

# Stockage électrochimique de l'électricité: Hydrogène ou/et Batteries ?

Frédéric LIVET

SIMAP-ENSEEG-Grenoble

CNRS, UMR 5614, Domaine Universitaire, BP 75

38402 St Martin d'Hères Cedex, FRANCE

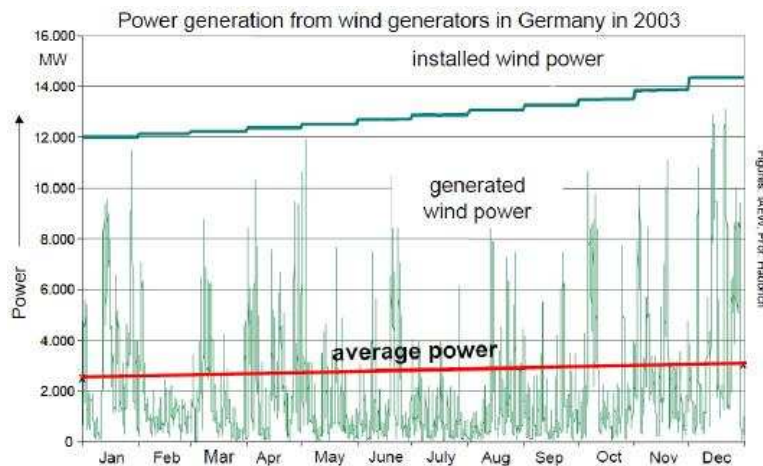


# Les besoins?

L'intermittence des "nouveaux" renouvelables s'étend sur diverses échelles de temps. En dessous de l'heure, on peut espérer les moyenner par le grand nombre d'installations, sauf pour des sites isolés et peu étendus.

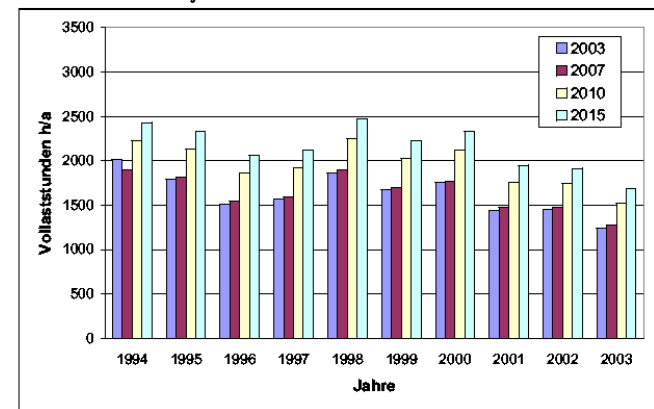
Pour des temps plus longs, on peut espérer des moyens électrochimiques et pour des temps de l'ordre de la demi-journée, les "STEPS".

## L'intermittence de l'éolien "on shore":



Variations sur une année (Germ.)

Abbildung 11-2: Entwicklung der jährlichen Volllaststunden in Abhängigkeit des Windjahres von 2003 bis 2015

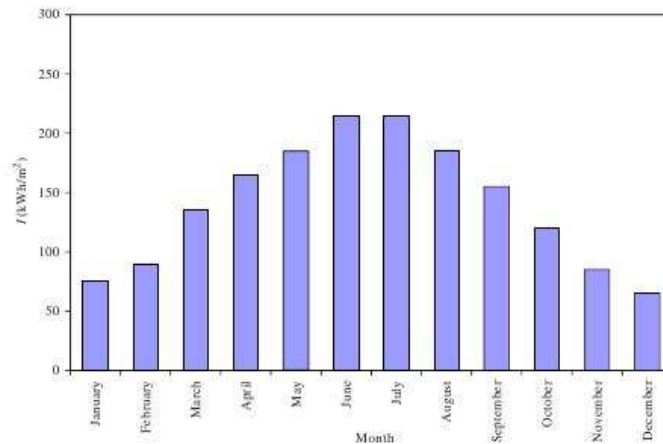
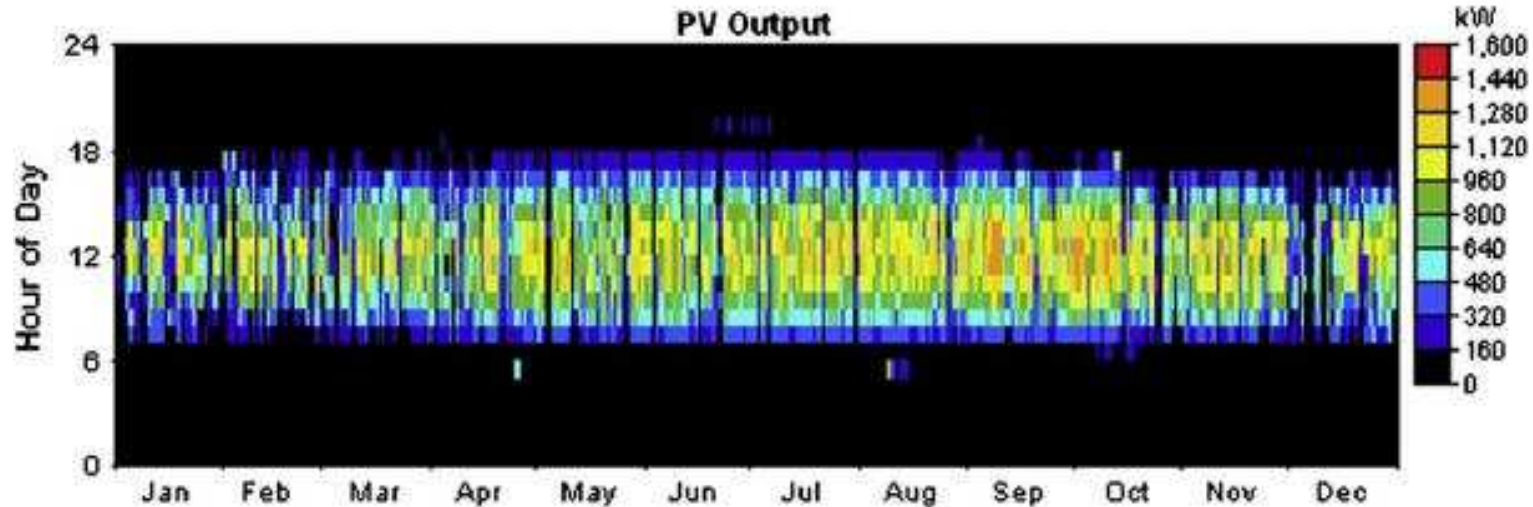


Variations entre années (Germ.)



# Le Photovoltaïque

L'intermittence du photovoltaïque:

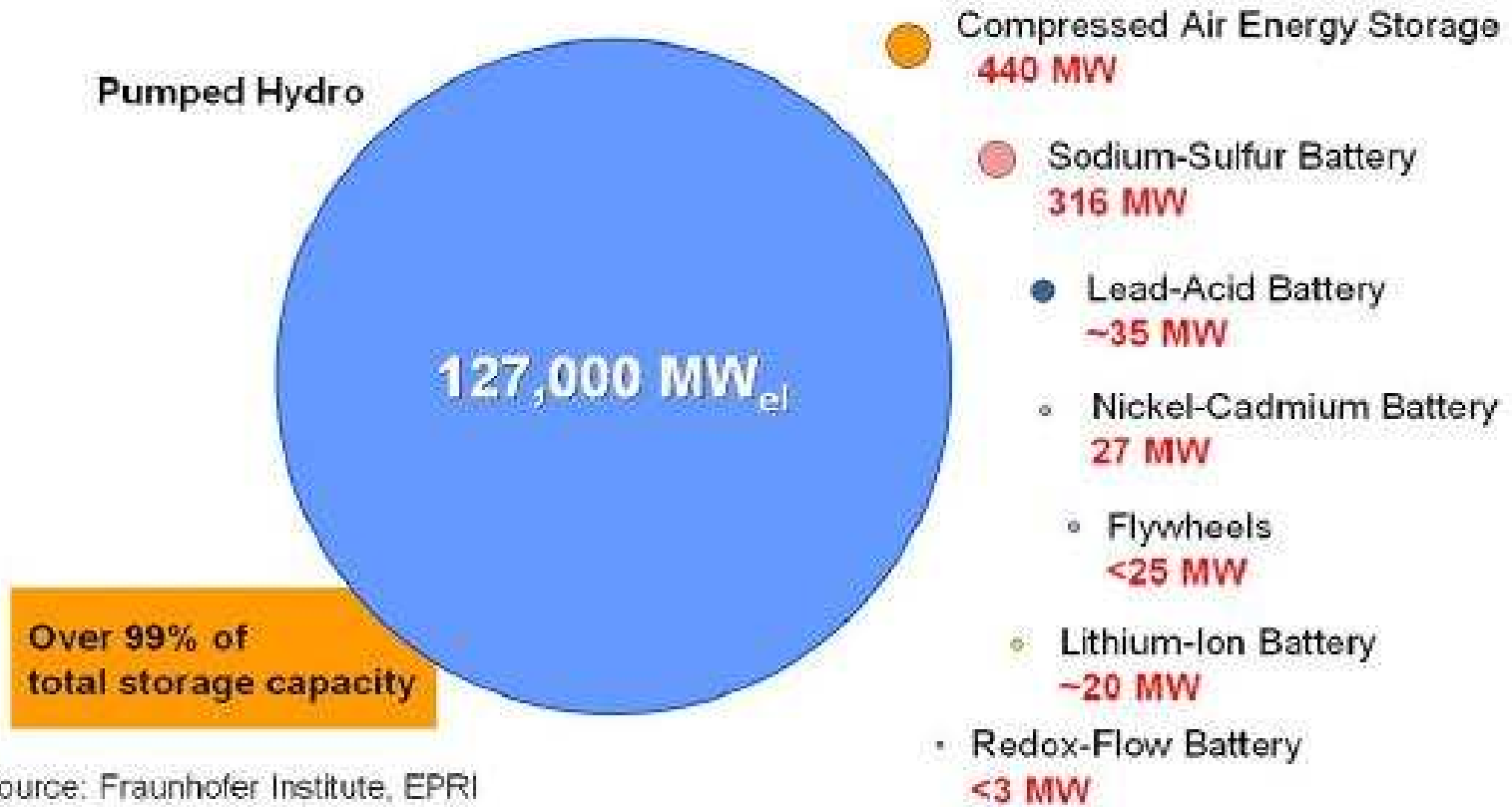


Il y a des nuages, même dans les îles grecques (Karpathos ci-dessus)! L'ensoleillement (Chypre à gauche) varie d'un facteur 5 en région septentrionale et garde un facteur 2-3 au Sud de l'Europe



# Capacités de stockage?

## Worldwide installed storage capacity for electrical energy



Source: Fraunhofer Institute, EPRI

# Plan

1. Le principe des batteries
2. Les diverses batteries
3. un exemple: les  $\text{LiFePO}_4$
4. Stockage par batteries
5. Le cycle hydrogène
6. Stockage hydrogène: des exemples
7. Stockage hybride?
8. Prix et Rendement

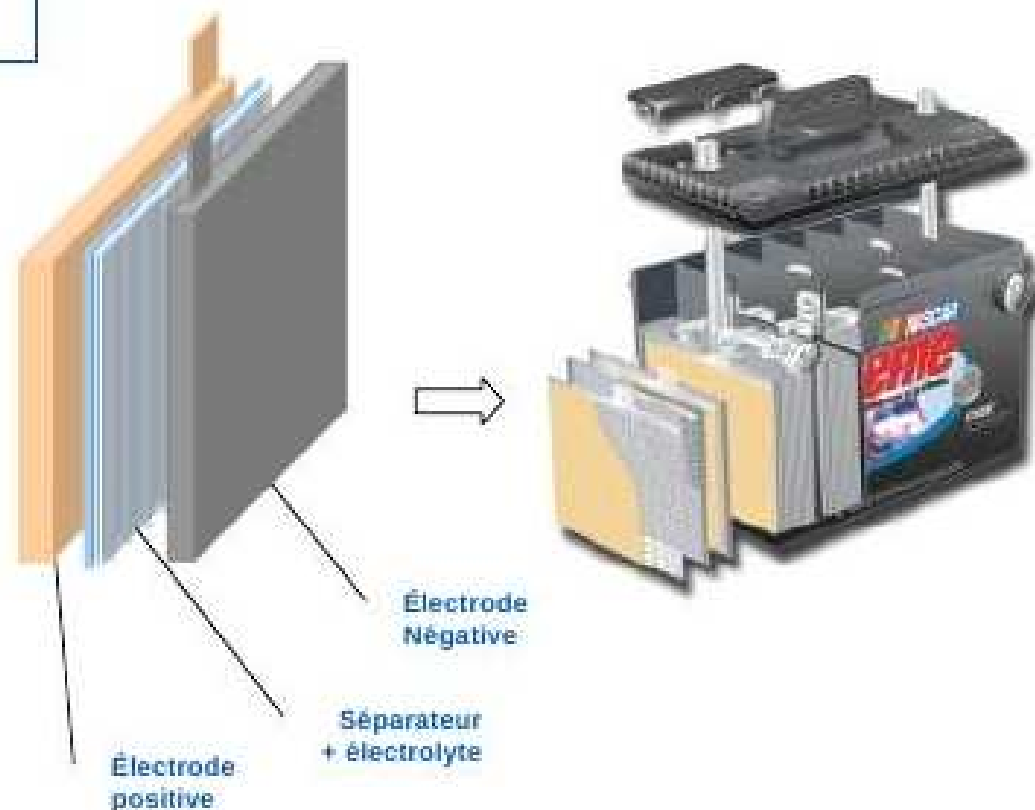


# Principe des batteries

**Systeme réversible de stockage d'électricité**

## Critères clefs :

Performances, sécurité, coût, longévité, capacité de charge rapide, recyclage.



# Familles de batteries

Les batteries  
plomb (Pb, VRLA...)



Les batteries alcalines  
(NiCd, NiMH, NiZn ..)



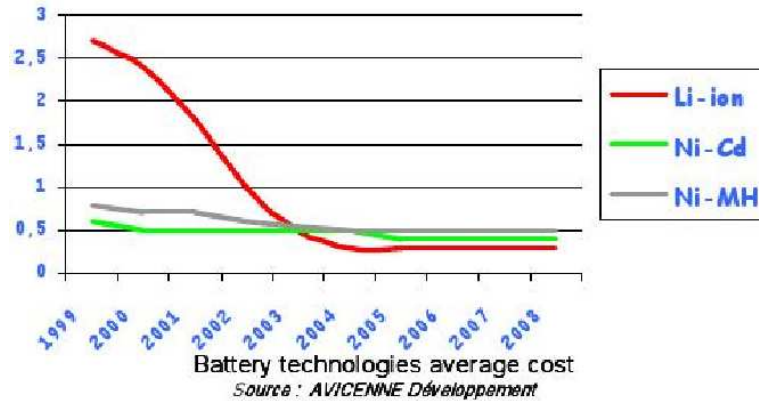
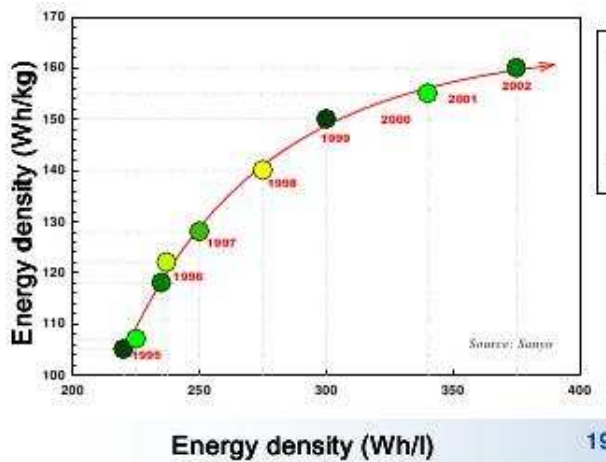
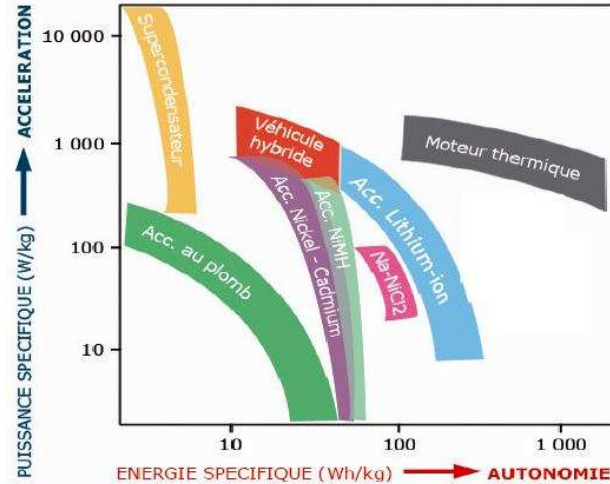
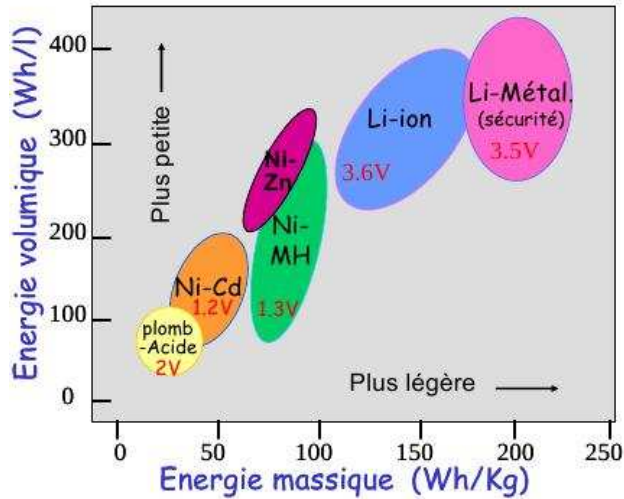
Les batteries Lithium (Li ion, Li Métal  
Polymère...)



Les batteries Sodium  
(Zebra Na-NiCl<sub>2</sub>, NaS)



# Rapide comparaison

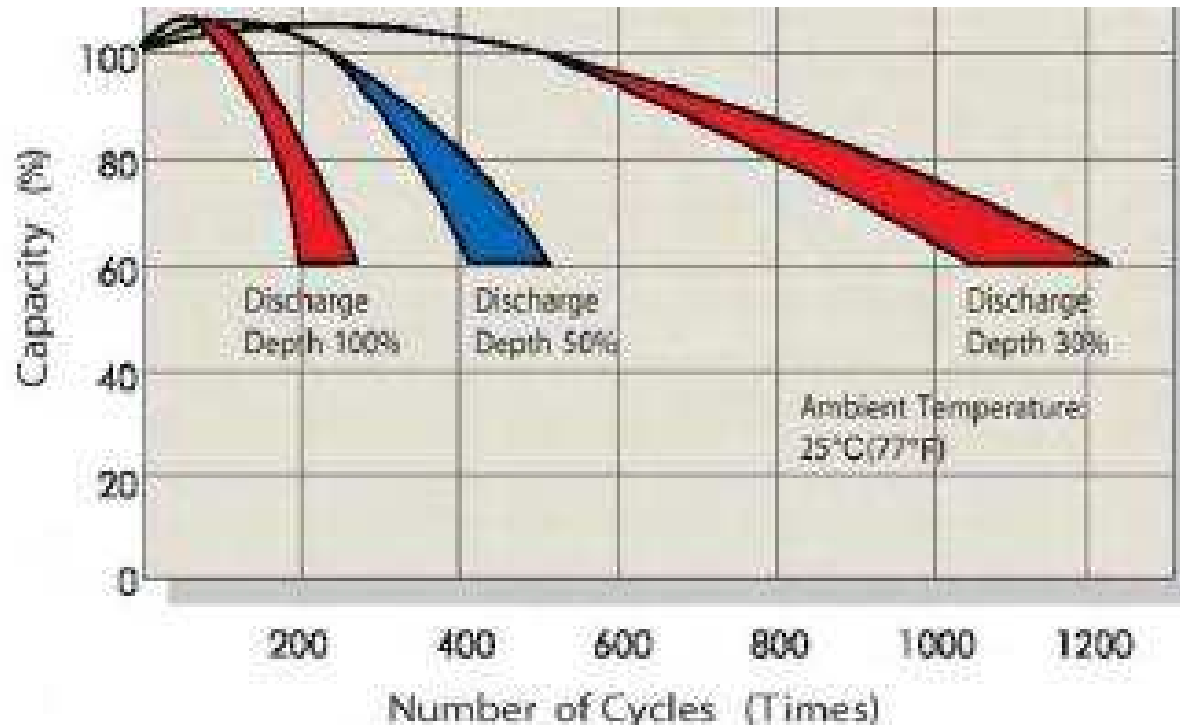


<http://www.college-de-france.fr/site/jean-marie-tarascon/index.htm>



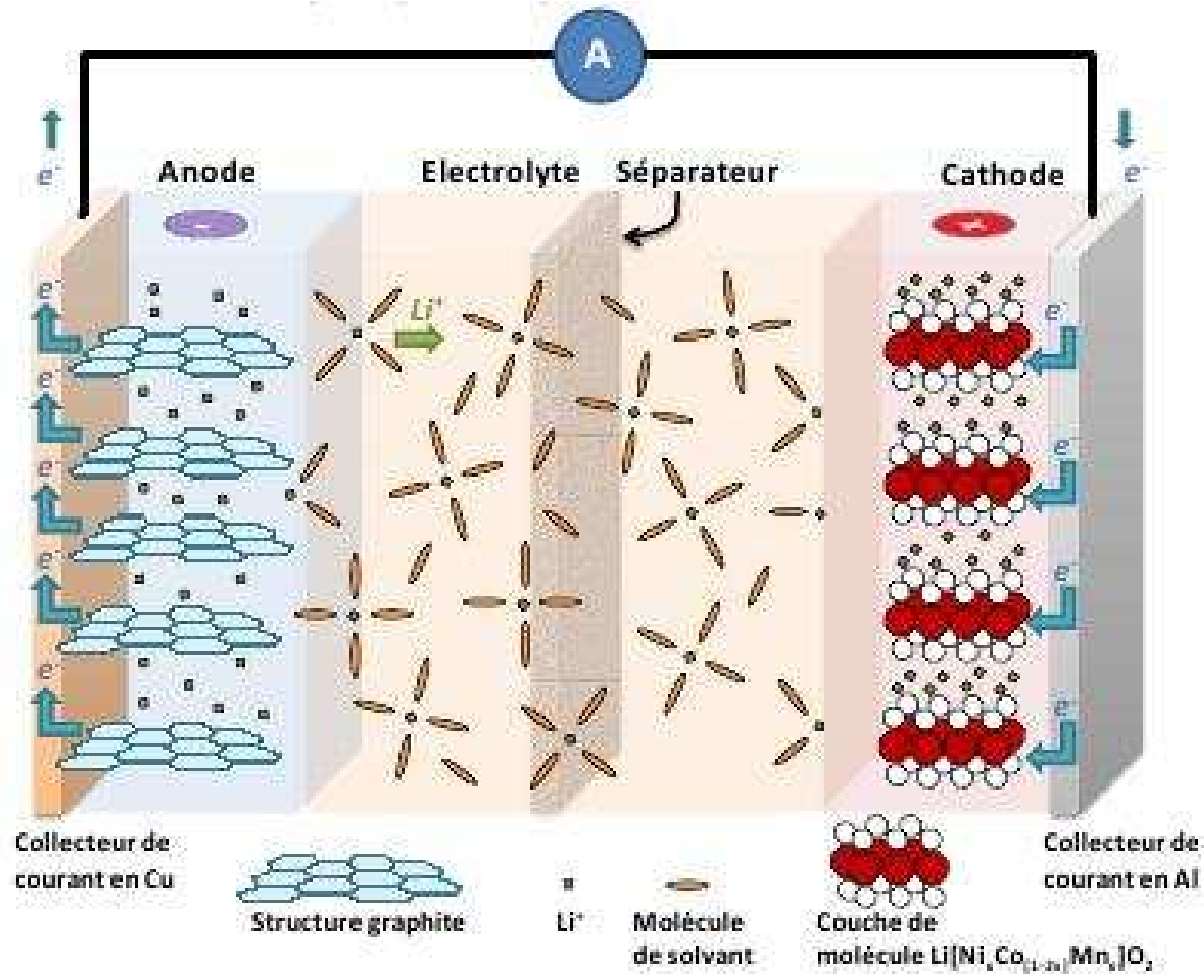


# Problème des batt. Pb



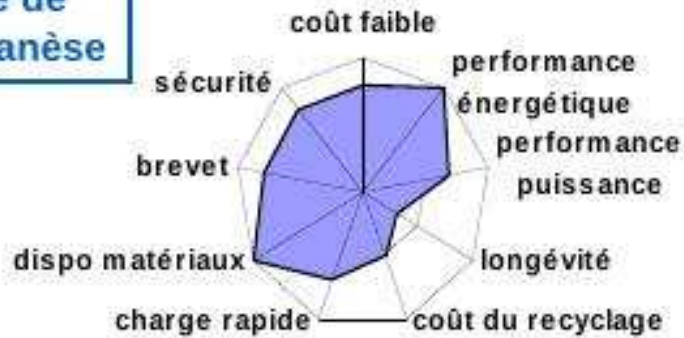
Si on veut pouvoir charger/décharger chaque jour, cela ne marchera pas!

# Batterie Lithium

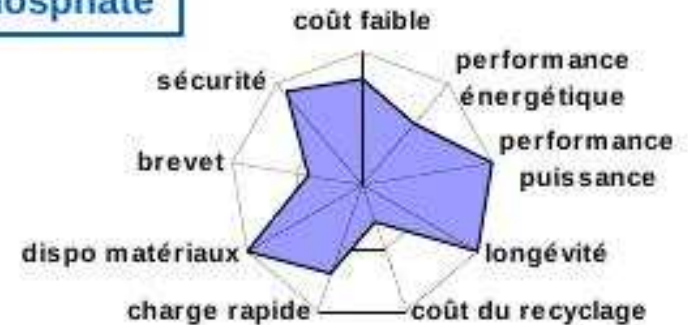


# Choix d'une batterie Li?

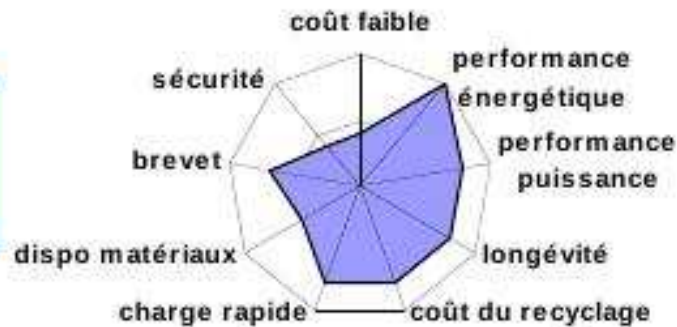
Oxyde de manganèse



Oxyde fer phosphate



Oxyde mixte nickel, cobalt, aluminium



# Les LiFePO4

Phosphate lithium-ion batteries have superior cycling ability over lead acid batteries at all depths of discharge. At high demanding, 100% depths of discharge, phosphate lithium-ion has 5 times the cycling ability as other traction lead acid batteries. Current test data on a cell level shows an expected 2000 cycles to 80% of original capacity. The linear predictable decay rate should allow the battery to extend its life to below 60% of original capacity. The superior cycling allows electric vehicles to be used daily, greatly extending their usefulness. The battery can now match or exceed the life expectancy of the electric vehicle itself.

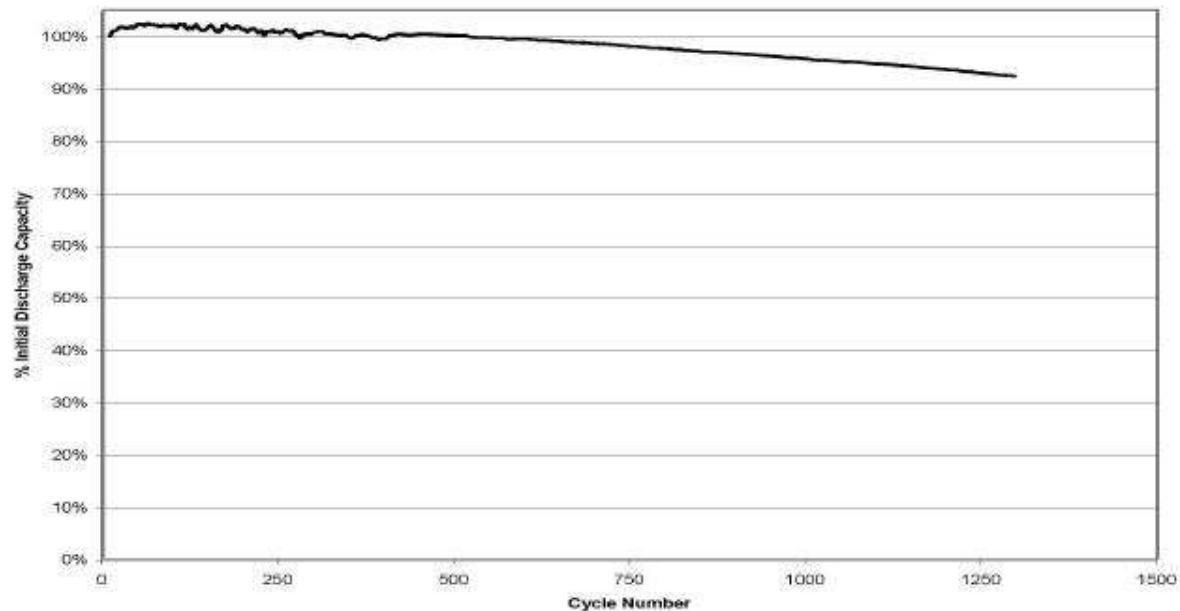


Figure 10. Excellent Cycling at 100% Depth of Discharge

Ces batteries son vendues pour 500\$/KWh sur le web: fabriquées en Chine. On peut tabler sur 300-400€/KWh.



# Quelques caractéristiques

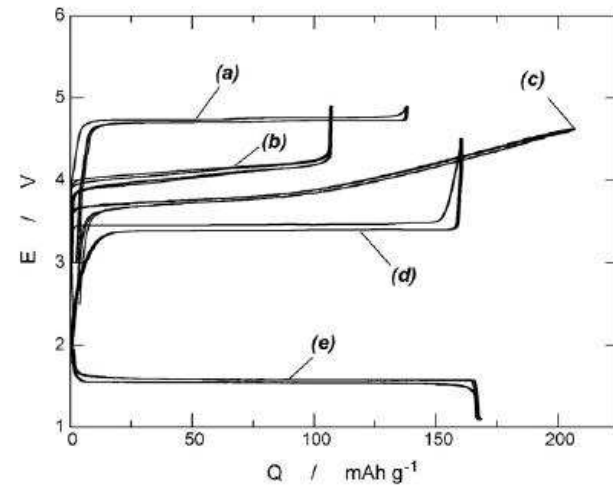
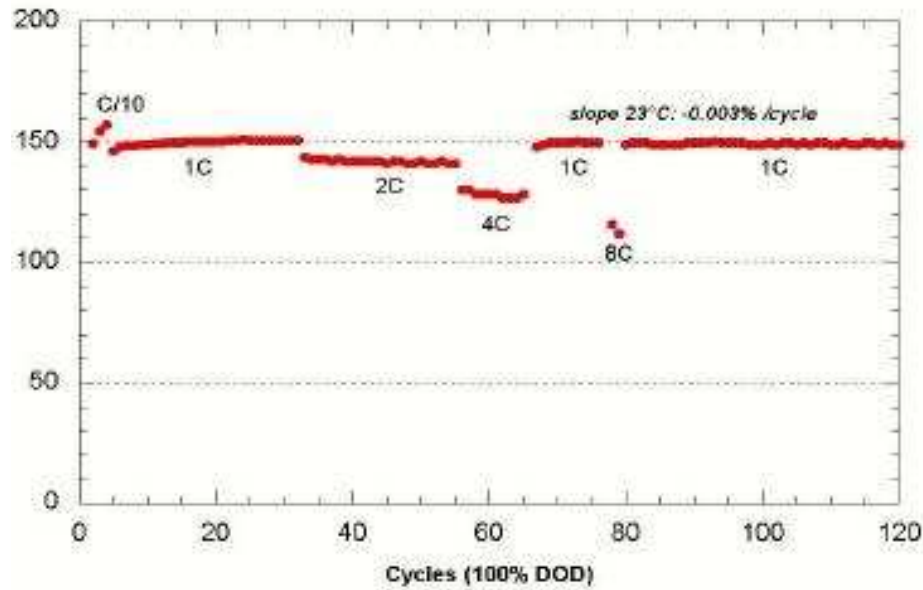
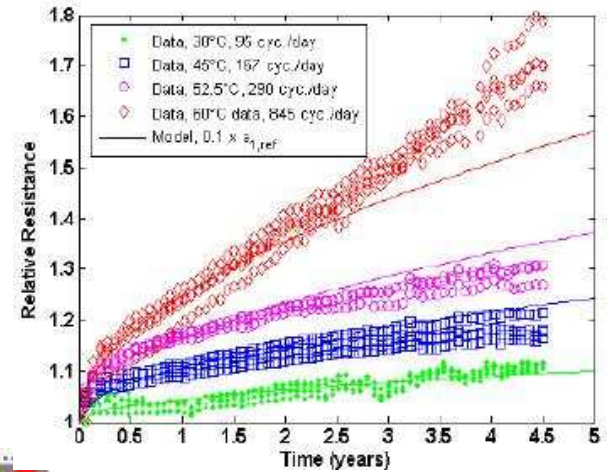
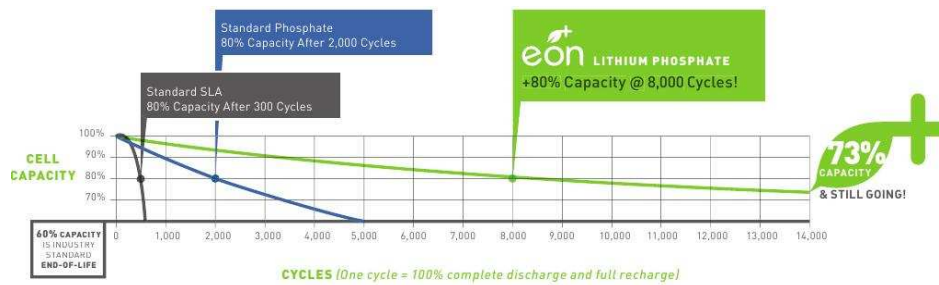


Fig. 3. Charge and discharge curves of (a)  $\text{Li}[\text{Ni}_{1/2}\text{Mn}_{3/2}]\text{O}_4$ , (b)  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ -based material of lithium aluminum manganese oxide (LAMO), (c)  $\text{LiCo}_{1/3}\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ , (d)  $\text{LiFePO}_4$ , and (e)  $\text{Li}[\text{Li}_{1/3}\text{Ti}_{5/3}]\text{O}_4$  examined in non-aqueous lithium cells.

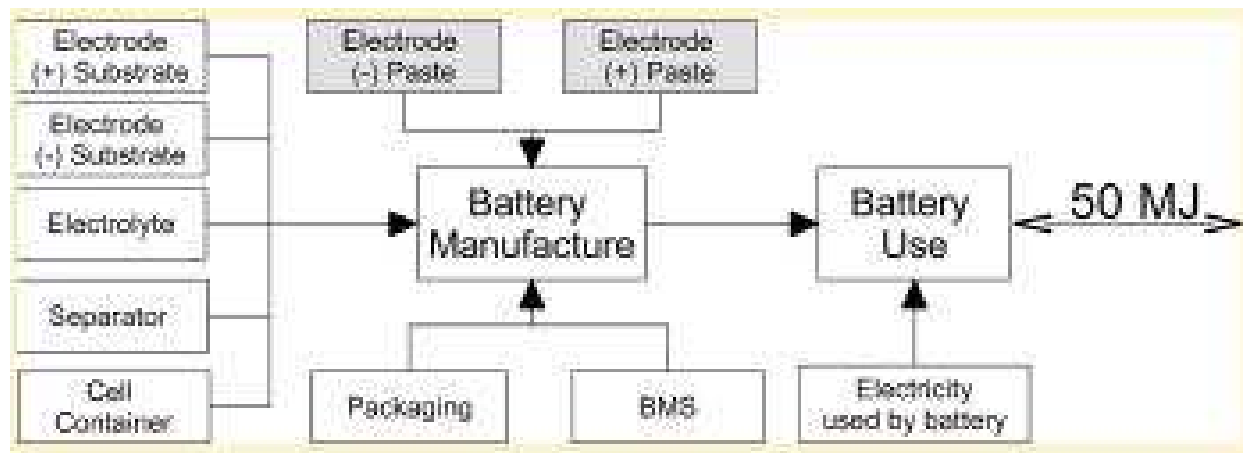


# Fournir 50 MJ?

## Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles

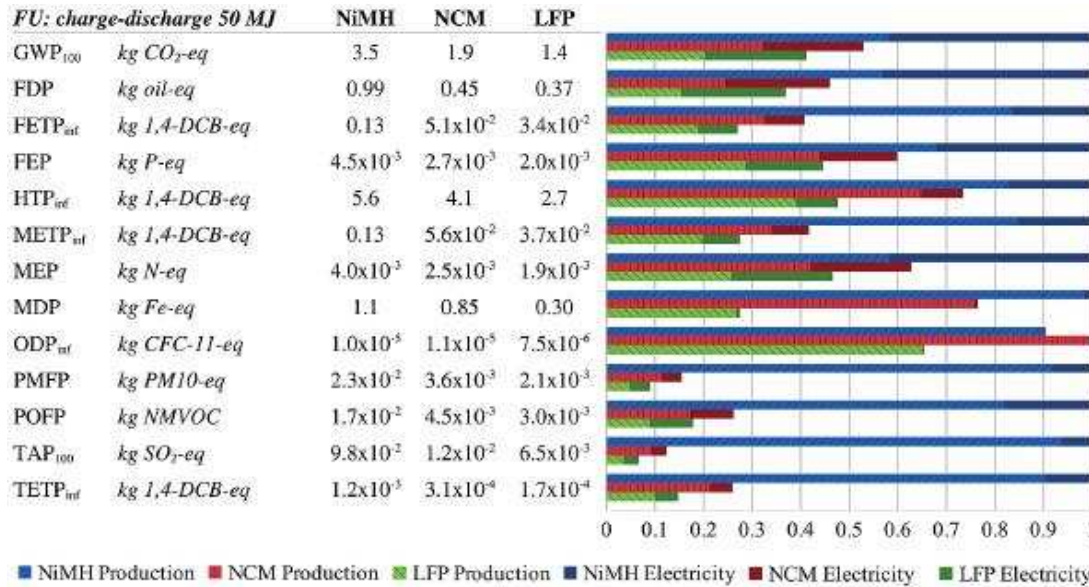
Guillaume Majeau-Bettez,<sup>\*,†</sup> Troy R. Hawkins,<sup>†</sup> and Anders Hammer Strømman<sup>†</sup>

But: Discuter du cycle de vie de diverses batteries visant à alimenter un VE. 50MJ, ce sont à peu près 100Km d'autonomie pour une voiture "raisonnable". Les diverses contributions sont discutées ci-dessous. Coût autour de 5000€.

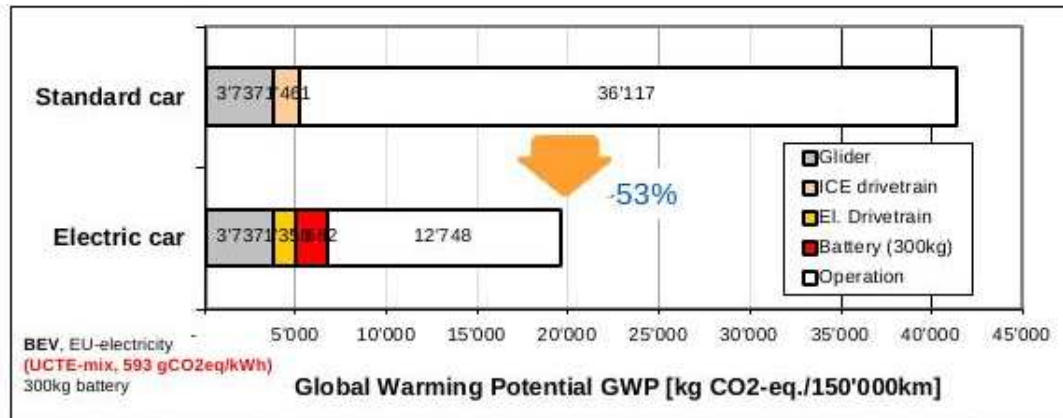


*Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 4548–4554

# Résultats

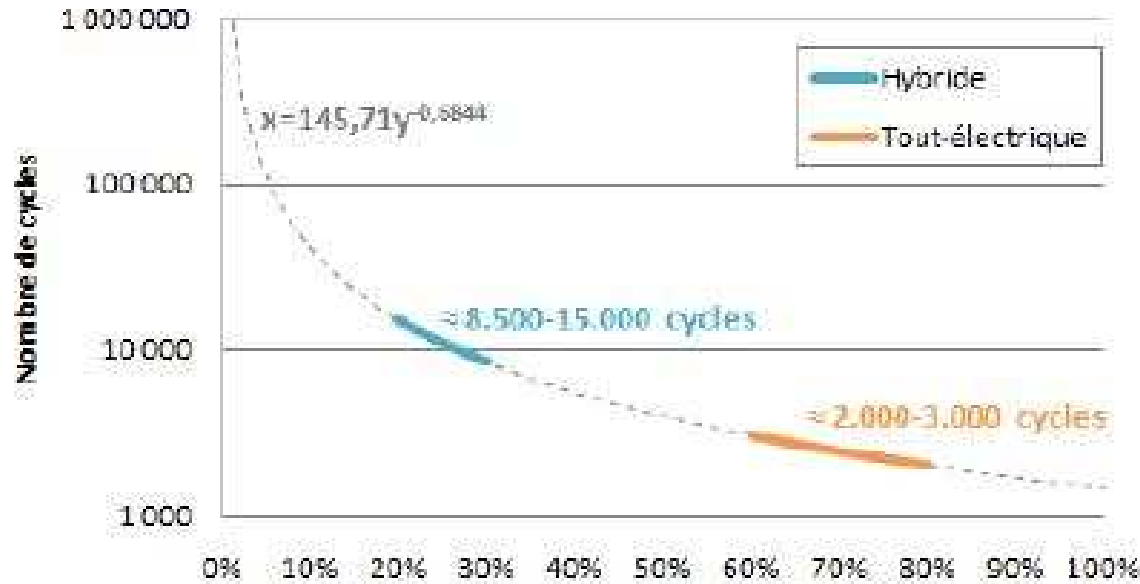


Le tableau montre (1ère ligne) les émissions de CO<sub>2</sub> à investir sur la batterie pour parcourir 100Km avec un VE. La moitié est due à l'électricité. En dessous, une comparaison des GES émis pour un véhicule classique et un VE.

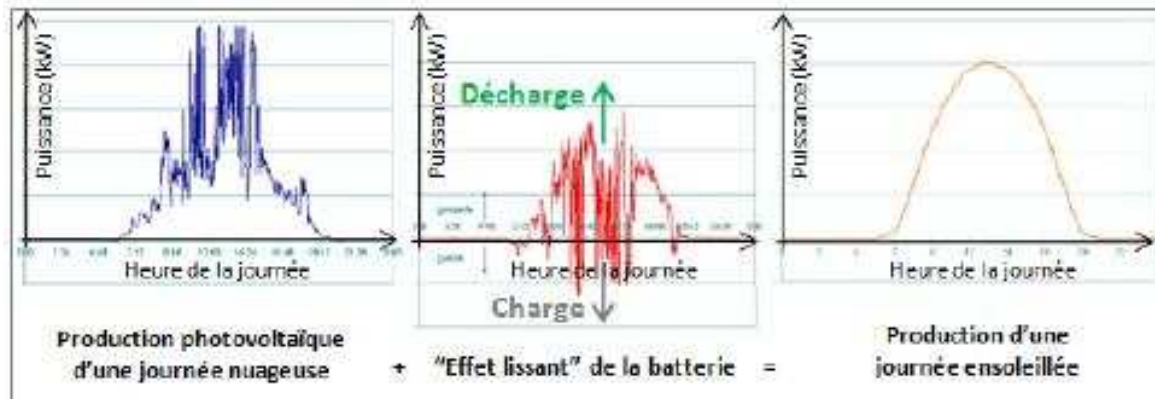


M. Gauch et al, Empa - Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (batteries 2009 Cannes)

# Stockage d'énergie?

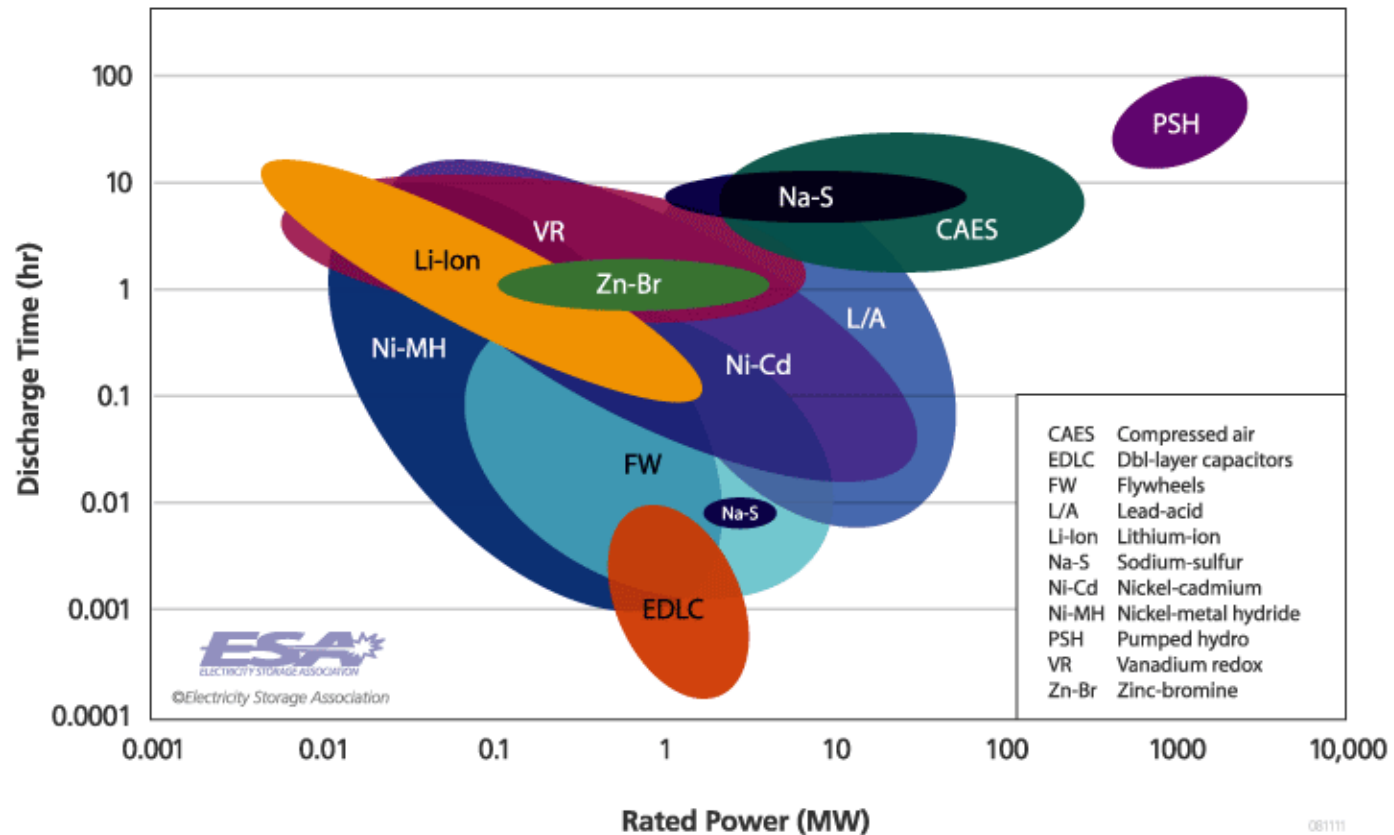


Ici, on utilise la grande puissance instantanée des batteries LiFePO<sub>4</sub> et leur grande cyclabilité (plusieurs dizaines de milliers de cycles dans un domaine restreint de puissance). Ne résout pas le problème de l'intermittence!





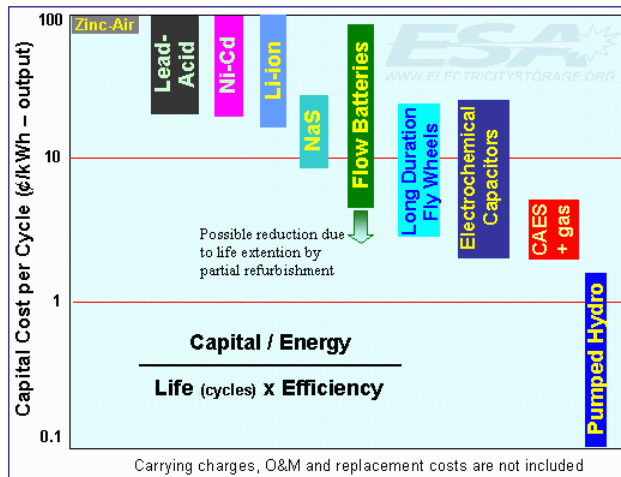
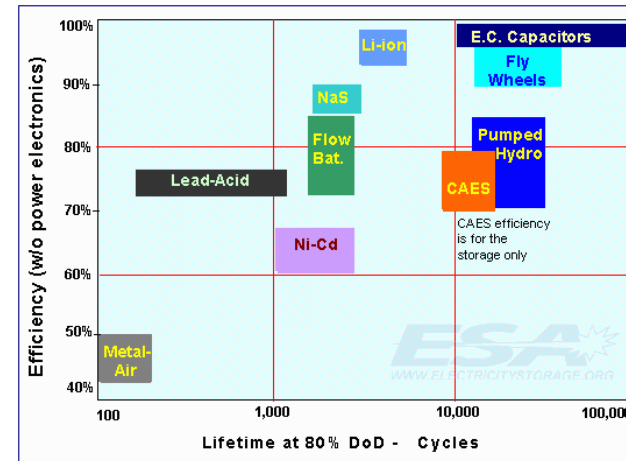
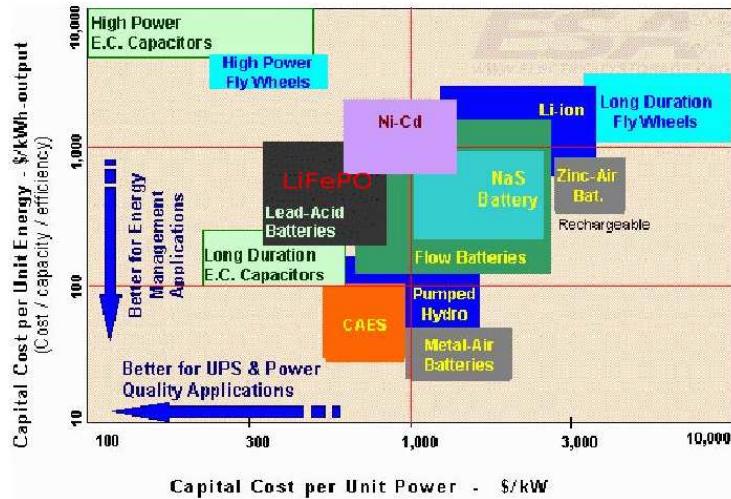
# Estimations vers 2002-2008



[http://www.electricitystorage.org/technology/storage\\_technologies/technology\\_comparison](http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/technology_comparison)



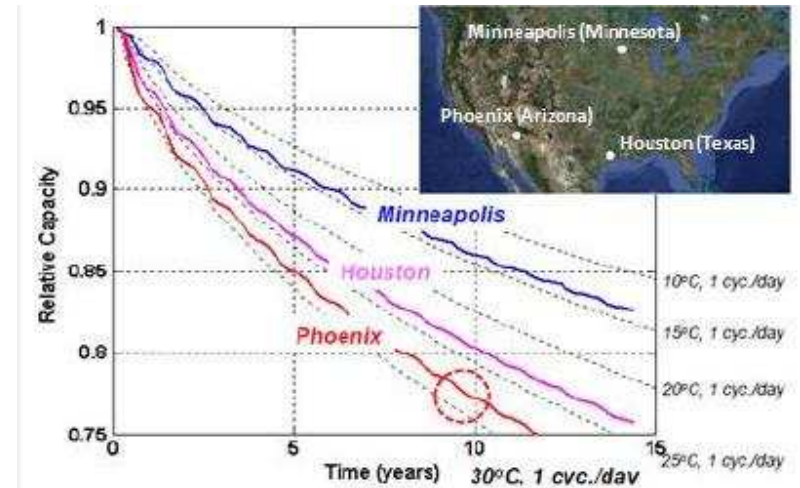
# Estimations vers 2002-2008



En 2002, on avait des prix de stockage comparables entre les Li-ion et le plomb, car le prix plus élevé du premier était compensé par une plus grande cyclabilité. Ce n'est plus vrai si le prix des Li-ion a diminué d'un facteur 5. On peut penser que les LiFePO<sub>4</sub> vont vite remplacer les batteries au plomb ou au NiCd pour les stockages de sites isolés (refuges de montagne, balises, villages du Tiers-Monde..)

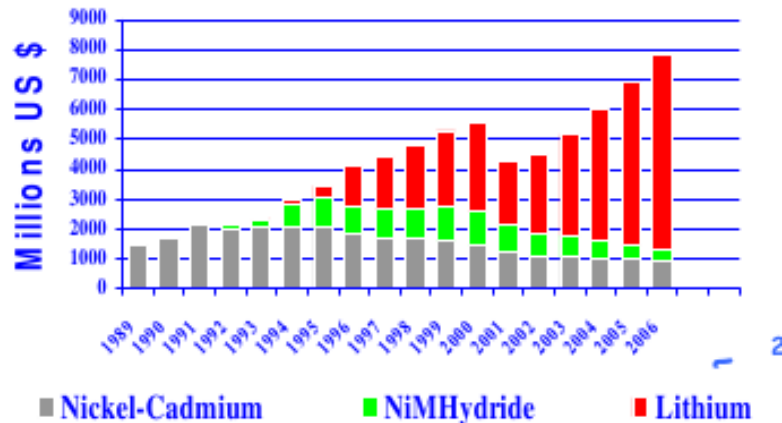
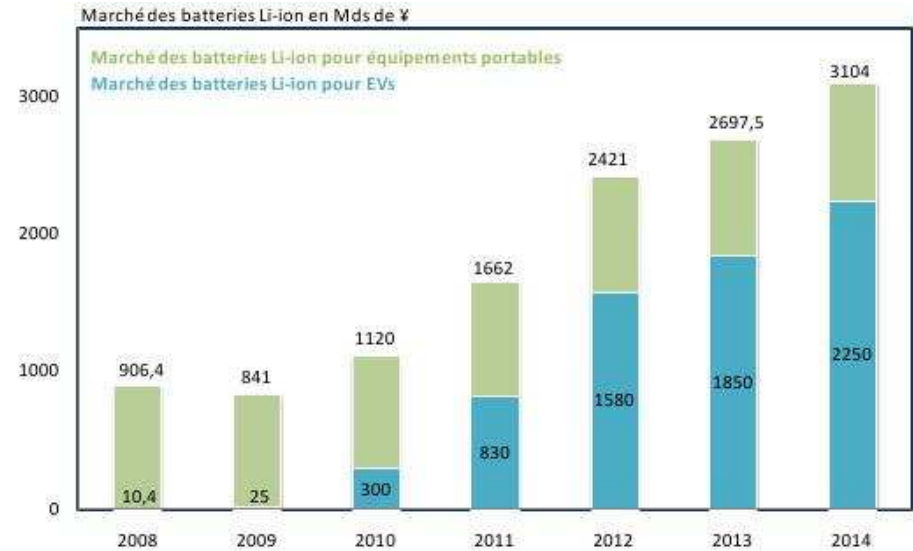
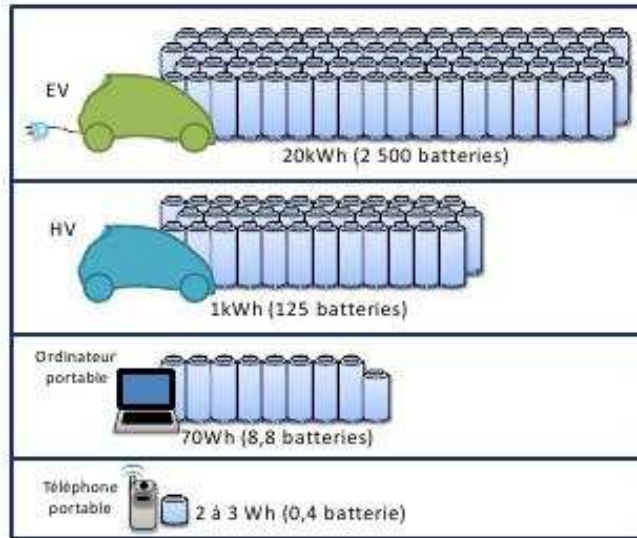


# Exemple domestique

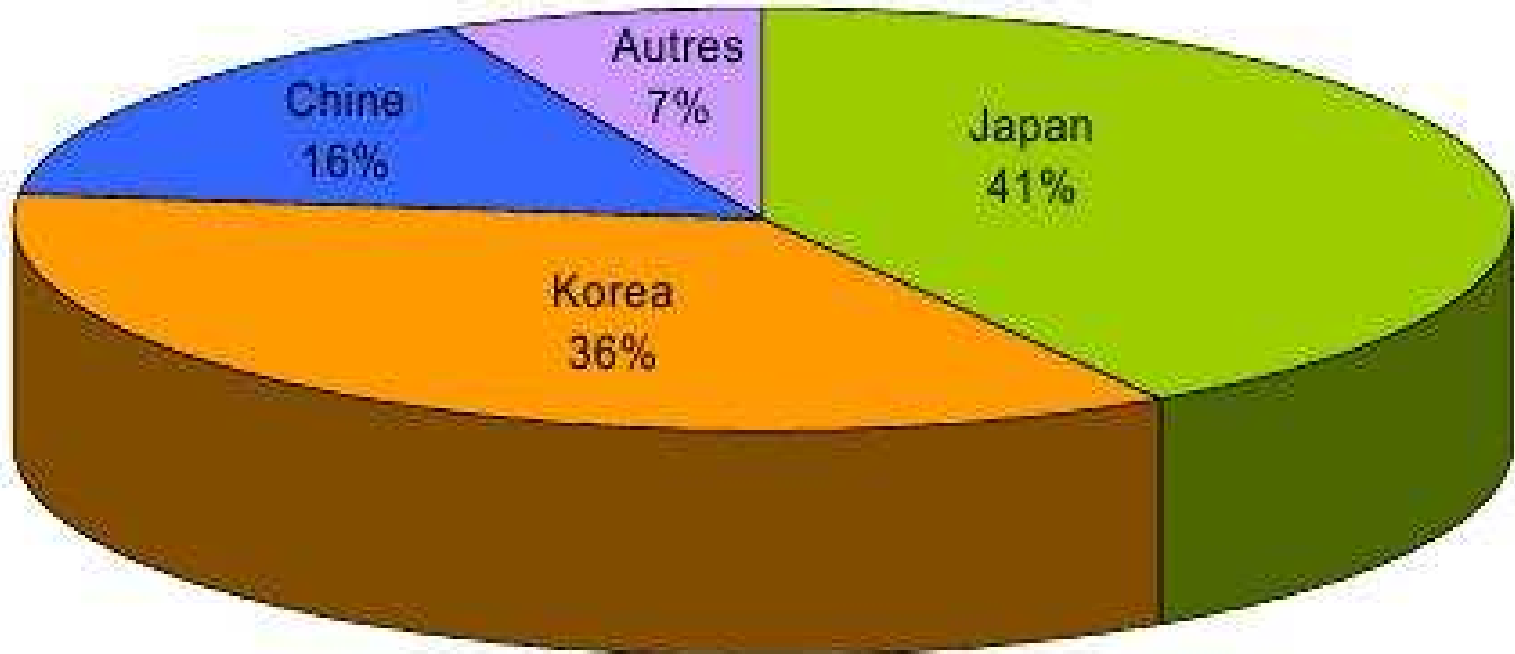


Une installation 3KW, 25m<sup>2</sup> coûte autour de 10K€. Elle fournit annuellement autour de 3-4MWh (en France). Si on veut autoconsommer, il faut au moins 10KWh de stockage (sur 24 heures). Cela coûte 3-4K€, mais on peut estimer qu'on aura 7000 cycles sur 20 ans. Surcoût de 50-80€/MWh sur 20 ans (60MWh produits). Sans doute moins coûteux que d'injecter la production d'une maison sur le réseau!  
Ne résout pas le problème de l'intermittence annuelle!

# Développement industriel



# Mauvais choix!



En 2010, production de batteries Li-ion. Situation catastrophique dans un contexte où ces batteries introduisent une révolution technologique majeure!

# Pourquoi l'hydrogène?

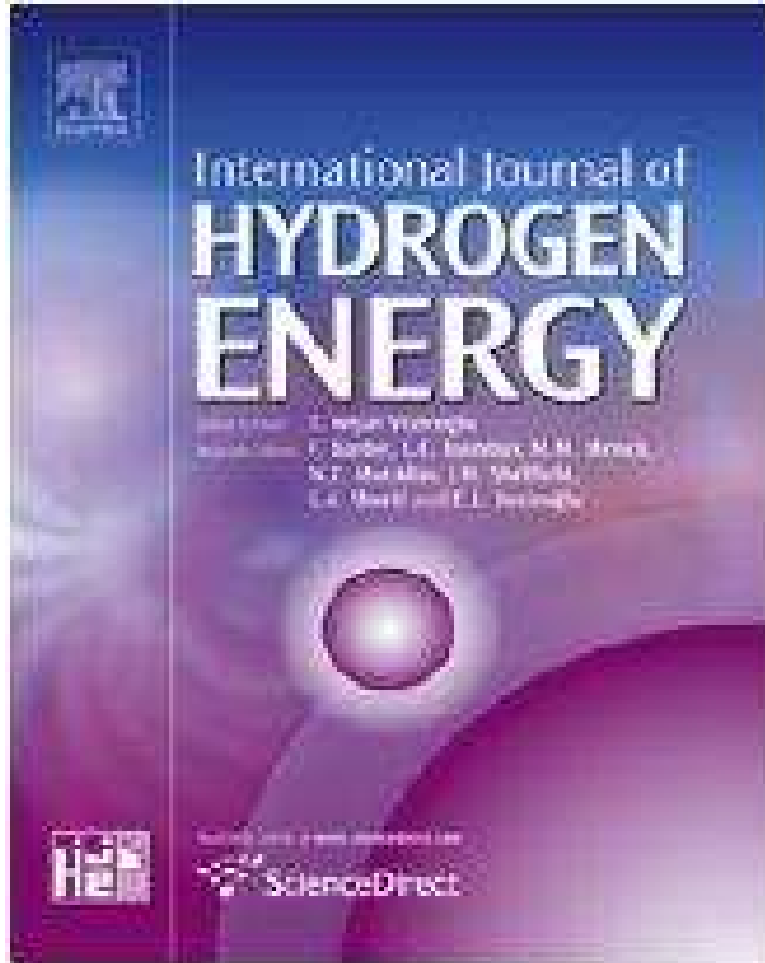


Rapport de 2006: La Commission européenne suit une lubie (germanique essentiellement) renouvelables + stockage hydrogène. L'hydrogène a une image "propre", et on peut espérer stocker facilement cette énergie dans des réservoirs, beaucoup moins chers au MWh que les batteries. Et, techniquement, on "sait faire"!

[ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/weto-h2\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/weto-h2_en.pdf)



# Domaine très actif

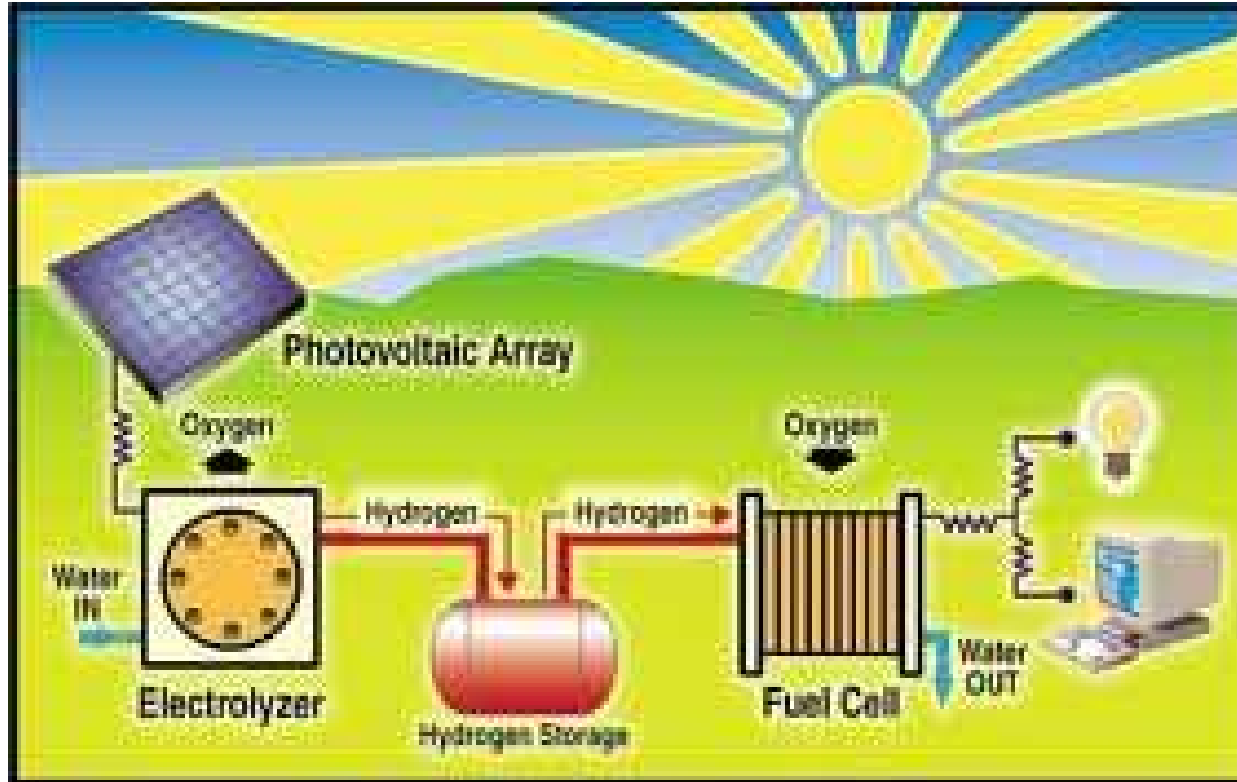


Communauté de l'hydrogène très active, grace aux subsides de l'UE (6 ième et 7 ième PECRD) et du DOE (mais Chu-Obama ont coupé en partie les crédits)

Le numéro 2011 de cette revue a 16000 pages.



# Cycle: Electricité à électricité



1. rendement de l'élaboration de l'hydrogène
2. pertes de compression/liquéfaction/stockage solide..
3. rendement de la Pile à combustible (PAC)



# Eff. Hydrogen Generation

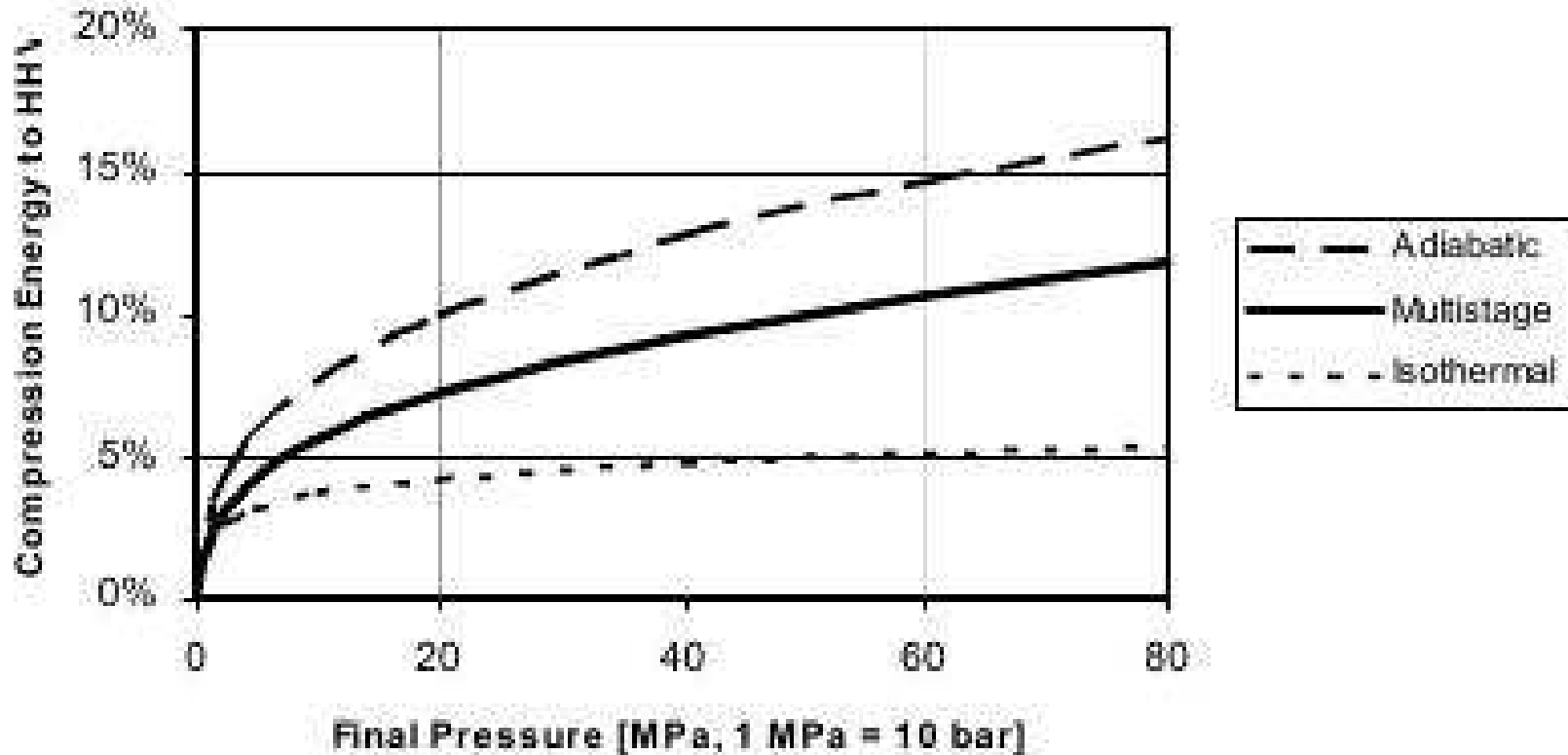
Production Technology	Process efficiency (%)	
	Central plants (small – medium – large)	Forecourt
SMR	68 - 72 - 76	65
CG	59 - 62 - 64	—
BG	57 - 61 - 65	—
WE	59 - 64 - 68	55

Efficacité thermodynamique de diverses méthodes de production d'hydrogène: SMR pour "Steam Methane Reforming", CG pour "Coal Gazification", BG pour "Biomass gazification" et WE pour "Water Electrolysis"

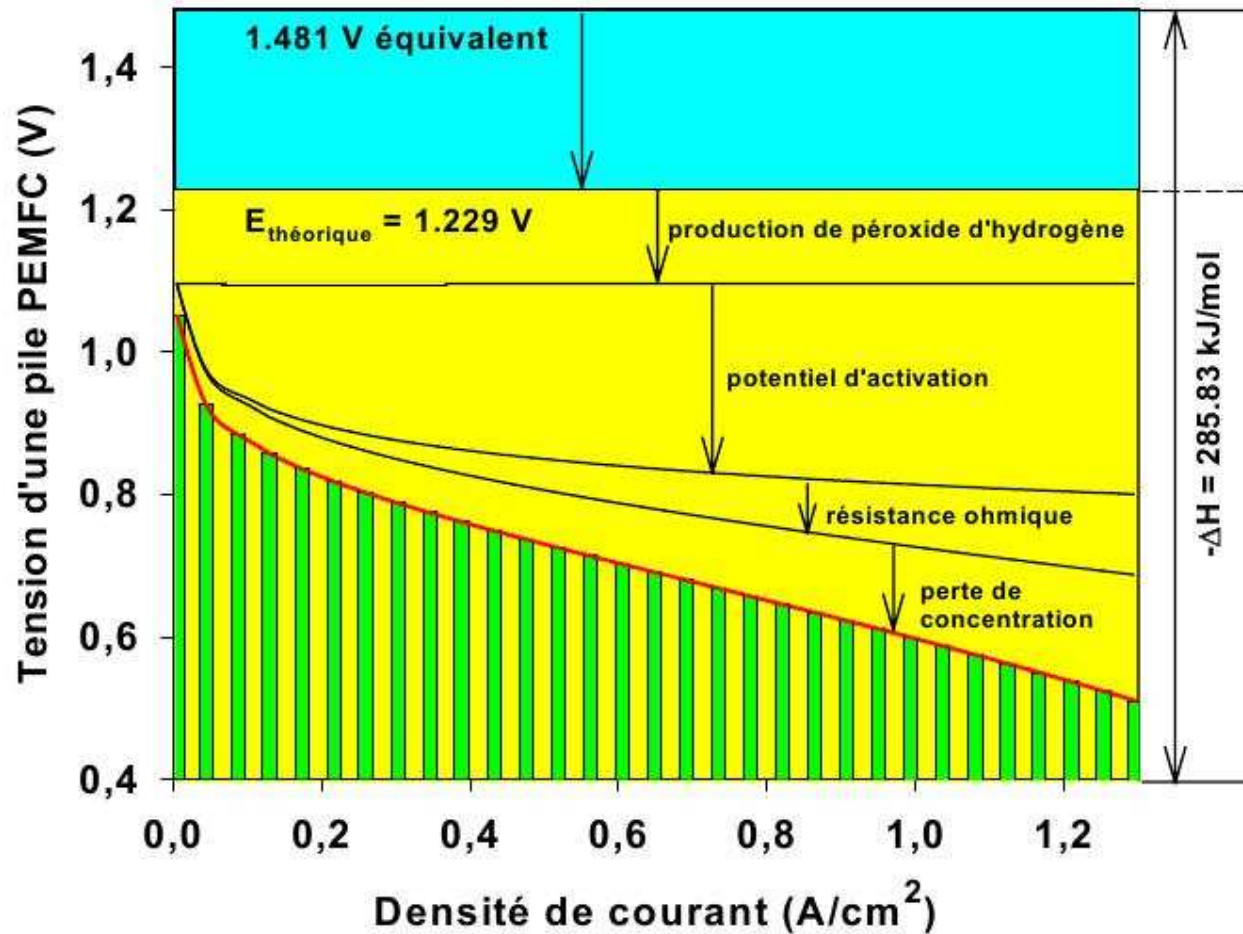
International J. of Hydrogen Energy, **36**, 4619-4635 (2011)



# Pertes de compression



# Rendement des PAC



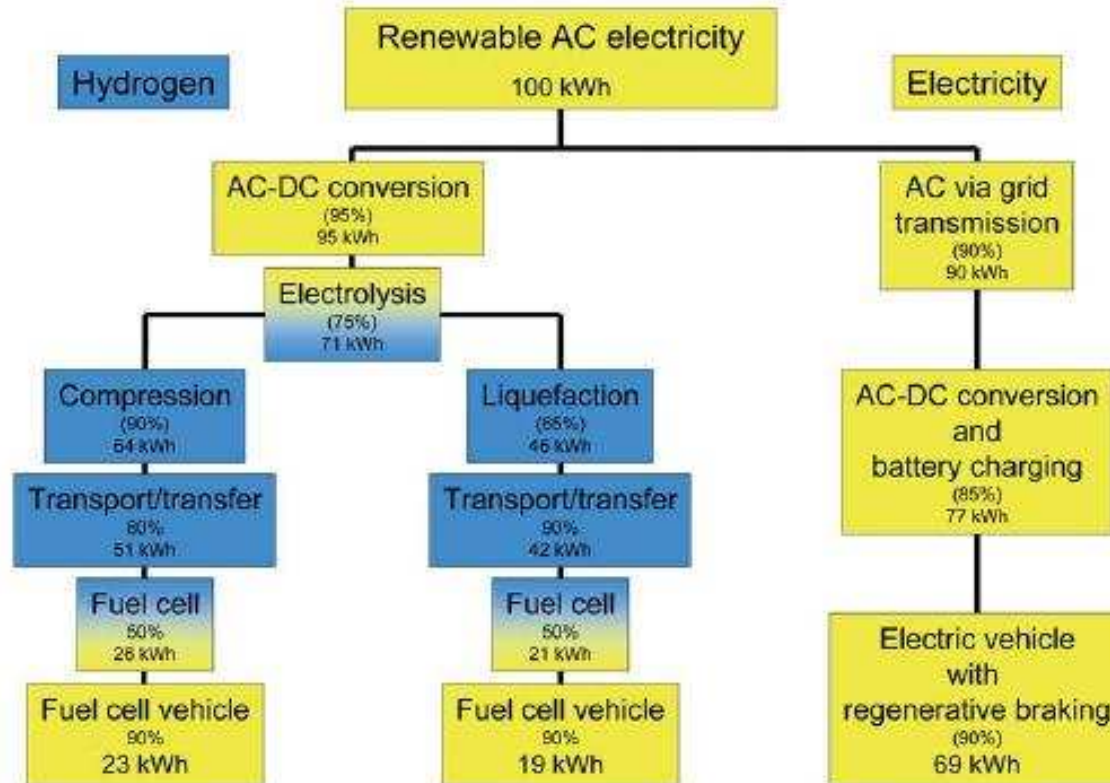
On donne uniquement l'exemple des PAC PEMFC. Mêmes problèmes pour les autres sortes.

# Diverses PAC

Fuel Cell Name	Electrolyte	Working Temp. (°C)	<u>Electrical efficiency</u>
Alkaline	Aqueous alkaline solution (e.g., potassium hydroxide)	under 80	Cell: 60–70% System: 62%
DMFC (Direct Methanol)	Polymer membrane (ionomer)	90–120	Cell: 20–30% System: 10–20%
PEM	Polymer membrane (ionomer) (e.g., <a href="#">Nafion</a> or <a href="#">Polybenzimidazole fiber</a> )	(Nafion)50–120 (PBI)125–220	Cell: 50–70% System: 30–50%
Phosphoric Acid	Molten <a href="#">phosphoric acid</a> (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	150-200	Cell: 55% System: 40% Co-Gen: 90%
Molten carbonate	Molten alkaline <a href="#">carbonate</a> (e.g., <a href="#">sodium bicarbonate</a> NaHCO <sub>3</sub> )	600-650	Cell: 55% System: 47%
SOFC	O <sup>2-</sup> -conducting ceramic <a href="#">oxide</a> (e.g., <a href="#">zirconium dioxide</a> , ZrO <sub>2</sub> )	850-1100	Cell: 60–65% System: 55–60%

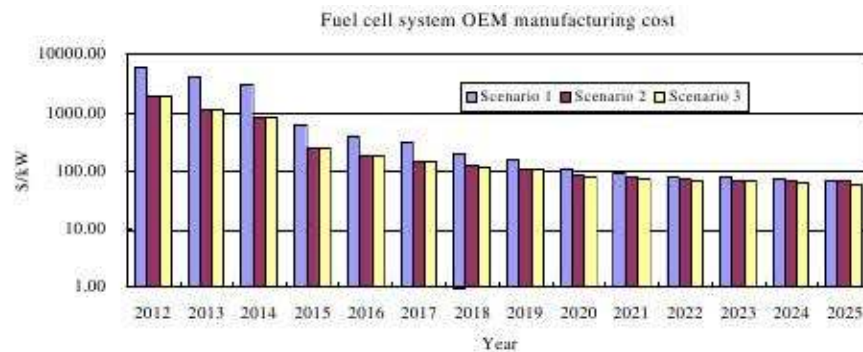
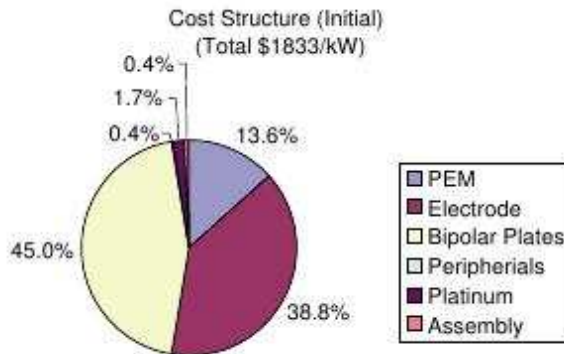
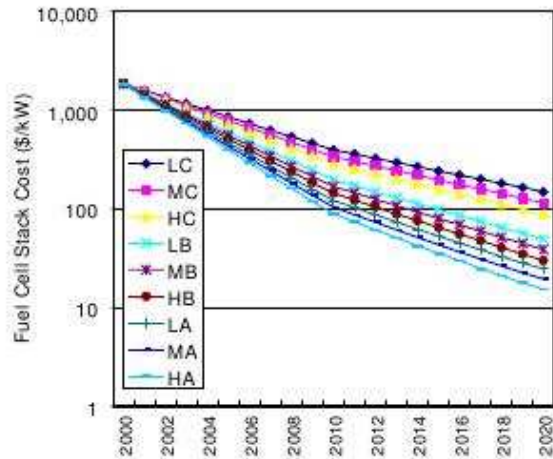


# Rendement du cycle



Estimation du rendement: 20% pour l'hydrogène et 70% pour l'électrique "pur".

# Coût des PAC?

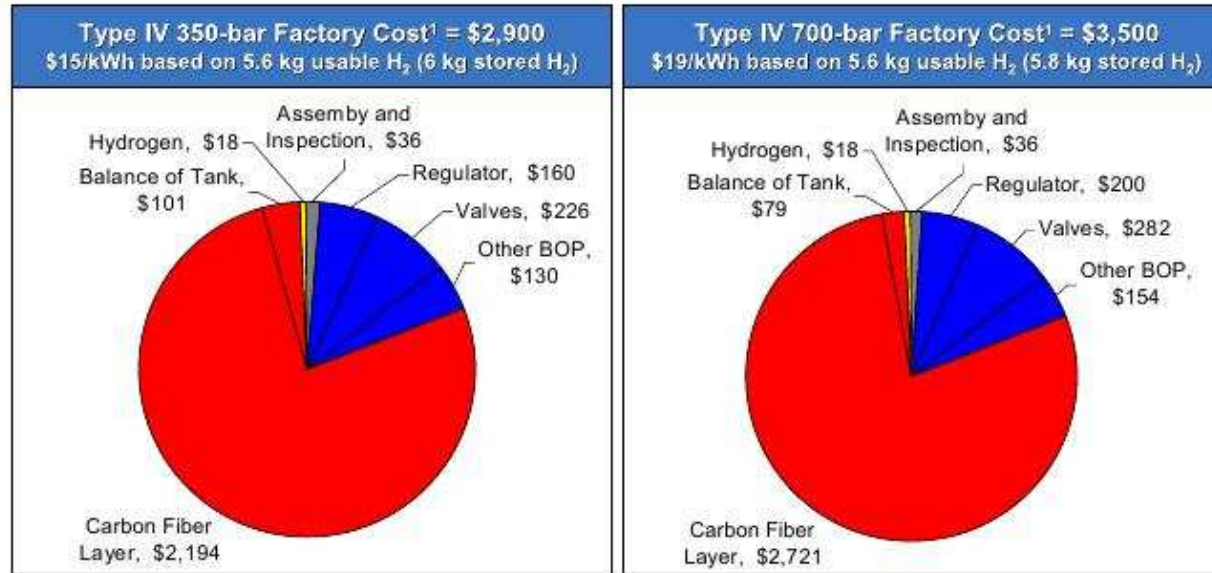


On annonce une baisse de prix d'un facteur 10 à 100..



# Coût des réservoirs

Gaz:



Donc moins de 15€/KWh A comparer aux 300-400€/KWh des batteries...

Il y a aussi des réservoirs "solide", pertes de l'ordre de 30%, sauf à récupérer l'énergie de formation de l'hydrure. Le prix des réservoirs "solide" est autour de 200€/KWh (?).

<http://www.mcphy.com/fr/produits/conteneurs-iso.php>

# Estimer les coûts

On peut essayer de donner des estimations, dans des hypothèses de fonctionnement simplifiées:

Discutons d'abord l'investissement en capital nécessaire. Pour cela on introduit divers paramètres:

1.  $C$  investissement total (par MWh d'électricité retournée)
2.  $N$  nombre de cycles de charge/décharge
3.  $\tau$  période des cycles ( $\tau/2$  charge,  $\tau/2$  décharge)
4.  $W$  énergie stockée (en MWh)
5.  $P_c$  puissance en sortie du système
6.  $C_p$  coût du MW de puissance en sortie
7.  $C_w$  coût du MWh d'énergie stockée





# Résumé des estimations

Technique stockage	$C_p$ , en €/W	$C_w$ , en €/Wh
STEP (G. Maison)	1.	0.1
Batteries	négligeable	0.3
H2, hydrures	4.	0.15
H2, H. Pression	9.	0.015

Dans ce tableau on distingue deux méthodes de stockage proposées pour l'hydrogène: le stockage en réservoir haute pression, peu coûteux, mais on est obligé d'investir assez lourdement dans un compresseur HP à deux cycles, et le stockage avec un hydrure, qui est à basse pression (10-20 bars), mais où les réservoir sont très chers (solution "McPhy"). Pour les Steps, on estime que Grand'Maison a coûté 2G€ pour un stockage de 20GWh, et que cette somme est essentiellement du génie civil, avec une petite contribution des turbines hydrauliques (1G€ pour 1GW?).

# Prix de l'hydrogène

Liquéfaction de l'hydrogène: 1€/Kg H<sub>2</sub>; Coût estimé de l'hydrogène:  
-3\$ (charbon), -4\$ (gaz naturel), -6-8\$ (électrolyse de l'eau) (pour un Kg H<sub>2</sub>, 130MJ)

Si on veut stocker sur une semaine un MWh, cad 2.2 MWh hydrogène (rendement PAC: 45%), ou 55Kg H<sub>2</sub>, en admettant que l'on ait une installation de puissance électrique (PAC) de 20KW (qui délivrera son énergie sur une plage de 100 heures de charge/décharge pleine puissance). On devra investir:

1. 36K€ pour 20.KWe de PAC
2. 33K€ pour 2.2MWh de réservoir sous pression
3. 45K€ pour électrolyseur de 45 KW d'Hydrogène
4. 90K€ pour le compresseur d'hydrogène (2000€/KWH<sub>2</sub>)

Au total un investissement de 200K€, à comparer aux 300-400K€ pour un MWh de batteries. Prix de revient du MWh (1000 cycles de une semaine): 220€/MWh pour une installation hydrogène (20KW) et 300-400€/MWh pour une installation à batteries.

**MAIS CE N'EST QUE L'INVESTISSEMENT!**



# Contribution investissement

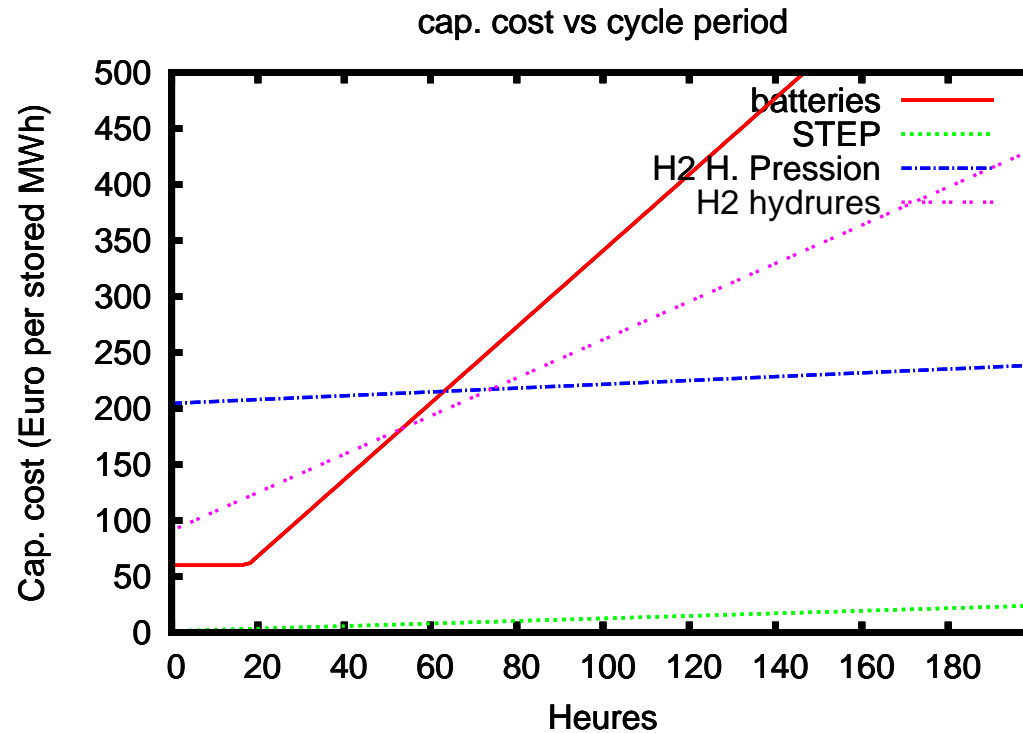
Pour estimer la contribution de l'investissement, il faut avoir un nombre  $N$  de cycles et un temps  $\tau$  de cycle. On peut supposer que l'investissement est amorti sur un temps total  $T$  de 10ans (88,000 heures), sauf pour les STEPs, qui est plutôt de 100 ans (880,000 heures). Si on fait un calcul simplifié en divisant le coût de l'investissement par le nombre de cycles, et en posant que le capital investi correspond à un fonctionnement ininterrompu de cycles de charge/décharge:

$$C/N = (2C_p + C_w * \tau)/N$$

Le nombre de cycles, en fonctionnement permanent, est soit  $N = T/\tau$ , si le nombre maximum de cycles  $N_{max} > N$  soit  $N_{max}$  si  $N_{max} < N$ . On peut supposer que  $N_{max} = 5000$  pour une batterie au Lithium et que toutes les autres installations électrochimiques supportent 10 ans de fonctionnement continu (peu probable pour des PAC).



# Variations du prix avec $\tau$



Evidemment, difficile de comparer un investissement sur 100 ans sur 10 ans (En pratique, GM n'a que l'équivalent de  $10^5$  cycles). TOUS les calculs financiers sont aussi trompeurs, voir le débat sur l'EPR. La discussion n'est valable que si l'électricité de départ est gratuite. Seul cas: les data centers, après 60 heures. Coût autour de 0.3M€/MWh.. Les diesels sont bien moins chers, en les préservant des inondations (Fukushima!).

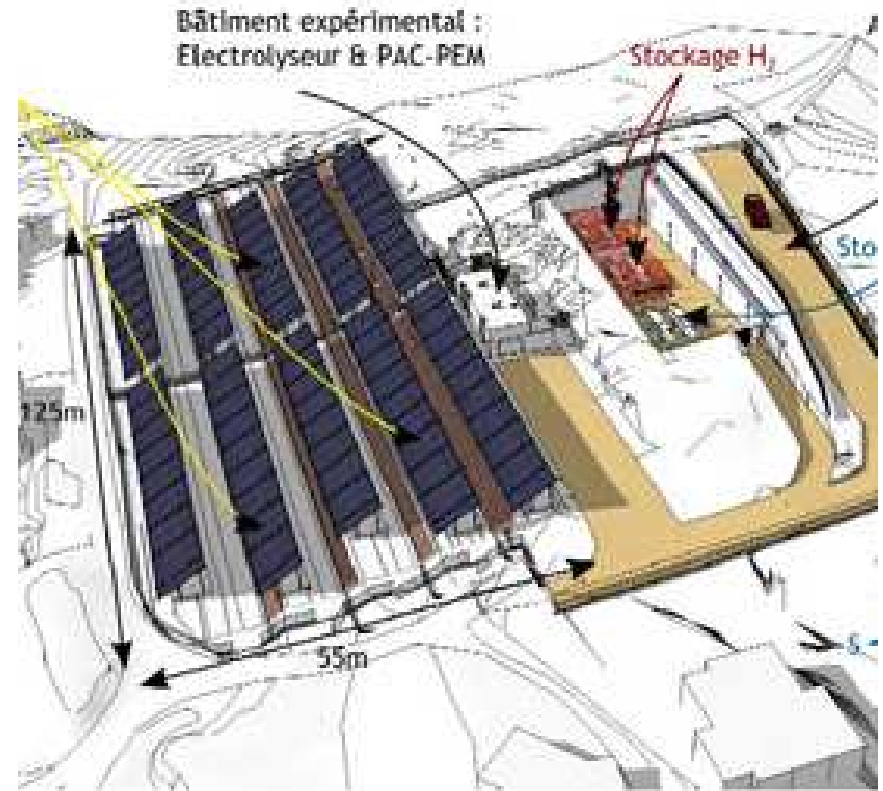
# Et les “coûts variables”

Si on estime les rendements de cycle  $\eta$  des diverses techniques et qu'on prend pour valeur de l'électricité renouvelable  $C_r \simeq 100\text{€}/\text{MWh}$ , on doit ajouter à ce coût d'investissement la valeur  $C_r/\eta$  ce qui donne pour nos diverses techniques:

Techn. étudiée	STEP	Batteries	H2
$\eta$	0.7%-0.8%	0.95%-0.9%	25%-30%
coût variable (€ par MWh)	130	110	350

On voit que, sauf à prétendre avoir de l'électricité gratuite, la solution hydrogène ne semble pas avoir le moindre intérêt, outre son aspect esthétique (l'électricité à “prix négatif” est un artefact de marché). Pour les STEPs, on peut avoir une forte augmentation de prix si on veut transporter l'électricité sur de grandes distances (il y a des projets européens de transport de grandes puissances sur plus de 1000km, par exemple de la Mer du Nord aux Alpes). Déjà les tarifs “TURPE” alourdissent le bilan des STEPs.

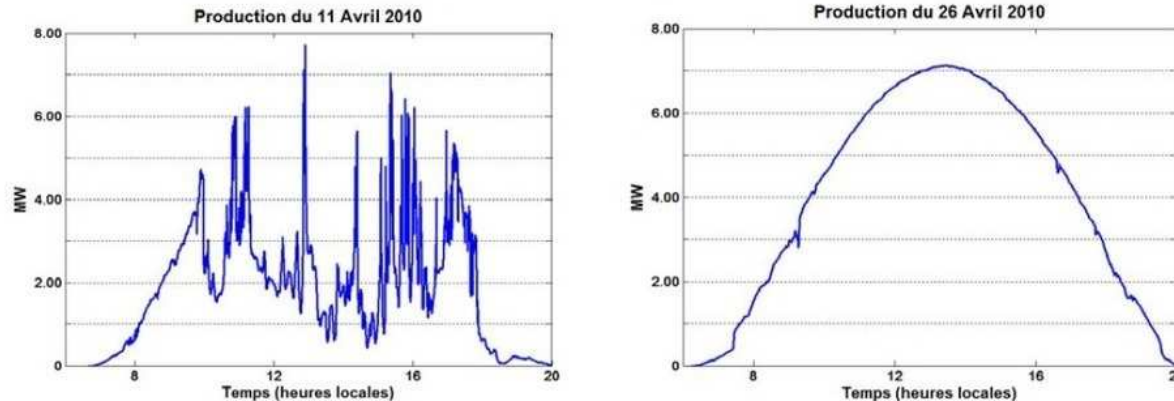
# Exemple: Myrte



Fruit d'une collaboration U. Corte-AREVA-CEA.



# Un dispositif adapté à une ile?



*Illustration de l'intermittence photovoltaïque  
Courbes de production photovoltaïque sur un même site au cours d'un même mois*

On est surpris de trouver comme argument de “vente” l’intermittence d’une journée nuageuse, en ce cas, on a montré que les batteries sont seules raisonnables. Le stockage est sous 35 bars, et ils donnent 1.75MWh d’énergie stockée. Si c’est juste l’énergie de l’hydrogène, cela fait 35Kg de H<sub>2</sub> et à 3Kg/m<sup>3</sup>, 12m<sup>3</sup> de réservoirs. Comme la puissance est de 200KW, on a 9 heures de stockage: cela répond en principe à un cycle journalier.

# Nombreux projets

## **Un projet dans les Pouilles:**

24M€ pour 39MWh stockés (sous forme des réservoirs basés sur l'hydrure de magnésium de McPhy). Subvention européenne de 14E€. Cela fait un investissement de 600€/KWh!

## **Un projet à Croix Valmer:**

“La Croix Valmer veut être la plus autonome possible en énergie”. Résultat, stockage H2 avec 35KW de puissance PV. Et Luc Oursel de se réjouir: “..Avec ce succès commercial, Areva se positionne plus que jamais parmi les leaders de la filière hydrogène et pile à combustible”. Est-ce bien le bon endroit où investir?

**Des projets d'installations de sauvegarde informatiques**  
en lieu et place de dispositifs à batteries (onduleurs).

## **Des projets domestiques**

Je veux aussi parler d'une utilisation proposée récemment dans un article de “Pour la Science”. Source: l'équipe qui a été à l'origine de McPhy (voir dia suivante).

## **Il semble que Siemens fait un calcul plus intelligent:**

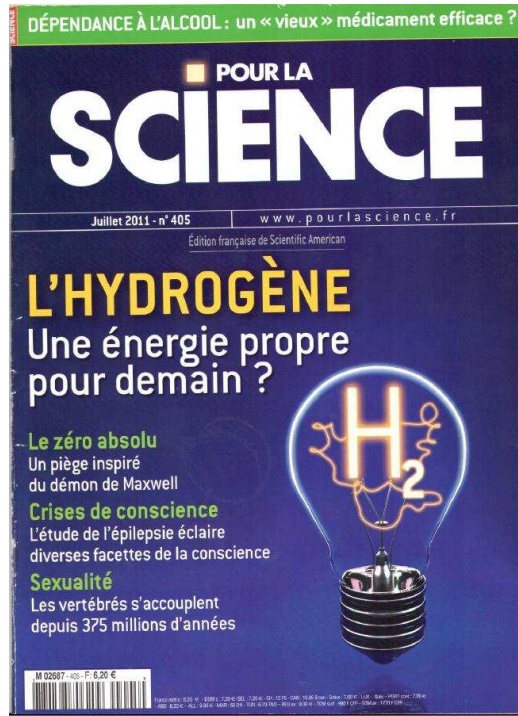
Siemens Develops Modular Power Storage for Renewable Energy (batteries!)

<http://www.treehugger.com/clean-technology/siemens-develops-modular-power-storage-renewable-energy.html>





# Un article de lobbying



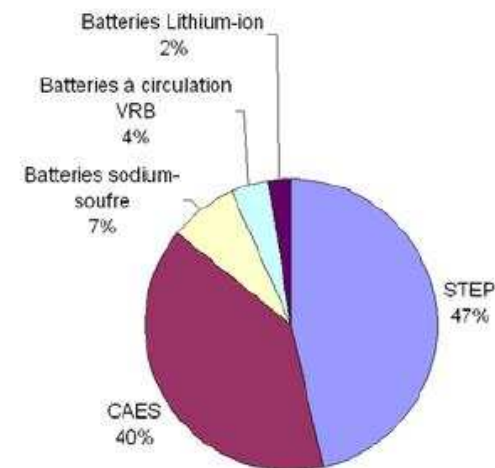
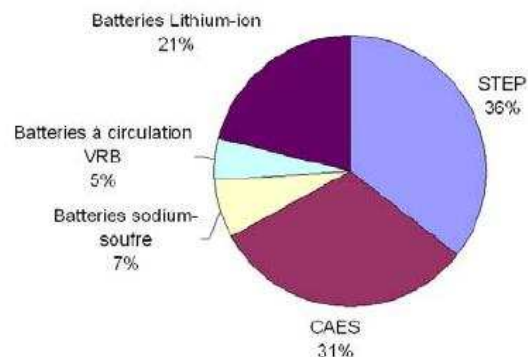
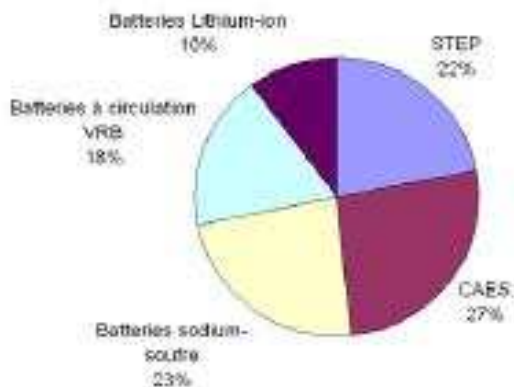
On stocke 4.5 Kg H<sub>2</sub> dans un conteneur solide (Mg). Cela donne autour de 80KWh d'électricité (40KWh/Kg et rendement de 45 nous dit que c'est la consommation hebdomadaire d'une famille (4MWh/an donc). Mais pour avoir 4.5Kg de H<sub>2</sub>, il faut injecter 0.35MWh d'électricité dans la semaine, ce qui nécessite de produire 50KWh chaque jour, ce qui veut dire 15KWc (120m<sup>2</sup>, 80k€) de panneaux PV, alors que 5KWc fournissent cette énergie pourvu qu'on la stocke en batteries.



# Prévisions DGEC

Technologie	Capacité installée en puissance (GW)	Capacité installée en énergie (GWh)	Valeur des investissements (millions d'euros)
STEP	151	1341	60700
CAES	133	1142	73600
Batteries sodium-soufre	30	216	64700
Batteries à circulation VRB	21	124	49800
Batteries Lithium-ion	90	72	28700

	2011	2017	2020
Consommation d'hydrogène pour applications énergétiques (milliers de tonnes)	0,8		418
Nombre de stations hydrogène	215		5 200
Nombre de piles à combustible vendues (milliers de tonnes)	15	plus de 6 000	
Taille de marché des piles à combustible (milliards d'euros)	0,3	22,4	



Investissement (en %), Puissance (en %) Energie (en%)



# Résumé

1. La production de batteries  $\text{LiFePO}_4$  va rapidement se développer pour les VE
2. Ces batteries sont le meilleur moyen de stockage local pour l'intermittence jusqu'à 24 heures
3. Au delà de 24h, le surcoût augmente rapidement
4. Le problème du rendement du cycle rend le stockage hydrogène toujours trop coûteux
5. Pour l'intermittence des renouvelables connectés au réseau, seuls les STEP fournissent un surcoût acceptable, mais le nombre de sites est limité et cela rend nécessaire le transport de l'électricité sur de longues distances

