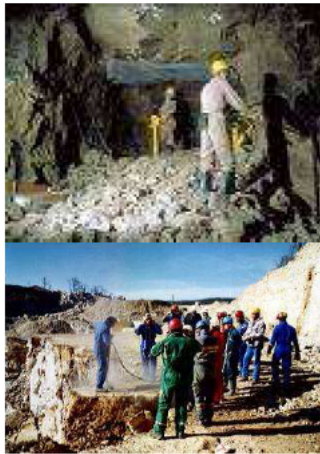




Comment gérer les matériaux stratégiques clés peu abondants (In, ..., ...,)

➤ Développer une chimie de réincarnation des métaux

De l'ancienne mine ...

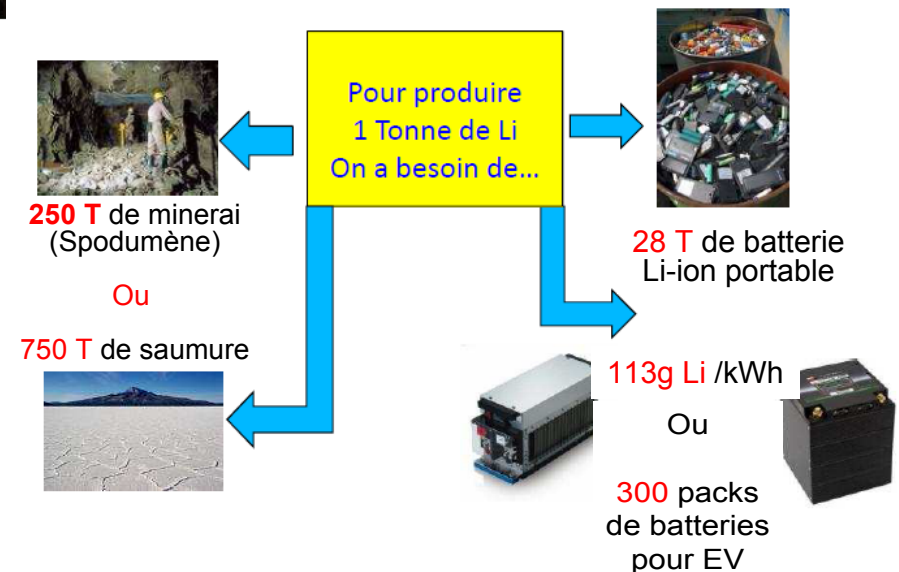


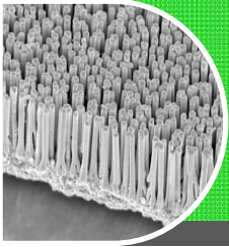
... À la mine "urbaine"



- Exploiter les mines urbaines (Li, In, Terres rares , Cu)

➤ Avantage sur le minage direct





Le recyclage: élément clé dans notre futur paysage énergétique...

- **Nucléaire:** Le traitement des déchets est une réalité car risque "associé"
- **Que ferons-nous des milliards de batteries???**
Des km² de panneaux solaires???

Le Recyclage s'impose

- **Anciens alchimistes**

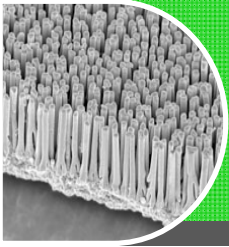
Tentaient de changer le plomb en or

- **Les nouveaux alchimistes**

Tenteront de changer les déchets en or



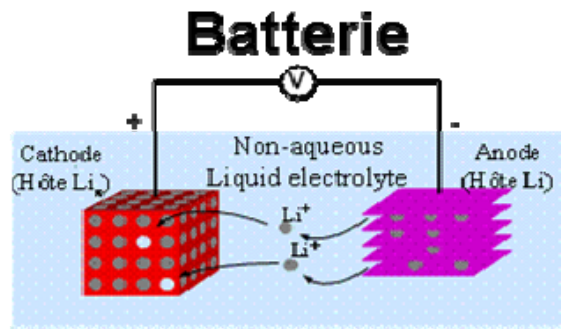
Redonner la vie
aux matériaux



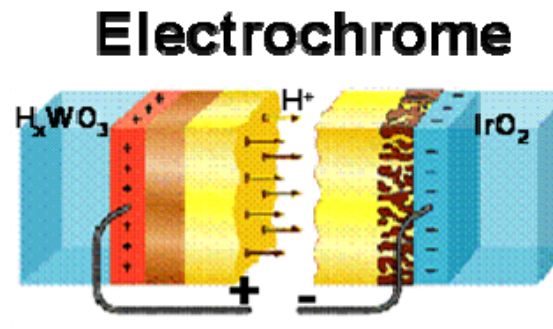
Tendances au niveau des systèmes pour production à grande échelle et à faible coût

➤ Évolution vers des procédés à base de polymères ou de plastiques pour la plupart des technologies

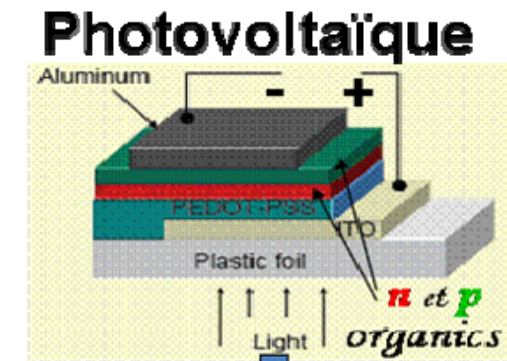
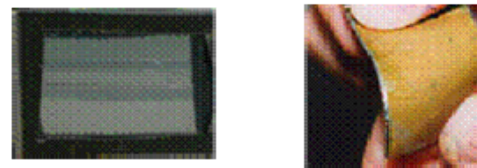
- Manutention plus simple et peu coûteuse en énergie
- Gain de coût au niveau de l'élaboration + recyclabilité plus facile



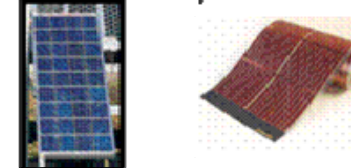
Liquid to Plastic

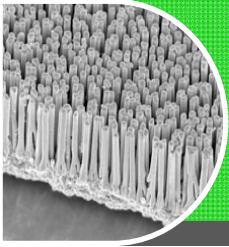


Solid to plastic



Solid to plastic

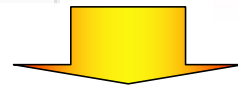
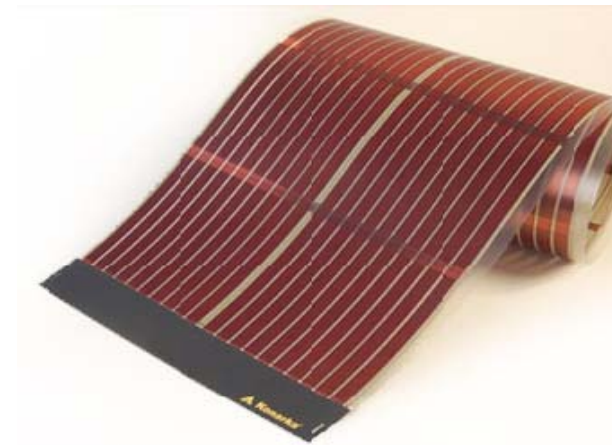
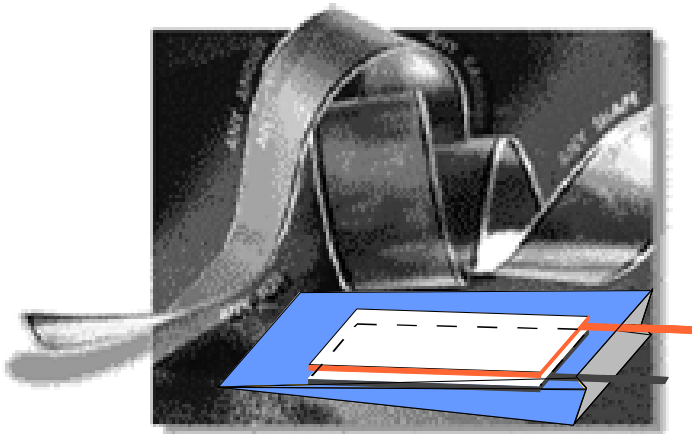




Jouer sur les similarités pour créer des systèmes Intelligents: une opportunité

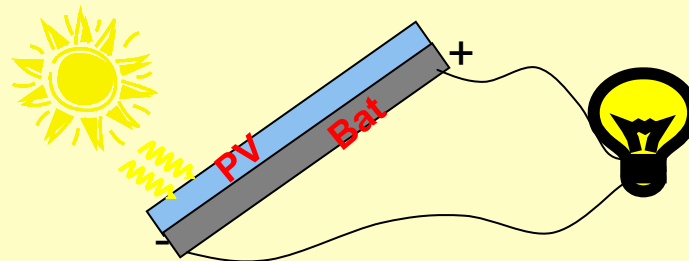
➤ Intégrer plusieurs fonctions dans le même système?

- Batterie plastique à ions Li
- Cellule solaire organique

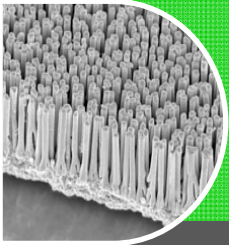


Possibilité de créer un système unique de cellule solaire autonome en associant à la fois les fonctions de la batterie et celles de la cellule solaire ?

Plastic Battery-Integrated Photovoltaic (PIBP) system



- Peu coûteux
- Jours et nuits
- Stockage direct du courant

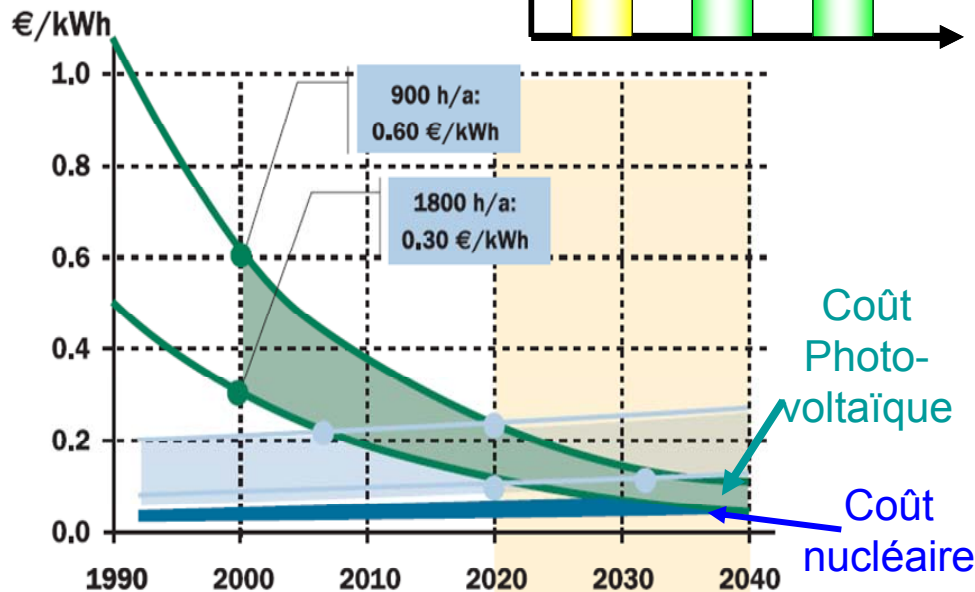
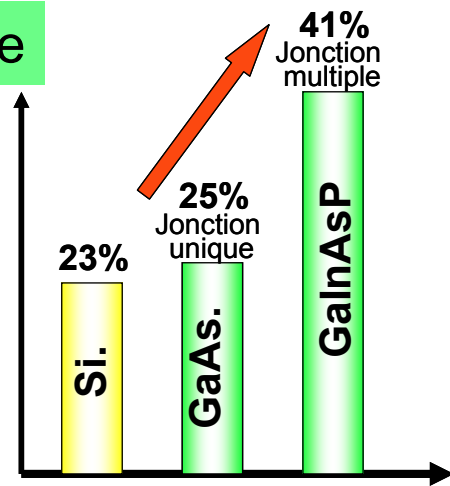


Progrès au niveau du stockage et de la conversion de l'énergie

➤ Conversion de l'énergie:

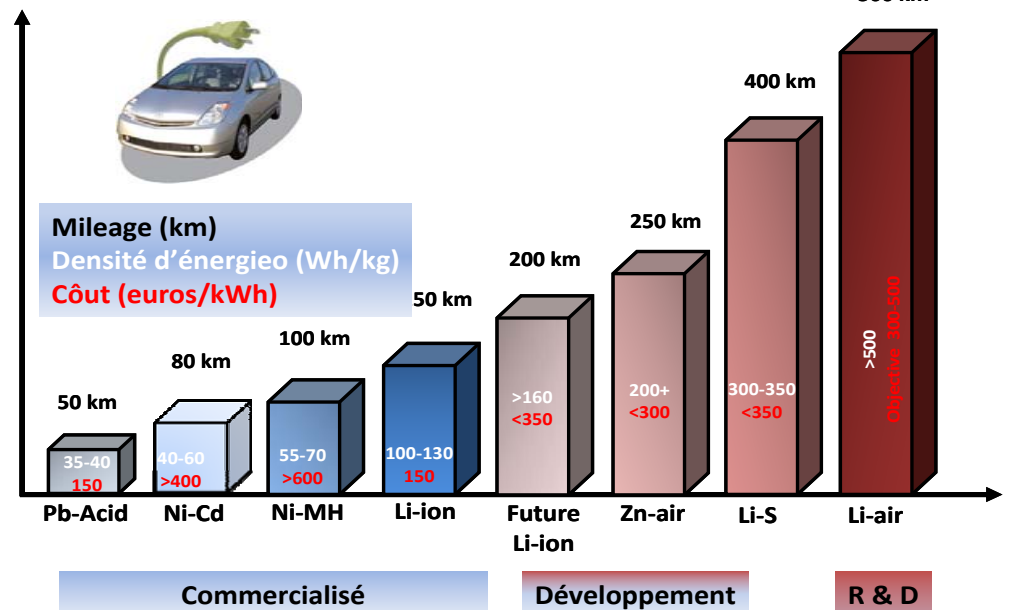
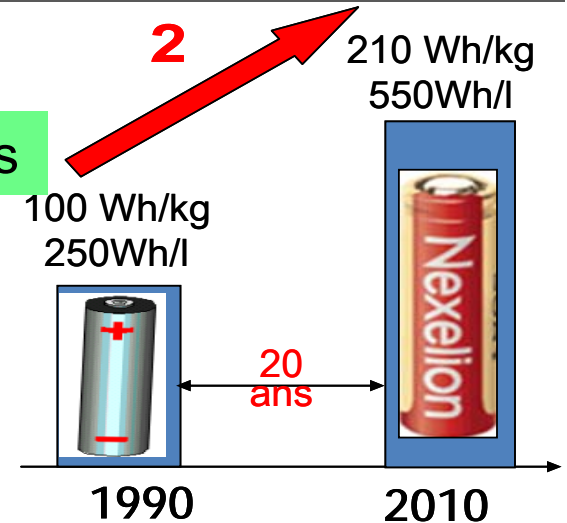
• Le Photovoltaïque

Technologies à bas coûts (DSSC) +

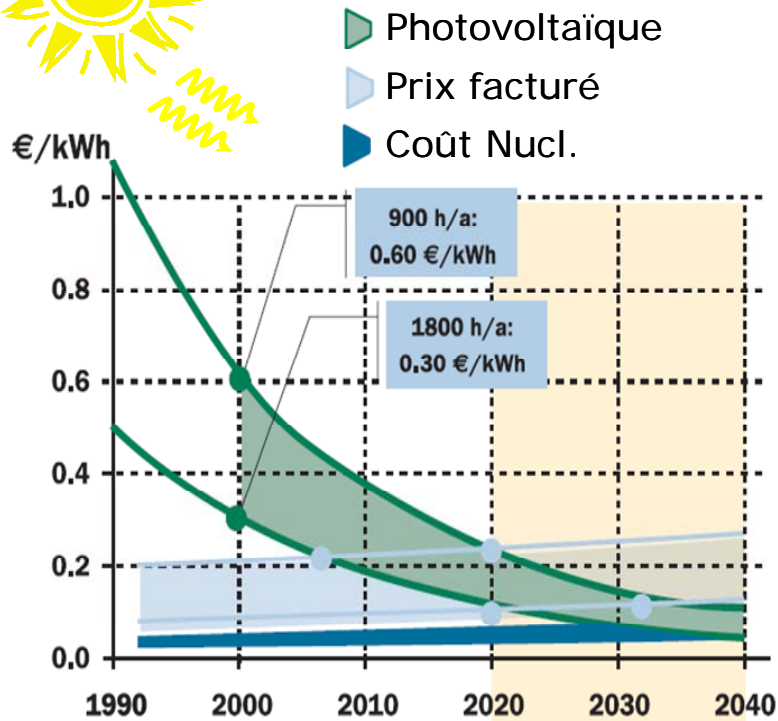
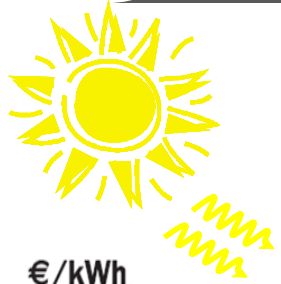
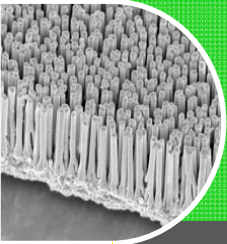


➤ Stockage:

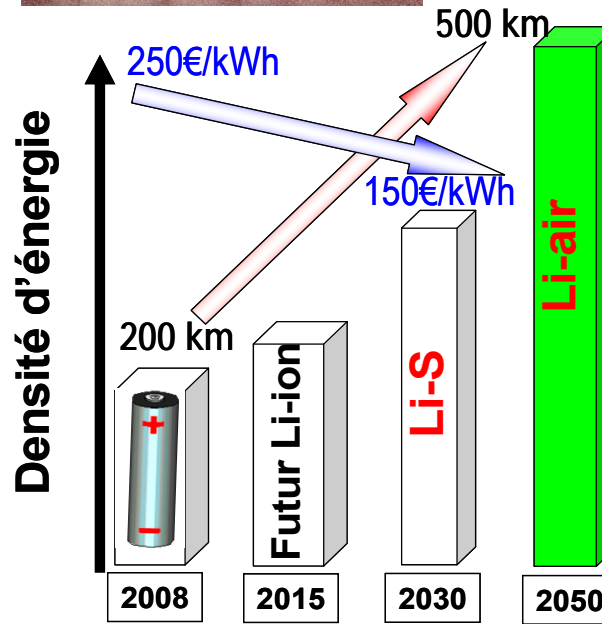
• les accumulateurs



Le trio gagnant pour le futur ???



Photovoltaïque



Batteries

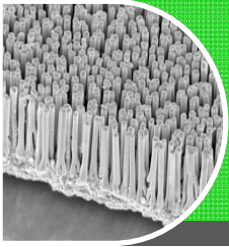
75 kWh pour 500 km
100 m² → 15 kWh



Leaf

Moteur électrique

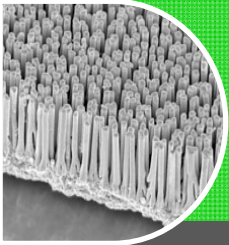
Pourra t-on atteindre nos objectifs ...



Sur les bases de l'existant

Chances de répondre à notre challenge
de produire 14 TW supplémentaires
d'énergie propre pour 2050

- Quels sont les verrous ?
- Que faut-il? Quelles sont les chances ?

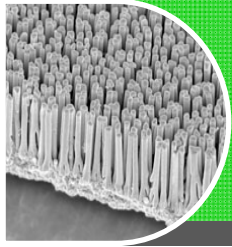


Évidences et constats

- Changer notre infrastructure énergétique afin de permettre la production de 14 TW d'énergie propre en 2050 nécessitera
 - un investissement financier et scientifique conséquent
 - une politique courageuse et volontariste de nos institutions

➤ Quels sont les risques

- De ne rien faire dans les 50 ans ?
 - ✓ Le monde ne sera plus le même et on changera la vie sur notre planète pour les 3000 années à venir
- De s'engager dans la lutte pour des énergies propres
 - ✓ Risque d'échouer n'est pas envisageable
 - ✓ Question: Pourra t-on le faire dans le temps qui nous est imparti ?



Science et technologie: Quels sont les verrous ?

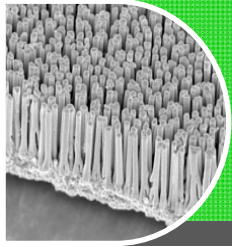
➤ Optimisme doit régner:

- Les principes de conversion (photovoltaïques, photosynthèses) sont connus
- Principes de stockage (électrochimie, thermique et autres connus)...

Problème: Convertir et stoker l'énergie à grande échelle et de façon rentable

➤ Certitude: La solution unique n'existe pas

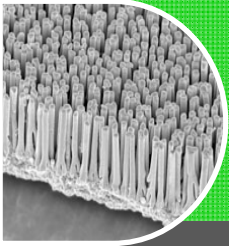
- Nécessité d'explorer toutes les options utiles que nous jugeons capables de fonctionner à grande échelle
- La solution regroupera une somme de technologies (mélange de solutions)



Science et technologie: Quels sont les verrous ? (2)

➤ Les scientifiques ont une responsabilité

- Assurer des analyses crédibles des différentes options énergétiques (empreinte environnementale, analyse du cycle énergétique, coût)
- Promouvoir des approches transdisciplinaires englobant la compétence de nombreux domaines scientifiques, et de la qualité de ces interactions en dépendront les chances de succès..
- Trouver un bon équilibre entre recherche de nouveaux matériaux et leur intégration système à grande échelle.
- Mobiliser et fédérer tous les acteurs de la société concernés
- Rôle de messenger vis-à-vis de nos institutions



Le paradoxe énergétique

➤ **Énergie concerne notre planète d'où la nécessité d'une approche mondiale, fédératrice et concertée**

➤ **La réalité:** Chaque pays crée son propre programme, définit son propre agenda, ...

➤ **Pourquoi:** Le Watt perçu comme la prochaine unité monétaire

"Économie verte: Opportunité pour chaque pays de réconcilier création d'emplois et compétitivité de façon à redonner du souffle à leur pays"

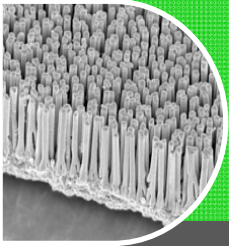
Exemple: Secteur du véhicule électrique:

Marché très lucratif, Compétition fait rage, Travail coopératif pas facile

➤ **Mondialisation des efforts: seulement sur des sujets amonts**

- Fusion nucléaire (programme ITER)

- ✓ Financement gigantesque,



Politiques énergétiques de chaque pays sont disparates

➤ Dénominateur commun

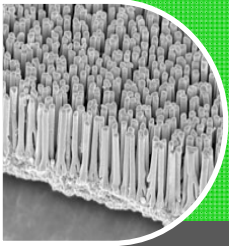
- Prise de conscience de la problématique énergétique
- Restructuration du paysage scientifique et technologique via la création de nouveaux outils fédérateurs.
(cohabiter chercheurs, ingénieurs et industriels)

But:

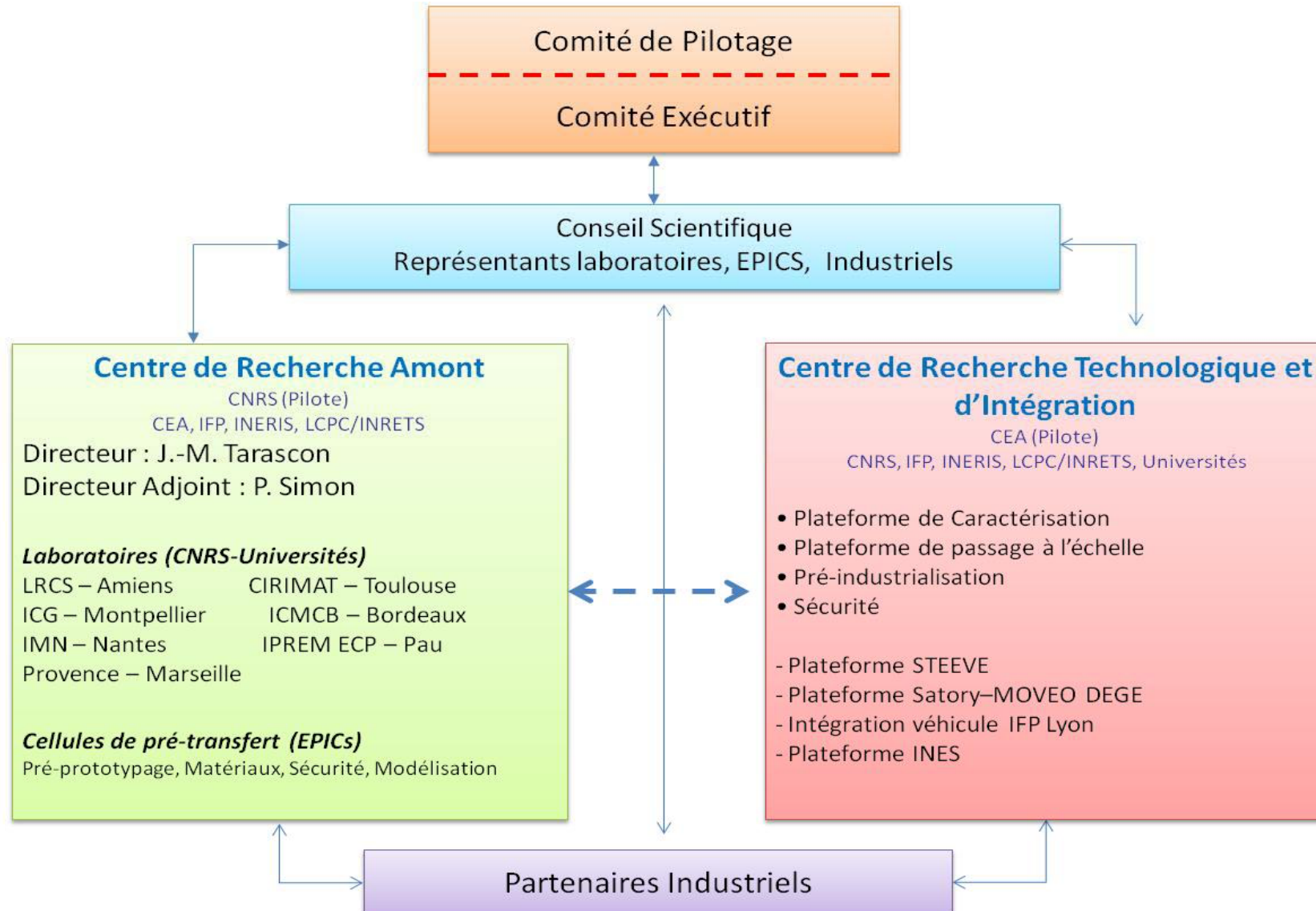
Assurer un transfert rapide et efficace entre science et technologie, le point clé dont dépend tout progrès

➤ France également active

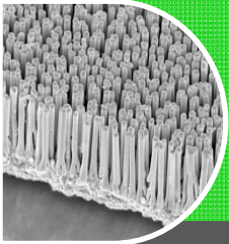
CREATION (2nd Juillet 2010) du RESEAU DE RECHERCHE ET TECHNOLOGIE
SUR LE STOCKAGE ELECTROCHIMIQUE DE L'ENERGIE (RS2E)



Réseau de Recherche et Technologie sur le Stockage Électrochimique de l'Énergie (RS2E)



Véhicule électrique: De l'arlésienne au boom actuel



1884: Thomas Parker



1884

1899: La Jamais Contente



1942: L'oeuf électrique



1960: Ford Comuta



(GM "Volt")



(Peugeot "iON")



(Bolloré "Bluecar")



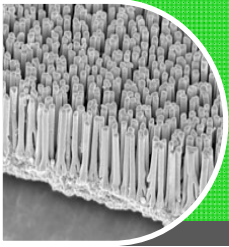
Renault "Fluence"



(Nissan "Leaf")

Multitude de modèles

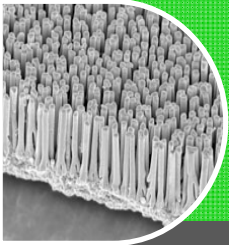
2011



Un dernier appel

Gérer – contrôler - manager l'énergie est le plus grand problème scientifique et technologique que notre planète va avoir à résoudre dans les 50 prochaines années.

Il nous appartient, en tant que scientifiques, d'alerter notre entourage mais surtout les jeunes afin de les intéresser, voire de les enthousiasmer sur ce formidable challenge mais aussi opportunités que la maîtrise de l'énergie représente pour les années à venir.

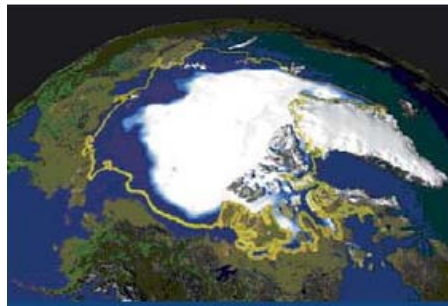


Colloque relié à la chaire développement durable

CHADOC
Chercheurs Associés et Doctorants du Collège de France



**COLLÈGE
DE FRANCE**
— 1530 —



COLLOQUE

organisé par le **Pr Jean-Marie Tarascon**
chaire Développement durable – Environnement, Énergie et Société

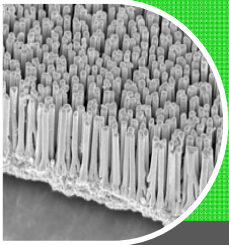
et par le Dr Jennifer Peron, le Dr Olivier Fontaine et
M. Guillaume Muller

Chercheurs Associés et Doctorants du Collège de France

L'énergie : enjeux socio-économiques et défis technologiques

6 et 7 juin 2011

L'énergie est définitivement l'élément vital des sociétés modernes, l'électricité en étant le vecteur avec le watt pouvant devenir notre prochaine unité monétaire. Ne demandons donc pas pourquoi le secteur énergétique devient si médiatisé ! Mais quelle est la réalité derrière ce paysage médiatique ? Ce colloque tentera d'y apporter une réponse en réunissant pour deux jours des conférenciers de nationalités et d'expertises diverses. La structuration de la recherche ainsi que les aspects fondamentaux et appliqués liés à la production, conversion et stockage des énergies renouvelables provenant de la biomasse, du soleil, ainsi qu'à l'utilisation de l'énergie nucléaire ou des énergies fossiles avec capture de CO₂ seront traités et l'aspect recyclage dans son contexte général discuté. L'impact de ces nouvelles filières d'énergies décarbonnées dans le domaine du transport électrique et des applications réseau sera décrit par des experts industriels du domaine. De par son aspect informatif, éducatif et scientifique, ce colloque s'adresse à une audience diversifiée. Les discussions, échanges voire collaborations qui pourront en résulter entre les divers acteurs n'en seront que plus riches. ■



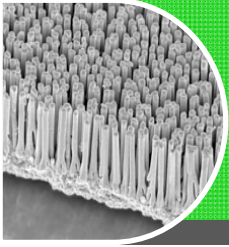
Colloque relié à la chaire développement durable

Lundi 6 juin

- 9h00 Introduction, Jean Marie Tarascon
9h15 Harriet KUNG, Department of Energy, USA
Financements et enjeux de la recherche sur les énergies aux USA
- 10h00 Donald Sadoway, Massachusetts Institute of Technology
Batteries : La voie pour une économie à base d'énergies décarbonées
-
- 10h45 pause
-
- 11h00 Peidong Yang, University of California, Berkeley
Semi-conducteurs nanostructurés pour la production d'énergie solaire
- 11h45 Jean Francois Guillemoles, Institut de Recherche et Développement sur l'Energie Photovoltaïque
Photovoltaïque au XXI^e siècle : réalisation et défis
-
- 12h30 déjeuner
-
- 14h15 Patrice Geoffron, Université Paris Dauphine, Centre de Géopolitique de l'Energie et des Matières Premières
Economie et politique dans le contexte énergétique
- 15h00 Yves Bréchet, Institut Polytechnique de Grenoble
Matériaux pour l'énergie nucléaire : un regard sur le futur
-
- 15h45 pause
-
- 16h00 Daniel Thomas, Université Technologique de Compiègne
Biomasse et bio-raffinerie : que pouvons-nous vraiment en attendre ?
- 16h45 Francois Guyot, Université Paris Diderot
Stockage du CO₂, énergies fossiles et hydrogène : quelles connections ?

Mardi 7 juin

- 9h00 Didier Houssin, Agence internationale de l'énergie
Le rôle des énergies renouvelables dans les perspectives énergétiques à long terme
- 9h45 Marc Fontecave, Collège de France, Laboratoire de Chimie et Biologie des Métaux, Grenoble
Photosynthèse artificielle : des concepts de base aux développements récents
-
- 10h30 pause
-
- 10h45 Florence Lefebvre-Joud, Commissariat à l'Energie Atomique, Grenoble
Technologie pile à combustible : quels seront les gagnants ?
- 11h30 Anna Teyssot, Renault
Véhicules électriques : l'impact des batteries sur leur utilisation
-
- 12h15 déjeuner
-
- 14h00 Dominique Bourg, Université de Lausanne, Institut de politiques territoriales et d'environnement humain
Quelle énergie pour quelle société ?
- 14h45 Farouk Tedjar, Recupyl, Institut Polytechnique de Grenoble
Le monde de la réincarnation des matériaux
-
- 15h30 pause
-
- 15h45 Jacques Saint-Marc, Groupe interministeriel Mobilités
Le développement durable et la ville de demain
- 16h30 Table ronde / Discussion finale :
Quelles réponses face aux défis énergétiques ?
animée par Vincent Dusastre, Nature Publishing group



Merci pour votre attention et merci
à tous ceux qui ont assidûment
suivi ce cours