



# STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

un degré de flexibilité pour adapter  
la production à la consommation



## Pourquoi stocker en situation connectée réseau ?

- améliorer et sécuriser la gestion du réseau dans un contexte d'ouverture des marchés de croissance des systèmes de production non pilotés par la demande
- permettre l'ilotage de consommateurs/producteurs

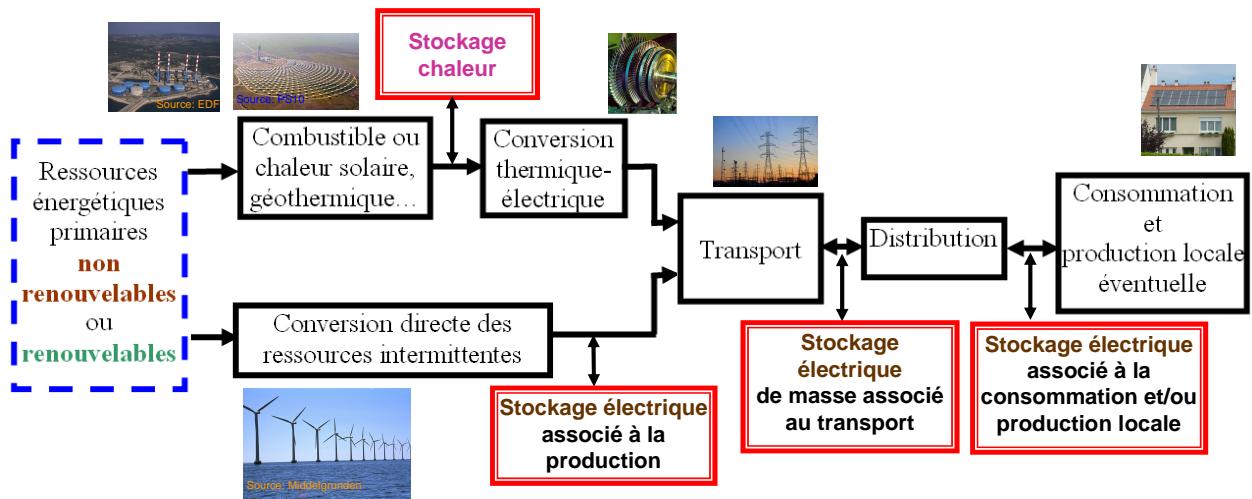
→ **Alimentation en électricité plus sûre et plus robuste**

- augmenter la pénétration des sources variables et incertaines éoliennes, photovoltaïques, houlomotrices...
- réduire les besoins en centrales thermiques d'appoint

→ **Développement durable (CO<sub>2</sub>, indépendance énergétique...)**



## Synoptique du potentiel d'applications du stockage dans le système de production – transport – distribution électrique



Source : J. PERRIN, F. CUEVAS, B. MULTON, « Le stockage d'énergie pour le vecteur électricité »  
Colloque du Programme Interdisciplinaire Energie du CNRS, Montpellier, mars 2011  
<http://energie.cnrs.fr/2011/ATELIERS2011.pdf>

3

B. Multon ENS de Rennes



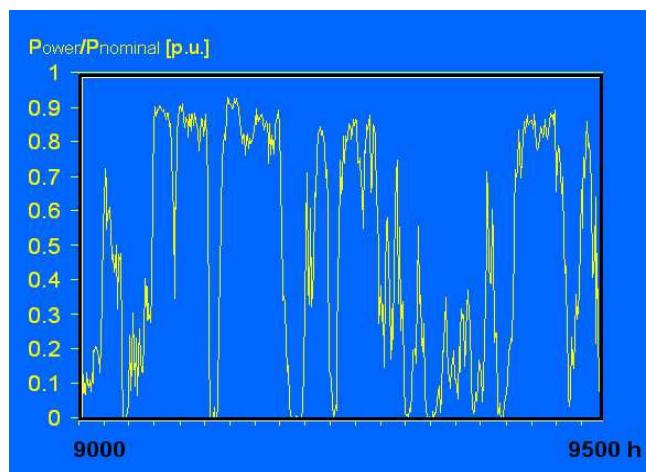
## Stocker au niveau des générateurs ?

Amélioration de la participation aux « *services systèmes* » :

contrôle des puissances active et réactive

Donc meilleure intégration dans les marchés ouverts de l'énergie...

Production d'une ferme éolienne :



Source : Kariniotakis, CENERG

Les premières applications pilotes apparaissent : photovoltaïque, éolien...



## Stocker au niveau du réseau de transport ?

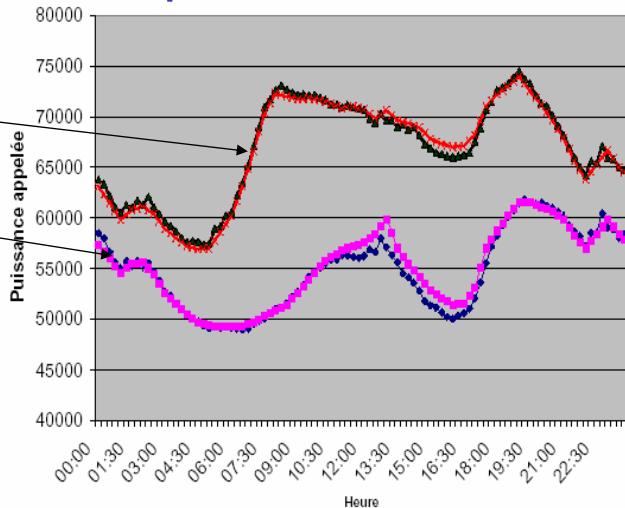
Un degré d'action supplémentaire pour le gestionnaire,  
réduction des risques d'effondrement.

Courbes de production/consommation

un **mardi** de décembre 2001

un **dimanche** de décembre 2001

décembre 2010 :  
pic d'environ 95 GW



Capacité de **stockage** déjà installée (données début des années 2000) :

- Monde : 140 GW (hydraulique gravitaire) sur 5300 GW
- France : 6,3 GW (5 GW opérationnels) sur 120 GW

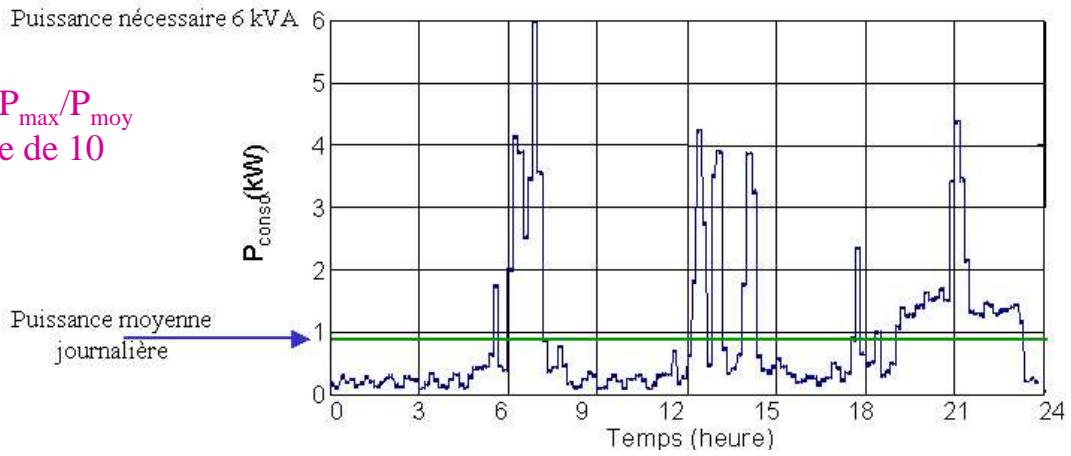
5

B. Multon ENS de Rennes



## Stocker au niveau des consommateurs ?

Rapport  $P_{\max}/P_{\text{moy}}$   
de l'ordre de 10



- **sûreté de fonctionnement,**
- **lissage ou écrêtage de consommation,**
- **meilleur dimensionnement du réseau de distribution,**
- **possibilité d'îlotage permanent si présence de production locale**

Déjà des applications en **secours** (electrochimiques, volants d'inertie, groupes électrogènes)

6

B. Multon ENS de Rennes



## Vision unifiée des caractéristiques des systèmes de stockage

Malgré la grande variété des principes et technologies, nécessité de bien les définir, notamment pour :

- mieux les comparer
- mieux évaluer les différentes solutions
- optimiser leur dimensionnement sur cycle de vie

7

B. Multon ENS de Rennes

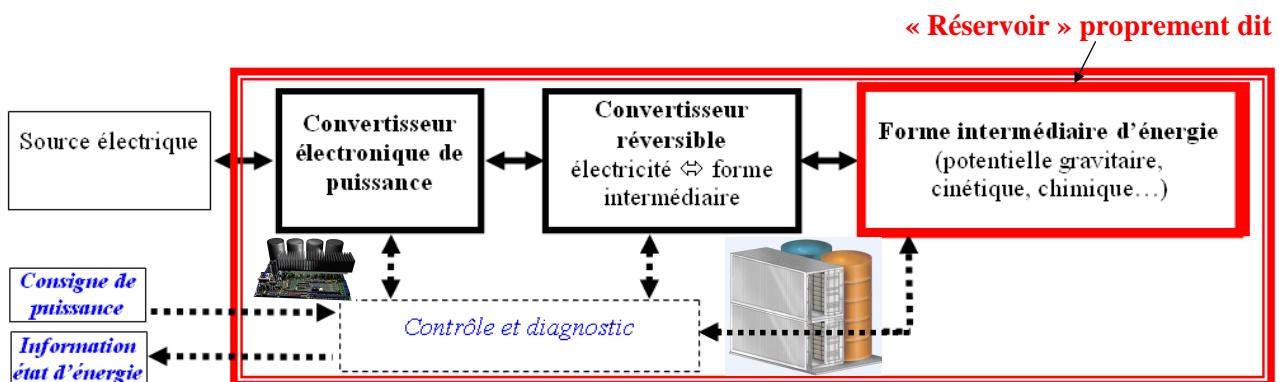


## Le système de stockage d'énergie électrique (SSEE) (ESS : Energy Storage System)

Stockage direct ou indirect ??

Cela a peu d'importance car,  
quel que soit le moyen de stockage, il est nécessaire  
d'utiliser un ou plusieurs convertisseurs d'adaptation.

Synoptique générique d'un SSEE :



8

B. Multon ENS de Rennes



## Capacité énergétique $E_{stoc}$ en J, kWh...

grandeur fortement dimensionnante  
(la « taille » du réservoir d'énergie)

Limites éventuelles en profondeur de décharge

(par exemple une batterie lithium limitée à 80% de profondeur de décharge)

La part réellement exploitable peut varier considérablement en fonction :

- de la rapidité de décharge dans les batteries électrochimiques
- du rendement de décharge

Capacité énergétique exploitable  $E_{util}$  inférieure à la capacité théorique

=> Attention à la définition de la capacité énergétique.



**Puissance maximale  $P_{max}$**  (watts) charge ou décharge  
(dimensionne les convertisseurs de réglage des transferts d'énergie)

Rapport  $\frac{E_{util}}{P_{max}} = \tau$  = « **constante de temps** »

Exemple : système de stockage hydraulique gravitaire

Masse d'eau  
Dénivelée entre les bassins haut et bas

} Capacité de stockage  
 $E = M.g.h$

Puissance des groupes réversibles  
turbines-machines électriques  
Section des canalisations

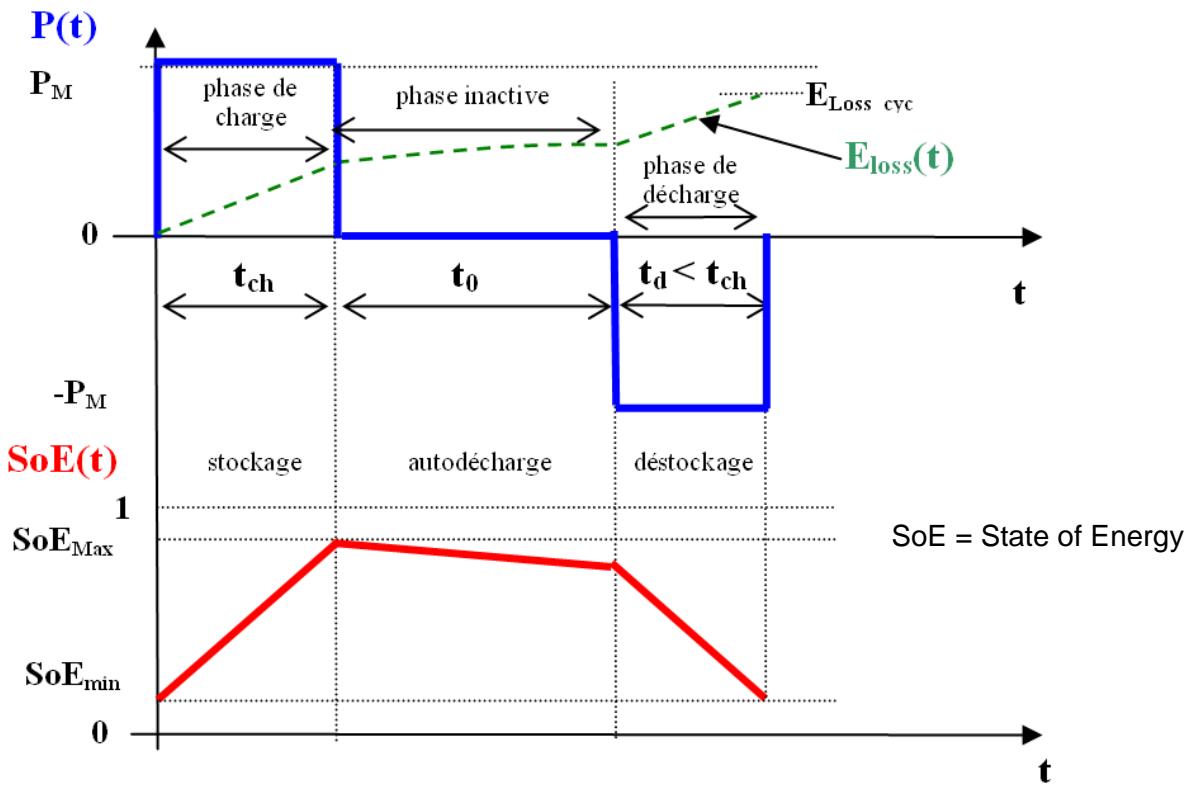
} Puissance maximale

**Découplage Energie / Puissance** constante de temps ajustable



## Rendement sur cycle : énergie restituée sur énergie prélevée

Cycle simplifié charge à P constante, repos, décharge à P constante :



11

B. Multon ENS de Rennes



**Rendement sur cycle**  $\eta_{cycle} = \frac{E_d}{E_{ch}} = \frac{P_M \cdot t_d}{P_M \cdot t_{ch}} = \frac{t_d}{t_{ch}}$

Facteur d'autodécharge :  $\eta_o = \frac{\int P_o(SoE(t)).dt}{P_M \cdot t_{ch}}$

Rendements de charge et de décharge :  $\eta_{ch} = \frac{E_{ch} - E_{loss\_ch}}{E_{ch}}$   $\eta_d = \frac{E_d}{E_d + E_{loss\_d}}$

Rendement total sur cycle :

$$\boxed{\eta_{cycle} = [\eta_{ch} - \eta_o] \eta_d}$$

Définition souvent trop simpliste.

Le rendement doit être défini sur des **cycles réalistes** en rapport avec l'application.

Un système de stockage optimisé pour une faible « constante de temps » aura :

- un meilleur rendement pour des sollicitations rapides
- et éventuellement une assez forte auto-décharge, donc un mauvais rendement sur des cycles avec de longues périodes de repos.

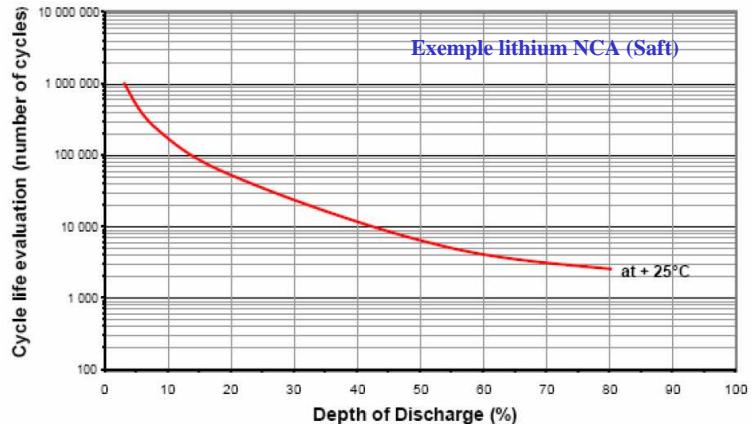


## Nombre maximal de cycles de charge-décharge (cyclabilité) $N_{cycl}$

dû à la fatigue ou à l'usure lors des cycles

Le cyclage constitue généralement une cause de dégradation importante parfois dominante sur le vieillissement calendaire.

Processus de fatigue souvent complexes et cyclabilité souvent mal définie, parfois inconnue.



$N_{cycl}$  fortement lié à l'amplitude des cycles et/ou à l'état de charge moyen.  
Quantification délicate => améliorations toujours en cours



## Coûts :

- d'investissement (part la plus marquante pour l'acheteur)
- de fonctionnement (maintenance, énergie perdue lors des cycles, vieillissement).

Coût d'investissement généralement spécifié :

- en  $\text{€}/\text{kWh}$  pour les accumulateurs à longue constante de temps  
(plutôt dimensionnés en [Energie](#))

ou

- en  $\text{€}/\text{kW}$  pour ceux à faible constante de temps  
(plutôt dimensionnés en [Puissance](#))

Pour pouvoir mieux optimiser les dimensionnement, il faudrait définir le coût d'investissement total comme :  $C_{inv\_tot} = c_W \cdot W_{util} + c_P \cdot P_{max}$   
avec  $c_W$  et  $c_P$  respectivement en  $\text{€}/\text{kWh}$  et  $\text{€}/\text{kW}$



## Coût sur l'ensemble du cycle de vie

du système complet incluant le dispositif de stockage.

Les systèmes de stockage les moins coûteux à l'investissement sont généralement ceux qui se dégradent le plus vite en cyclage et dont le rendement est le plus mauvais.

Exemple : batterie électrochimique lithium 1000 €/kWh  
(hors électronique de puissance)

avec 2500 cycles à 80% de DoD (*pertes non prises en compte*) :

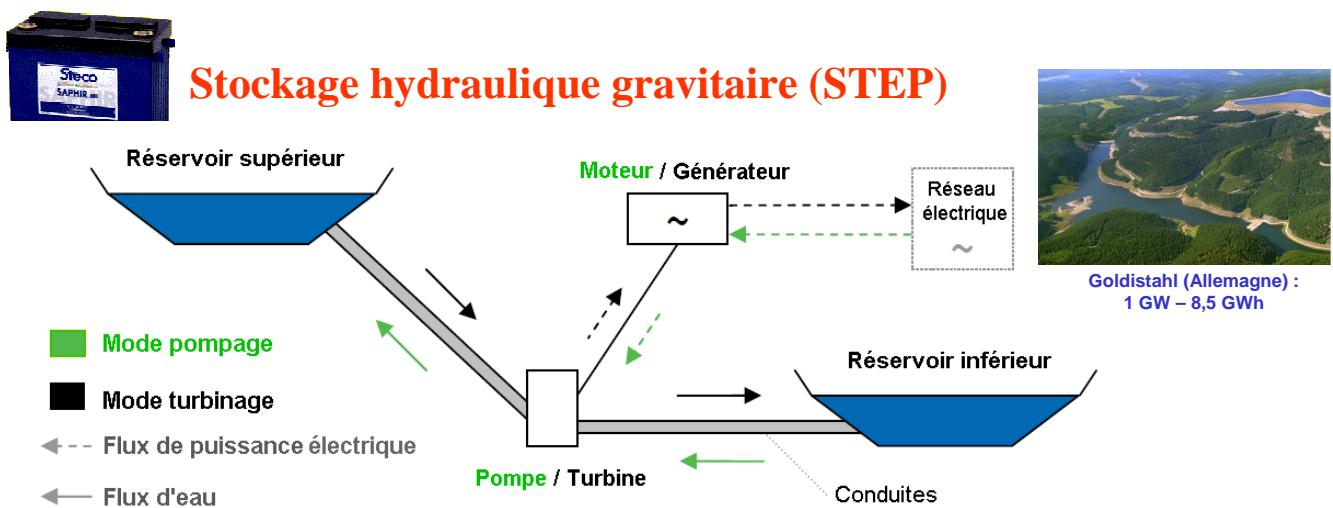
« Coût d'usure » : 0,5 €/kWh (1000 €/(0,8 x 2500 cycles))

ou :

avec 60 000 cycles à 20% de DoD (*surdimensionnement*) :

« Coût d'usure » : 0,08 €/kWh (1000 €/(0,2 x 60 000 cycles))

Dans une logique de développement durable :  
prise en compte du **coût sur cycle de vie**, incluant les dépenses de matières premières, d'énergie et autres coûts environnementaux



Rendement : 65 à 85 % (selon technologie et choix de dimensionnement)

Démarrage : 10 à 15 min

Capacité : 1 à qq 100 GWh

Puissance : qq 10 à plus de 1000 MW

Solution de stockage de masse la plus répandue,  
la moins chère et à la plus longue durée de vie...

Possibilités de rénovation : vitesse variable...

En France 2010 : environ 5 GW opérationnels et 180 GWh de capacité énergétique



## Exemples de plus de 1000 MW

Centrales	Pays	Hauteur de chute d'eau (m)	Puissance (MW)	Année de mise en service
Imaichi	Japon	52,4	1 050	1984
Ludington	États-Unis	98	1 872	1974
Zagorsk	Russie	100	1 200	1988
Vianden	Luxembourg	287	1 141	1959
Racoon	États-Unis	317	1 532	1978
Bath Country	États-Unis	387	2 740	1985
Drakensberg	Afrique du Sud	473	1 080	1981
Helms	États-Unis	495	1 070	1981
Okuy Shino	Japon	539	1 200	1978
Dinorwig	Royaume-Uni	545	1 800	1982
Tamaharo	Japon	559	1 200	1983
Chiota	Italie	1 070	1 200	1980
Piastra Edolo	Italie	1 260	1 016	1981

Depuis les années 1990 :  
Groupes réversibles à vitesse variable  
Cycloconvertisseurs, puis  
onduleurs à GTO

Exemple 1 :  
OKUKIYOTSU\_2 (Japon 1996 )  
H 470 m  
Toshiba  
2 groupes 300 MW  
Onduleur GTO

Exemple 2 :  
Nant de Drance (Suisse 2008-2015)  
H 250 m  
Alstom  
4 groupes 157 MW  
+ vitesse variable +/-10%

Source :

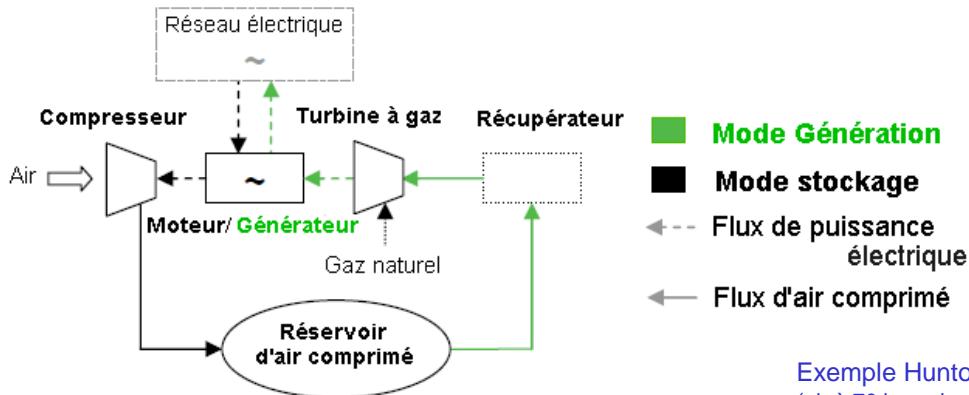
A. MARQUET et al., « Stockage d'électricité dans les systèmes électriques », Technique de l'ingénieur D4030 5- 1998.

17

B. Multon ENS de Rennes



## Air comprimé en caverne hybridé par turbine à gaz (CAES = Compressed Air Energy Storage)



### Rendement médiocre :

pour produire 1 kWh<sub>e</sub> apport de 1,6 kWh<sub>th</sub> de gaz et 0,7 kWh<sub>e</sub> (compresseur au stockage)

Rendement global : 1/2,3 = 43% (incluant la consommation de gaz) (sans air comprimé : rendement TAG = 27%)

12 kWh/m<sup>3</sup> de caverne à 100 bars

Rendement : 50 % (avec apport de Gaz...)

Démarrage : 5 à 10 mn

Capacité : 0,1 à 10 GWh Puissance : 100 à 1000 MW

Exemple Huntorf (Allemagne 1979 et 2006)  
(air à 70 bars dans 2 cavernes de 310 000 m<sup>3</sup>)

Charge : 60 MW – 12 h maxi

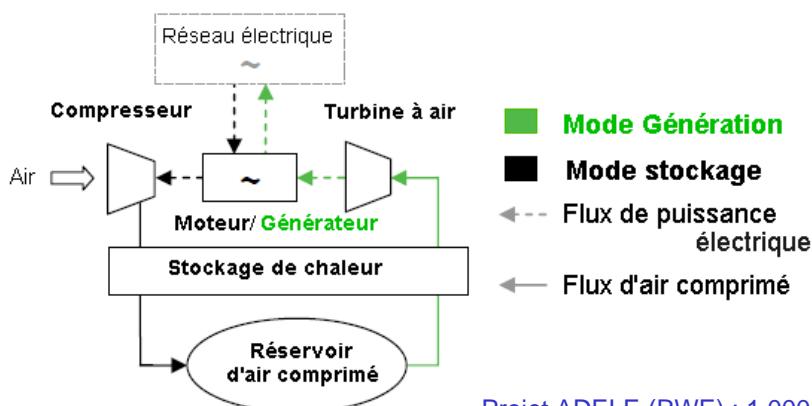
Décharge : 329 MW – 3 h maxi



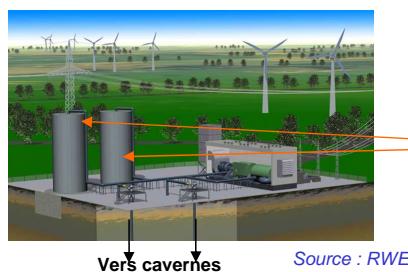


## Air comprimé en caverne adiabatique (ACAES)

Inclut une récupération de la chaleur lors de la compression



Projet ADELE (RWE) : 1 000 MWh – 200 MW  
(1<sup>ère</sup> étape 2013 : 90 MW – 360 MWh)  
Rendement  $\geq 70\%$



Stockage matériaux solides 50 à 620°C  
Source : German Aerospace Center  
B. Multon ENS de Rennes

19

## Accumulateurs électrochimiques

Nombreuses technologies disponibles  
(différents compromis performances – coût  
maturité variable)

Plomb-acide  
Nickel-Cadmium (NiCd)  
Nickel-Métal-Hydrures (NiMH)  
Lithium (nombreuses variantes)  
Sodium-soufre (haute température : 350°C)

...  
Large gamme de solutions avec des capacités énergétiques  
du Wh à quelques MWh

Fin de vie si :

capacité : - 20% voire -30%  
et/ou résistance interne : x 2 ou x 4...



Les valeurs d'énergie massique les plus élevées : 30 à 200 Wh/kg  
mais une faible tenue en cyclage (qq 100 à qq 1000 cycles profonds)

20

B. Multon ENS de Rennes



## Modélisation

Des **phénomènes complexes**, d'où une modélisation complexe et peu fiable,

Dans laquelle le **vieillissement** intervient,  
et les effets de la température peuvent être importants

Les **schémas équivalents** électriques doivent mettre en œuvre des éléments **non linéaires**,  
notamment pour prendre en compte les phénomènes rapides

Dans le secteur des énergies renouvelables, les **accumulateurs au plomb** sont quasiment seuls : avantage de prix, inconvénient de masse moindre.

21

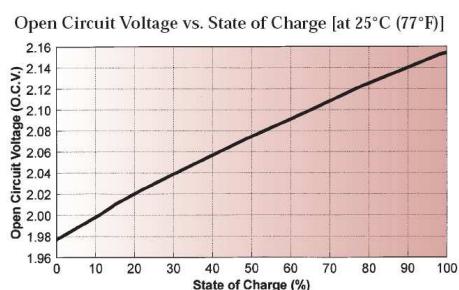
B. Multon ENS de Rennes



## Technologies plomb - acide

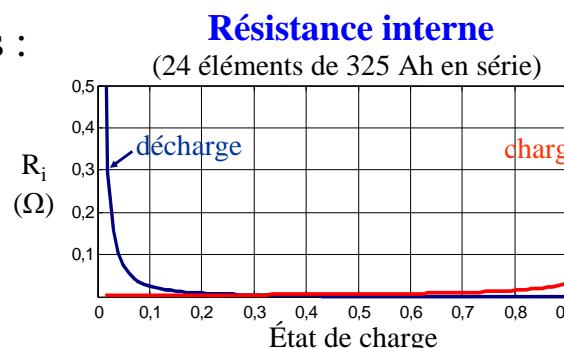
Caractéristiques électriques :  
2 V par élément

fem fonction de l'état de charge



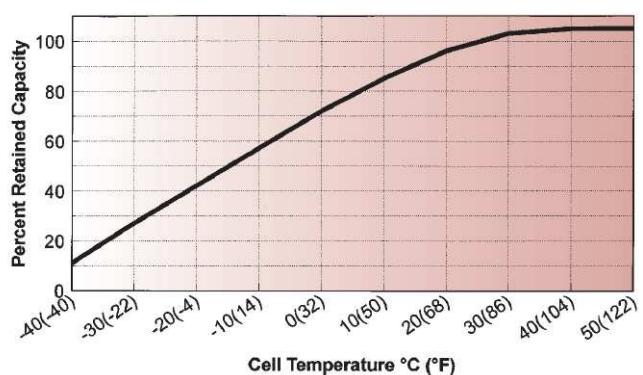
fem fonction de T°C

$$\approx +1,8 \text{ mV/}^\circ\text{C}$$



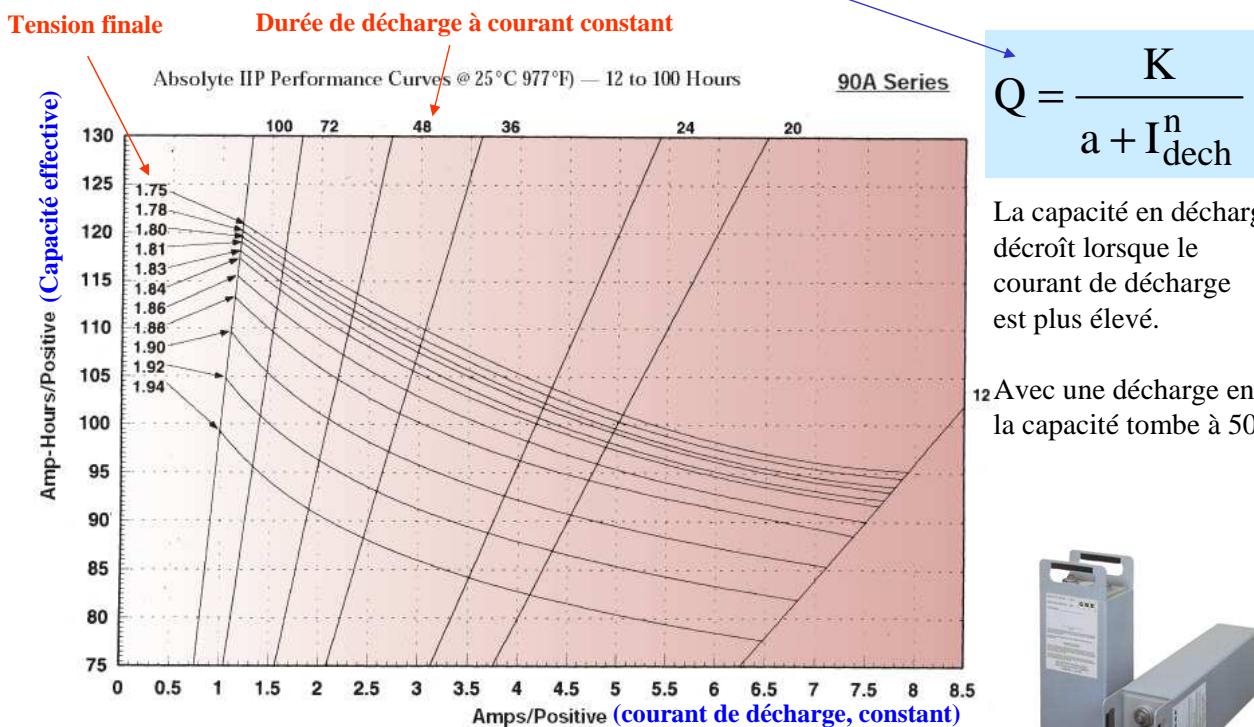
Perte de capacité aux basses températures

Absolute IIP Performance Characteristics  
Capacity Retention vs. Temperature





## Influence du courant de décharge sur la valeur de la capacité (rendement coulombien, loi de Peukert)

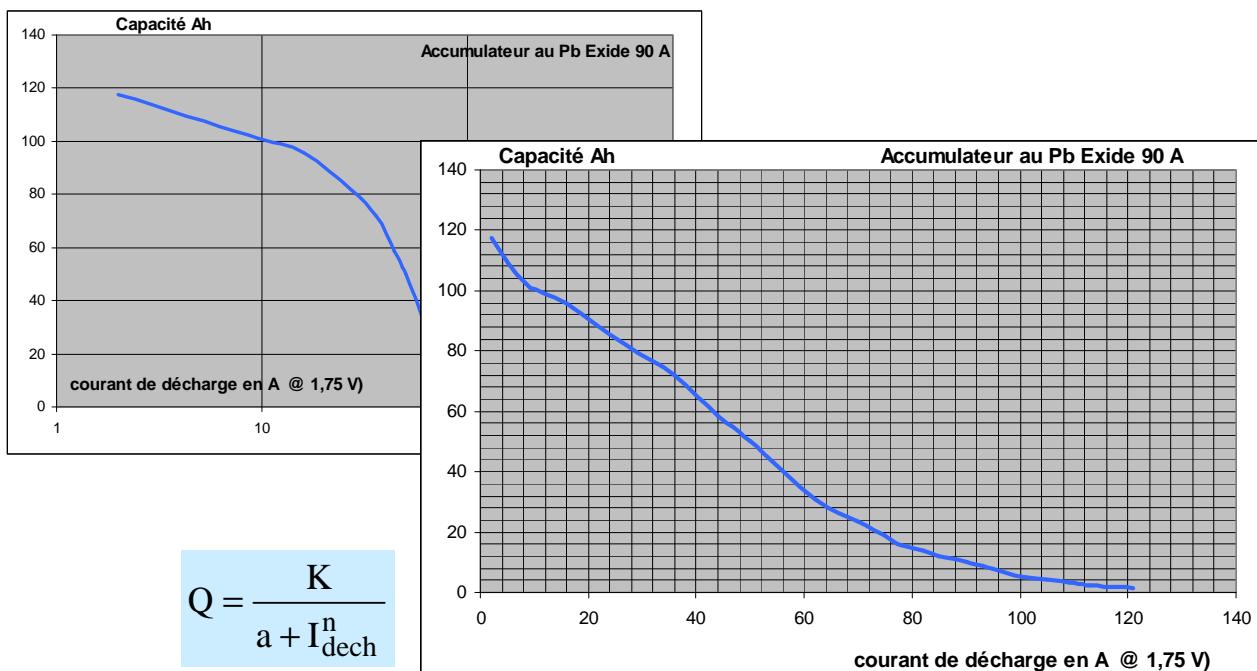


23 Source: batteries Exide <http://networkpower.exide.com/>



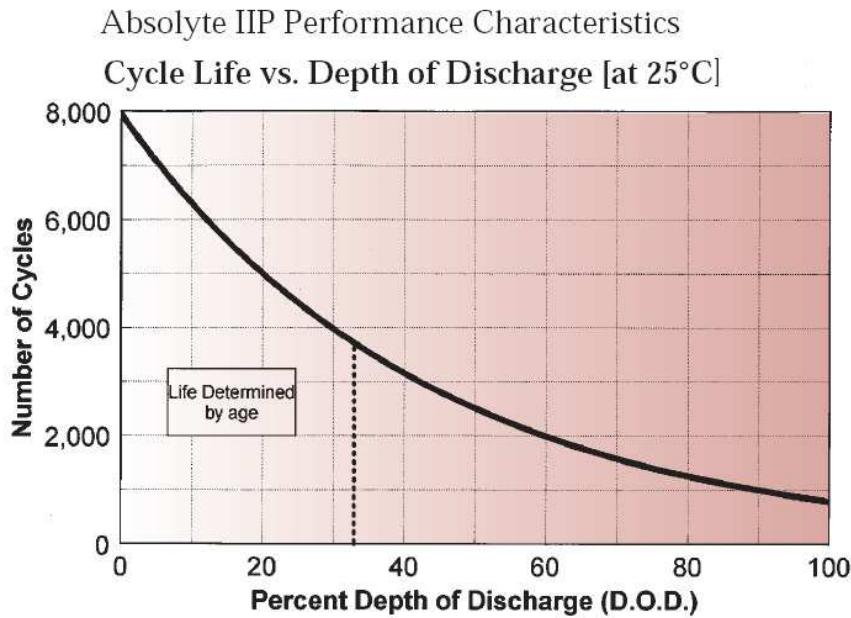
## Variation de la capacité en fonction du courant de décharge (constant)

Accumulateur Exide Absolyte IIP 90 A





## Nombre de cycles limité par la profondeur de décharge



Interviennent également : la puissance de décharge, la température...

En dehors des VRLA, maintenance nécessaire (ajout d'eau pure)

25 Source: batteries Exide <http://networkpower.exide.com/>

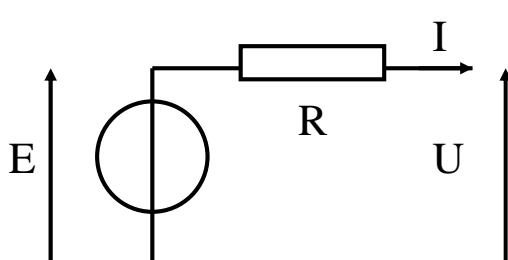
B. Multon ENS de Rennes



## Limite de puissance et rendement en décharge

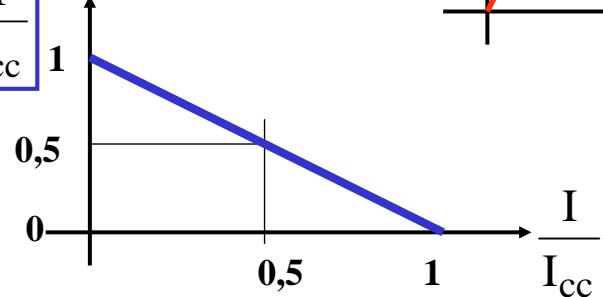
Modèle assez générique :

source de tension avec résistance interne, énergie initiale :  $E \cdot Q$



$$P_u = E \cdot I - R \cdot I^2 = \frac{E^2}{R} \left[ \frac{I}{I_{cc}} - \left( \frac{I}{I_{cc}} \right)^2 \right]$$

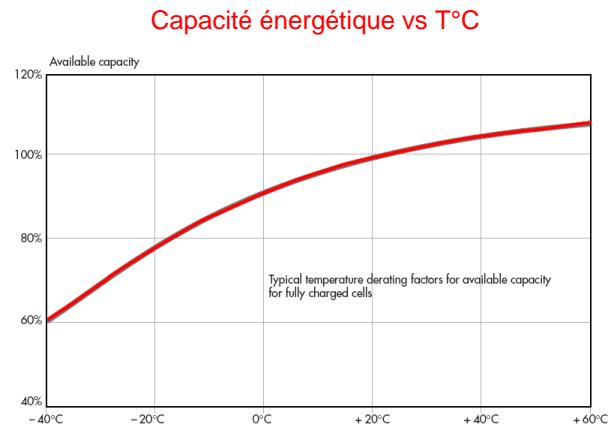
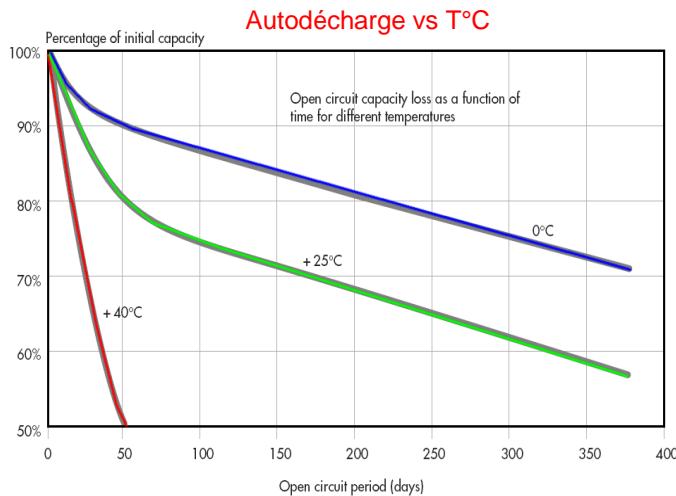
$$\eta = 1 - \frac{I}{I_{cc}}$$





## Technologie NiCd

Force électromotrice :  
1,2 V par élément



Saft : batteries Sunica Plus NiCd pour applications EnR

Typical capacity derating factors versus temperature

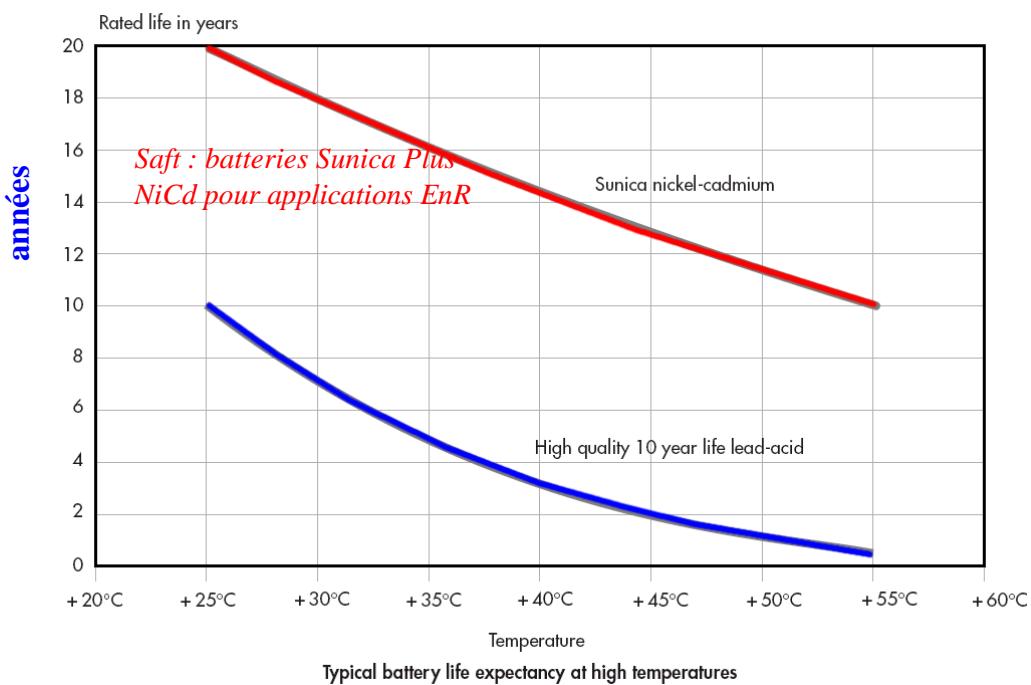
27

B. Multon ENS de Rennes



## NiCd

Durée de vie vs T°C (environ 1 cycle par jour) comparaison avec Pb acide



Saft : batteries Sunica Plus NiCd pour applications EnR

Typical battery life expectancy at high temperatures

28

B. Multon ENS de Rennes



## Technologies Lithium : une grande variété

### Classification

- selon les **cathodes** (« positives ») :

LCO :  $\text{LiCoO}_2$

NCA :  $\text{Li}(\text{NiCoAl})\text{O}_2$ ,

NMC :  $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ ,

LFP :  $\text{LiFePO}_4$ ,

LMO :  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  ou  $\text{LiNi}_{1/2}\text{Mn}_{3/2}\text{O}_4$

LMP : lithium metal polymère

- et les **anodes** (« négatives ») de deux types :

carbone amorphe ou graphite

( $\text{LiC}_6$ , notées LiC)

titanates (LTO) :

cathode	anode	tension (V)	Wh/kg cellule	Wh/kg pack
<b>LCO</b>	<b>LiC<sub>6</sub></b>	3,7	156	109
<b>LMO</b>	<b>LiC<sub>6</sub></b>	3,8	136	96
<b>NCA</b>	<b>LiC<sub>6</sub></b>	3,6	176	116
<b>NMC</b>	<b>LiC<sub>6</sub></b>	3,5	160	112
<b>LFP</b>	<b>LiC<sub>6</sub></b>	3,3	139	97
<b>LCO</b>	<b>LTO</b>	2,5	81	54
<b>LMO</b>	<b>LTO</b>	2,6	75	50
<b>NCA</b>	<b>LTO</b>	2,3	83	55
<b>NMC</b>	<b>LTO</b>	2,3	79	53
<b>LFP</b>	<b>LTO</b>	2,1	68	45

Source : EDF R&D S. Lascaud, 2009

**Technologie LMP** : à part, entièrement solide, pas de risque d’explosion,

Densité d’énergie 100 Wh/kg (en pack),

température de fonctionnement optimale 60 à 80°C peu de fabricants

(Batscap, batterie Bluecar : pack 30 kWh et 45 kW-30 s)

Besoin en matériau : 100 à 400 grammes de lithium métal sont requis par kWh

29

B. Multon ENS de Rennes

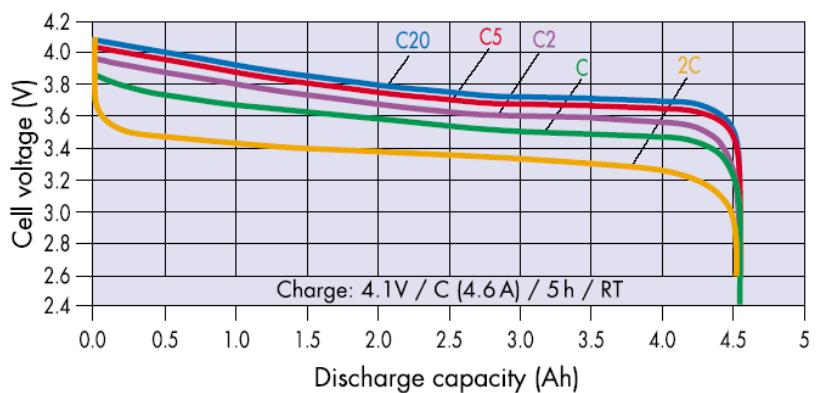


## Technologie électrochimique Lithium-Ion

### Electrical characteristics

MP 174865	
Nominal voltage (V)	3.6
Typical capacity at C/2 rate @ 4.1 V, + 20°C (Ah)	4.6
Mechanical characteristics	
Thickness max (mm)	18.5
Width max (mm)	48
Height max (mm)	65
Weight max (g)	125
Volume (cm <sup>3</sup> )	47.5
Operating temperature	
Charge*	0°C to +50°C
Discharge	-40°C to +60°C

### MP 174865 - Discharge vs current



130 Wh/kg en 1h

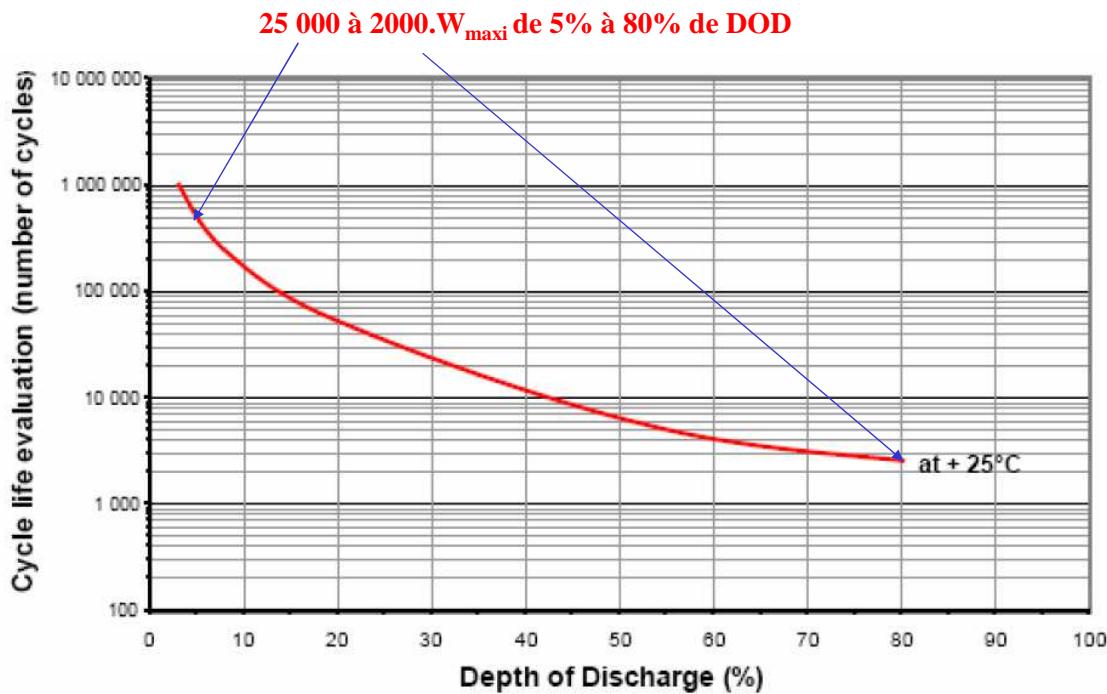
Doc. Saft

30

B. Multon ENS de Rennes



## Vieillissement en cyclage technologie Lithium-Ion NCA



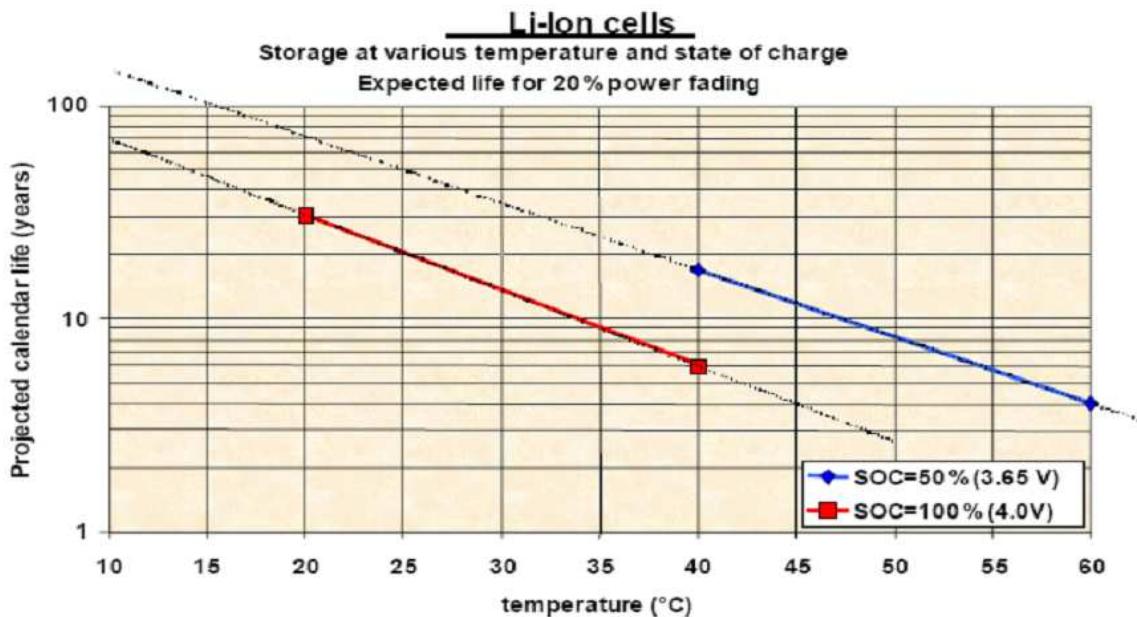
Source : Saft

31

B. Multon ENS de Rennes



## Vieillissement calendaire lithium-Ion NCA SAFT: effets de l'état de charge moyen et de la température



Source : Saft 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference 2010

32

B. Multon ENS de Rennes



## Batteries Lithium-Fer-Phosphate grande capacité

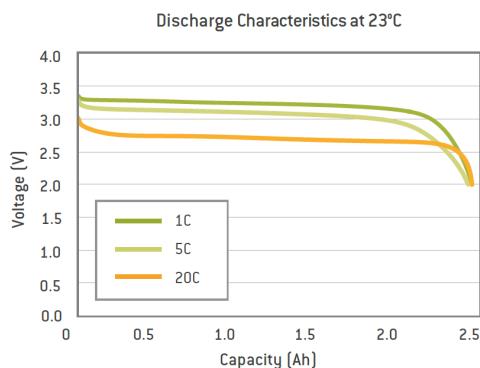
A123

500 kWh – 2 MW – 960 V – 90% – environ 10 000 cycles

Nanophosphate™ cells



2,5 Ah

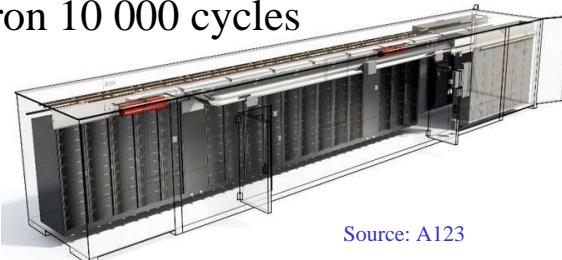


Assemblées en Modules

6 modules par tiroir

8 tiroir par rack

18 racks



Source: A123



12 MW – 3 MWh (AES) Los Andes Chili

Fin 2011 : déjà plus de 35 MW fournis à AES

33

B. Multon ENS de Rennes



## Technologie électrochimique Sodium Soufre (NaS)

300°C

Rendement charge/décharge : 75 %

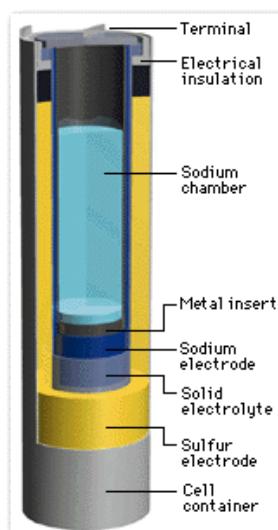
Vie : 15 ans

2500 cycles à 100% DOD

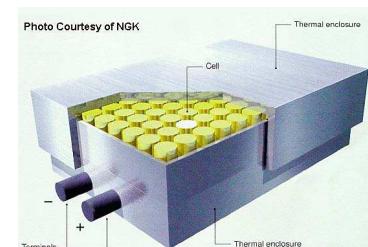
4500 cycles à 80% DOD

Source: NGK

<http://www.ngk.co.jp/>



Élément : 2 V  
1,12 kWh



Bloc : 384 éléments série/parallèle  
64 ou 128 V  
50 kW – 360 ou 430 kWh  
Pertes de chauffage : 3,4 kW  
Masse : 3500 kg

Modèles :

PS (peak shaving)

50 kW - 430 kWh

PQ (power quality)

50 kW permanents 360 kWh

150 ou 250 kW crêtes (30 s par heure)



Charleston American Electric Power (AEP),  
<http://www.technologyreview.com/>

Ensemble 2 MW – 12 MWh (40 modules)  
L : 10 m (172 tonnes)  
(22 m avec transfo et connexion au réseau)  
H : 4.7 m  
W : 3.6 m

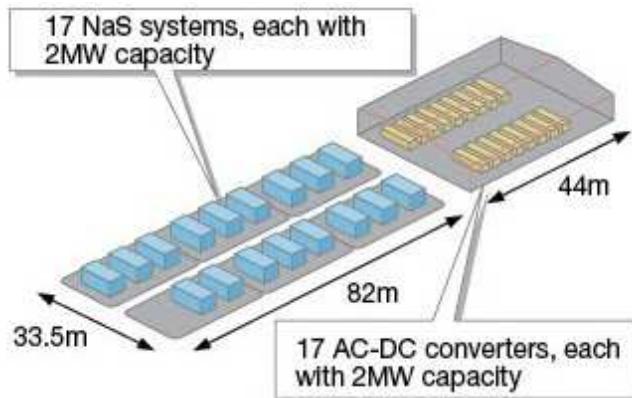
34

B. Multon ENS de Rennes



## Application dans une ferme éolienne (Futamata Japon 2008)

### Lissage de production



Puissance éolienne : 51 MW

Stockage : 34 MW – 245 MWh (97 M\$ ou 70 M€)

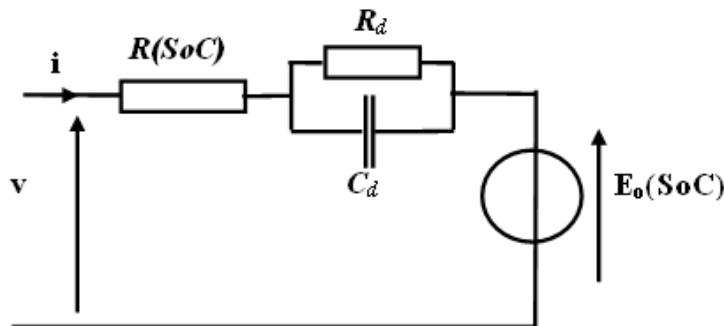
Source: NGK  
<http://www.ngk.co.jp/>

35

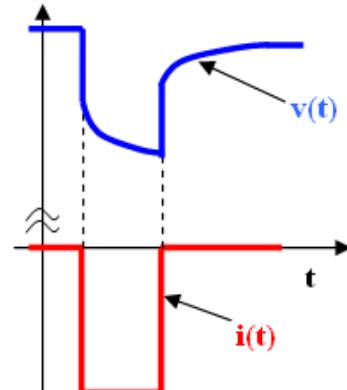
B. Multon ENS de Rennes



## Modélisation électrique simplifiée et générique pour les accumulateurs électrochimiques



Réponse à un échelon de courant de décharge :



$R(\text{SoC})$  subit des lois fortement non-linéaires avec le SoC,  
dépendantes du régime (charge ou décharge)

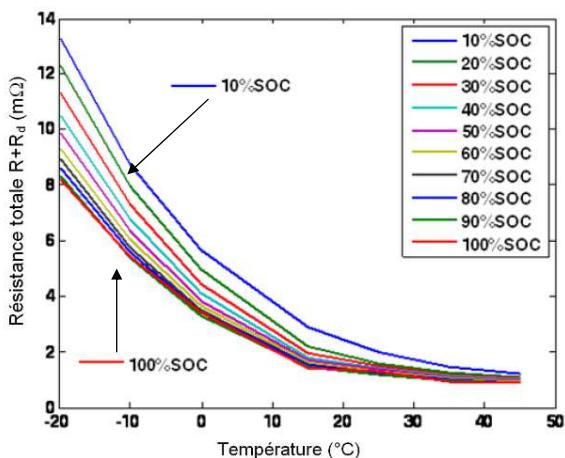
Constante de temps  $R_d \cdot C_d$  indépendante de l'échelle  
de l'ordre de quelques minutes

36

B. Multon ENS de Rennes



## Variations de la résistance interne en fonction de la température et du SoC, cas de la technologie LiFeP

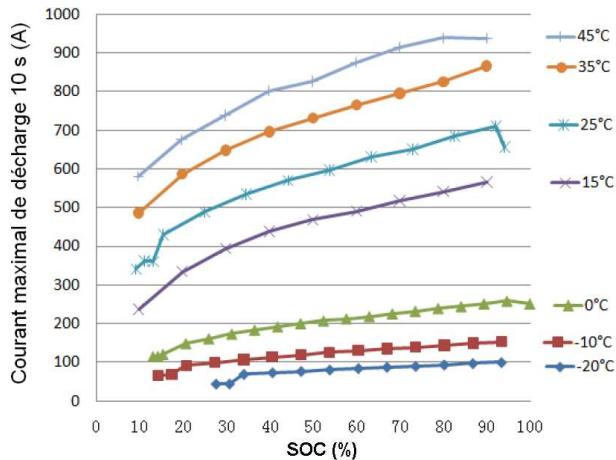


**En général, en décharge, la résistance interne (ohmique) est plus élevée :**  
**- à basse température**  
**- à faible état de charge**

Source : L. LU "LiFePO<sub>4</sub> battery performances testing and analyzing for BMS"  
U.S.-China Workshop, Aug. 2011

37

### Influence sur le courant maximal de décharge 10 s



⇒ Limitation de puissance maximale de décharge à froid et à faible état de charge

B. Multon ENS de Rennes



## Batteries électrochimiques : autres expériences à grande échelle...



### Exemple 1 Plomb-acide

Chino - Californie

Capacité : 40 MWh – 10 MW

Coût :

200 Euros/kWh ou 800 Euros/kW

Source : [www.electricitystorage.org](http://www.electricitystorage.org)

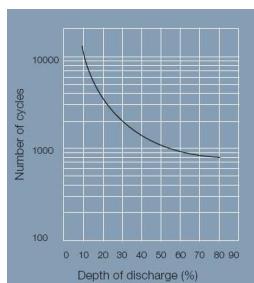
### Exemple 2 Nickel-Cadmium (1000 tonnes)

Fairbanks Alaska (2003)

Capacité nominale 18,4 MWh

- 46 MW durant 5 mn (3,8 MWh)
- 27 MW durant 15 mn (6,7 MWh)

Coûts (ramenés à l'énergie maxi ou à la puissance maxi) :  
1000 Euros/kWh ou 600 Euros/kW



Durée de vie escomptée : 25 ans

Sources : ABB et Saft

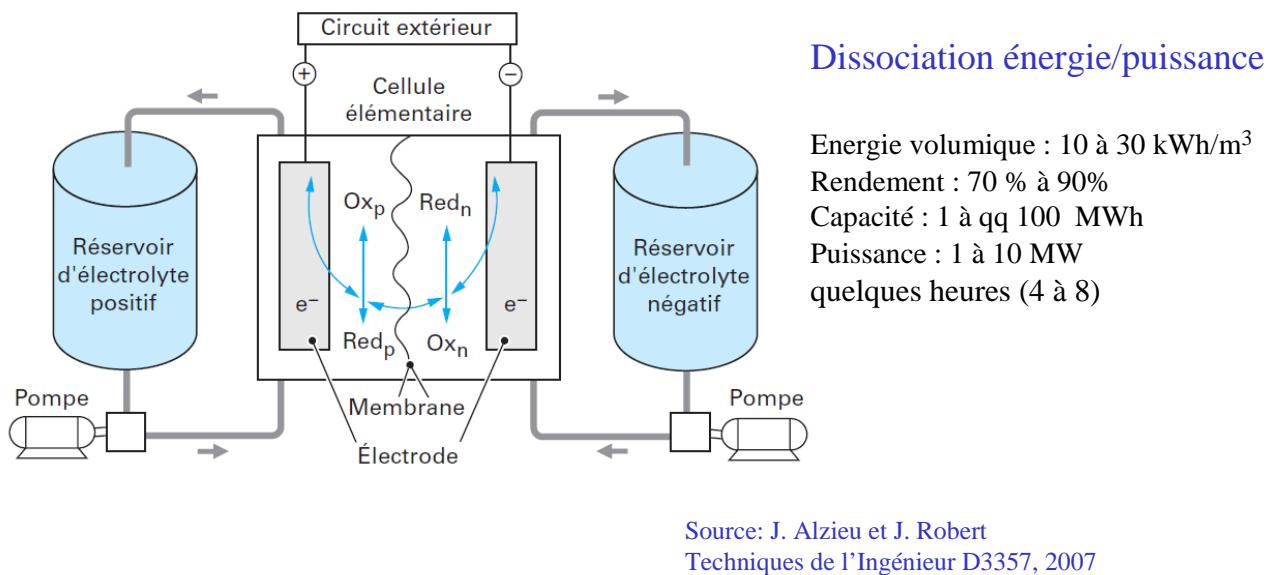
38

B. Multon ENS de Rennes

# Batteries à circulation (Redox flow batteries)

composés chimiques, de stockage de l'énergie, liquides en solution dans l'électrolyte.

Technologies : Vanadium Redox flow Battery (VRB), (électrolyte acide sulfurique)  
 Polysulfide Bromide battery (PSB) (polybromure, polysulfure)  
 Sodium-Brome (NaBr)

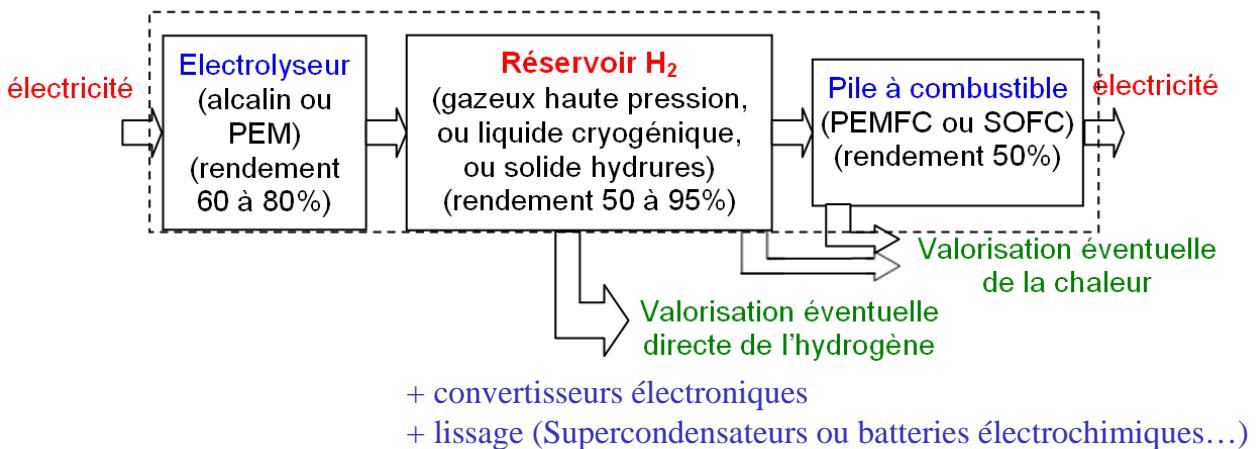


39

B. Multon ENS de Rennes



## Stockage via l'hydrogène

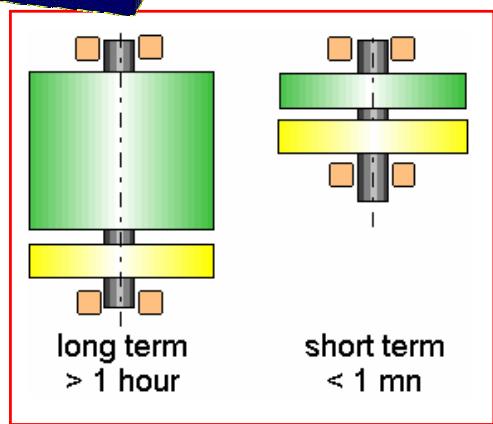


Sans valorisation de l'hydrogène et/ou de la chaleur associée aux pertes de conversion,  
 le rendement sur cycle est trop faible (20 à 40%)  
 et la durée de vie de composants trop limitées (qq 1000 h)  
 pour envisager des coûts compétitifs.

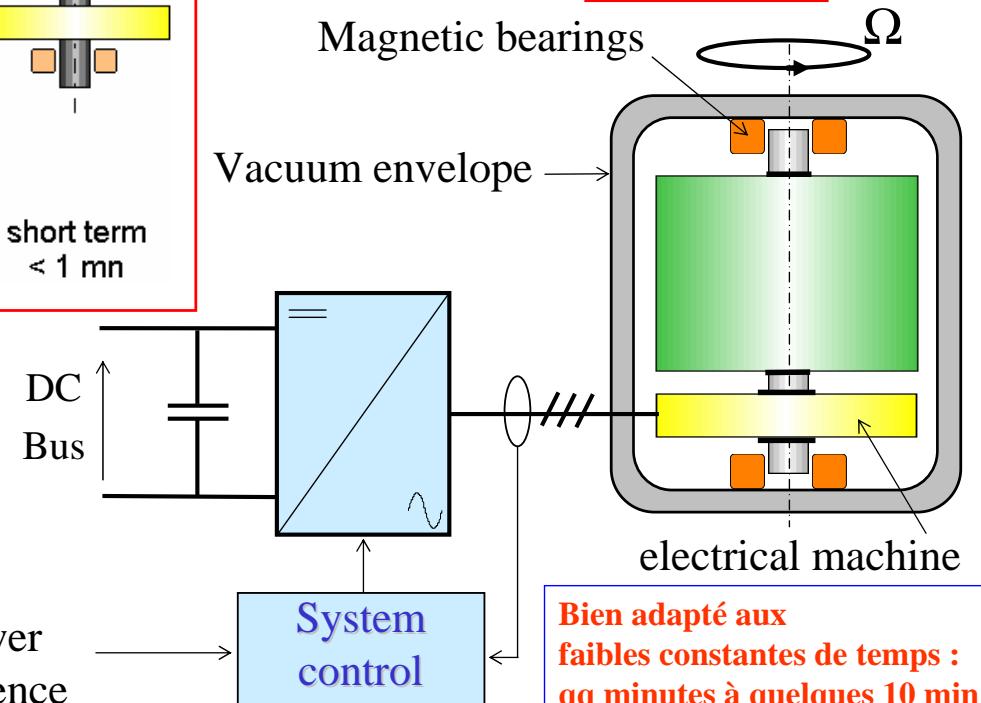
Il semble préférable de valoriser l'hydrogène directement  
 plutôt que de vouloir en refaire de l'électricité...



## Stockage à volant d'inertie (flywheel energy storage)



$$W = \frac{1}{2} J \cdot \Omega^2$$



41

B. Multon ENS de Rennes



## Volants d'inertie : grandes installations

Stephentown (NY) : installation de stabilisation de fréquence (réserve)

Beacon Power : 20 MW (200 unités de 100 kW – 25 kWh) – juillet 2011



Volant fibre carbone 1 tonne  
8000 – 16 000 tr/min



Source: [www.beaconpower.com](http://www.beaconpower.com)





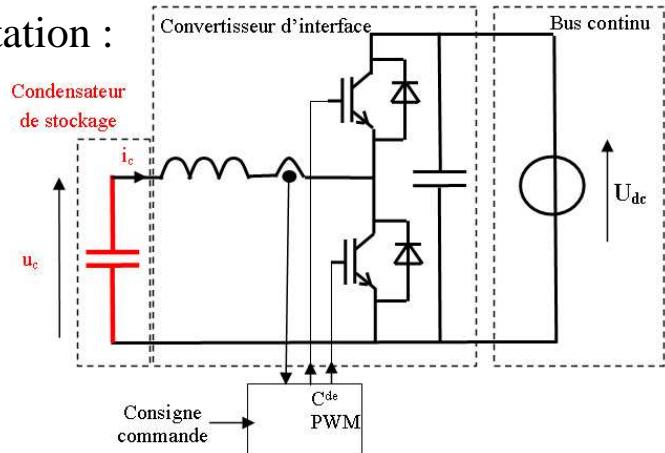
## Super-condensateurs

La tension varie avec l'état énergétique     $W_c = \frac{1}{2} C U_c^2$



Doc. Maxwell

nécessité d'un convertisseur d'adaptation :



Pour une exploitation de 90% de l'énergie maximale stockée :  
tension mini = 1/3 de  $U_{cmax}$

Alors pour exploiter  $P_{max}$  :

Nécessité d'un **surdimensionnement** en courant d'un facteur 3.

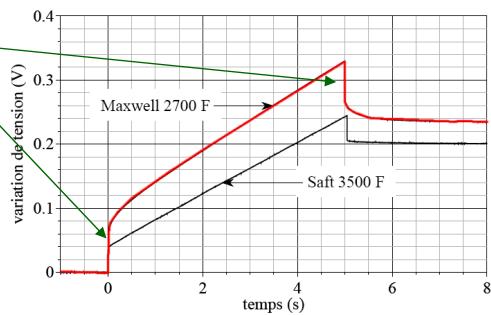
43

B. Multon ENS de Rennes



Exemples de caractéristiques énergétiques de supercondensateurs

$\Delta V < 100 \text{ mV}$  pour  $I_M = 100 \text{ A} \Rightarrow R_s < 1 \text{ m}\Omega$



Réponses de deux composants de puissance à un crénau de courant (100 A, 5 s)

### élément PC2500

capacité	: 2500 F
résistance DC	: 1 mΩ
courant	: 625 A
énergie spécifique	: 3,2 Wh/kg
puissance spécifique	: 2,2 kW/kg
masse	: 0,725 kg
volume	: 0,61
dimensions (mm)	: 61,5 * 61,5 * 161

Source: HDR S. RAEL,  
GREEN 2005

44

B. Multon ENS de Rennes

## Durée de vie fonction de la température et de la tension:

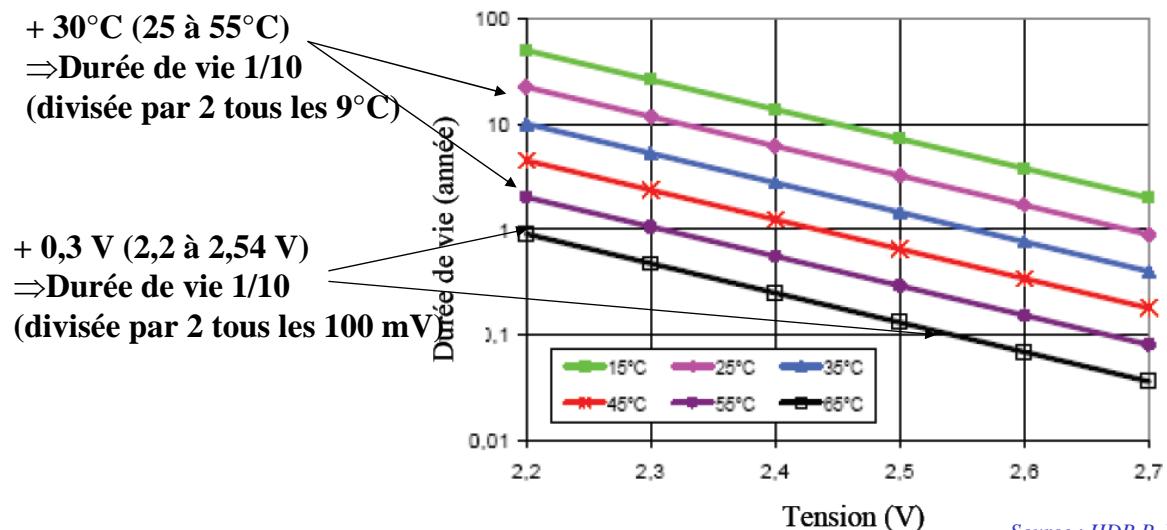
Fin de vie si :

ESR : x 2

capacité : 80%

$$t_d(T, V) = A \cdot \exp \left[ \frac{E_a}{k \cdot T} + B \cdot V \right]$$

### Exemple technologie Ultracaps EPCOS



Source : HDR P. Venet 2007

B. Multon ENS de Rennes

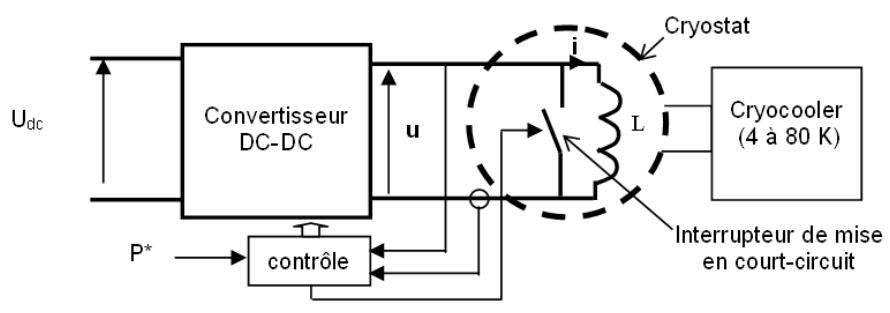
45



**Inductances supraconductrices :**  
(SMES Superconductor Magnetic Energy Storage)  
adaptées à des charges/décharges très rapides (quelques secondes)



Le courant varie avec l'état énergétique :  $E_L = \frac{1}{2} L \cdot I^2$



ACCEL Instruments GmbH [www.accel.de](http://www.accel.de)

2 MJ (0,5 kWh) – 200 kW (t = 10 s)

Supra LTC NbTi – 4,5 K

Applications actuelles : surtout destinées à l'alimentation  
des lanceurs électromagnétiques, tentatives d'applications réseaux



## Bilan comparatif (ordres de grandeurs) 1/2

	Densité énergie/ puissance	« Constante de temps »	Nombre de cycles profonds/ durée de vie	Coût d'investissement	Rendement sur cycle	Degré de maturité *
Hydraulique gravitaire	(réservoir) 270 Wh/m <sup>3</sup> /(100 m)	1h à 100h	> 50 ans	0,5 à 1,5 €/W	60 à 85%	A
Magnétique supraconducteur	qq Wh/kg	qq s. à qq min	~ 20 ans	1 s : ~ 0,3 €/W 30 s : ~ 6 €/W	90 à 95%	C
Volant inertie	qq Wh/kg	qq 10 s à 1 h	10 <sup>5</sup> à 10 <sup>6</sup> ~ 20 ans	20 s : 50 €/Wh ou 0,25 €/W 15 min : 10 €/Wh ou 2 €/W	90 à 95%	B
Hydro-pneumatique	qq 10 Wh/dm <sup>3</sup>	qq h à qq 10h	?	~ 1 €/W	60 à 75%	C
Air comprimé caverne adiabatique	(caverne) 10 Wh/dm <sup>3</sup> (200 bars)	1h à qq 10 h	?	0,6 à 1,2 €/W	~ 70%	D+
Thermodynamique haute temp.	(réservoirs) ~ 250 Wh/dm <sup>3</sup>	qq 10 h	?	~ 0,5 €/W ?	~ 70%	D-

Source: B. Multon et al., « Systèmes de stockage d'énergie électrique », Techniques de l'Ingénieur BE8100 2013

47

B. Multon ENS de Rennes



## Bilan comparatif (ordres de grandeurs) 2/2

	Densité énergie/ puissance	« Constante de temps »	Nombre de cycles profonds/ durée de vie	Coût d'investissement	Rendement sur cycle	Degré de maturité *
Electrochimique Plomb-acide	20 à 30 Wh/kg	10 min à qq 10 h	500 à 4000 ou 7 à 15 ans	0,2 €/Wh + 0,8 €/W	~ 70%	A
Electrochimique Nickel	40 à 60 Wh/kg	qq min à qq h	qq 1000 ou 20 ans	1 €/Wh ou 0,8 €/W	~ 70%	A
Electrochimique Lithium	70 à 140 Wh/kg	qq min à qq h	qq 1000 à 10 000 ou 20 ans	0,5 à 1 €/Wh + 0,8 €/W	~ 80% à 85%	A/B
Electrochimique NaS	70 Wh/kg	qq h	~ 5000 30 ans	0,3 €/Wh + 0,8 €/W	~ 75%	B
Batteries à circulation	(réservoirs) ~ 15 à 40 Wh/kg	qq h	~ 15 ans	0,1 à 0,4 €/Wh + 0,4 €/W	~ 75% à 80%	C
Hydrogène	~ 500 Wh/kg	qq h à qq 10h	5 à 10 ans	?	~ 20 à 40%	C
Supercondensateurs	~ 5 Wh/kg	qq s à qq min	10 <sup>5</sup> à 10 <sup>6</sup> ~ 15 ans	15 €/Wh + 0,7 €/W	~ 85% à 95%	B

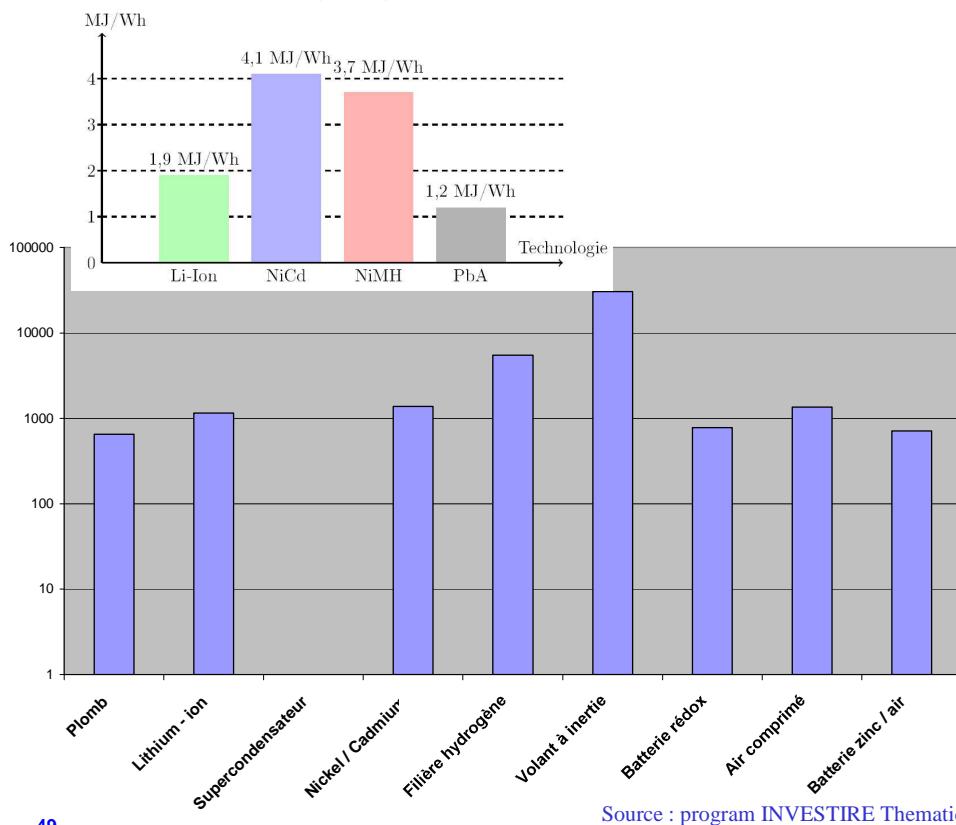
Source: B. Multon et al., « Systèmes de stockage d'énergie électrique », Techniques de l'Ingénieur BE8100 2013

48

B. Multon ENS de Rennes



## Coût énergétique de fabrication : MJ par kWh stockables (énergie grise)



49

Source : program INVESTIRE Thematic Network

B. Multon ENS de Rennes

**1000 MJ/kWh**

=

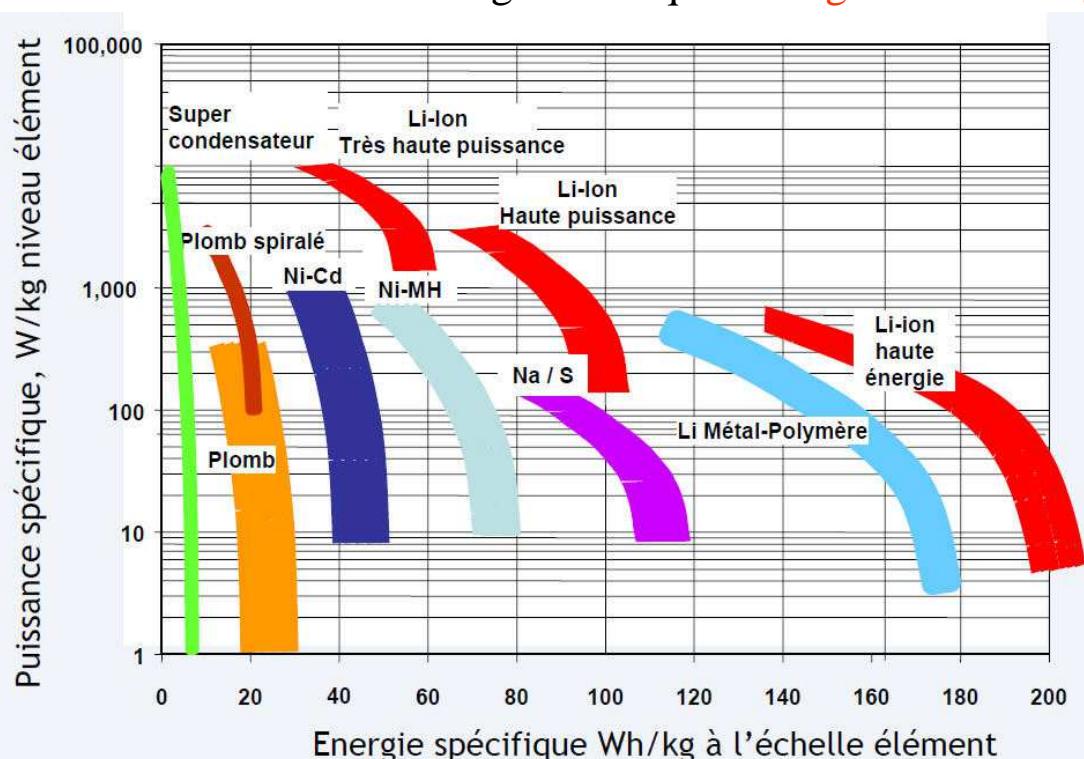
**280 kWh/kWh**

**Le stockage est très coûteux dans une ACV**



## Critères de comparaison

Puissance et énergie massiques : diagramme de Ragone



50

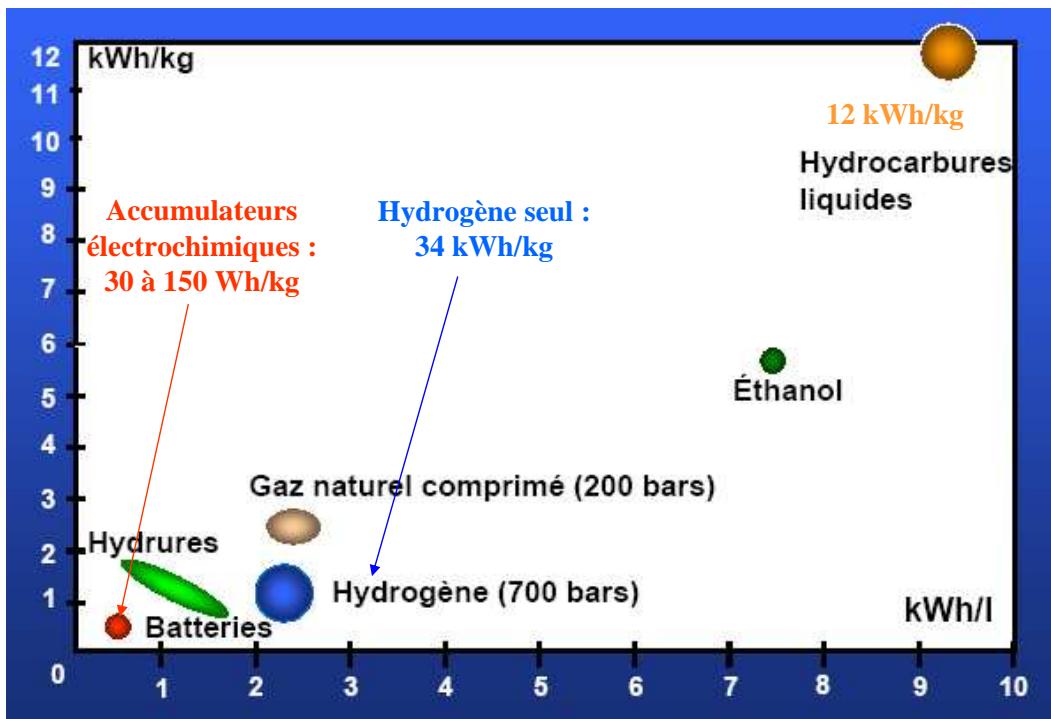
Source : Saft  
A. De Guibert  
Colloque IFP  
janv. 2010

B. Multon ENS de Rennes



## Critères de comparaison :

Energie massique et volumique de différents moyens de stockage

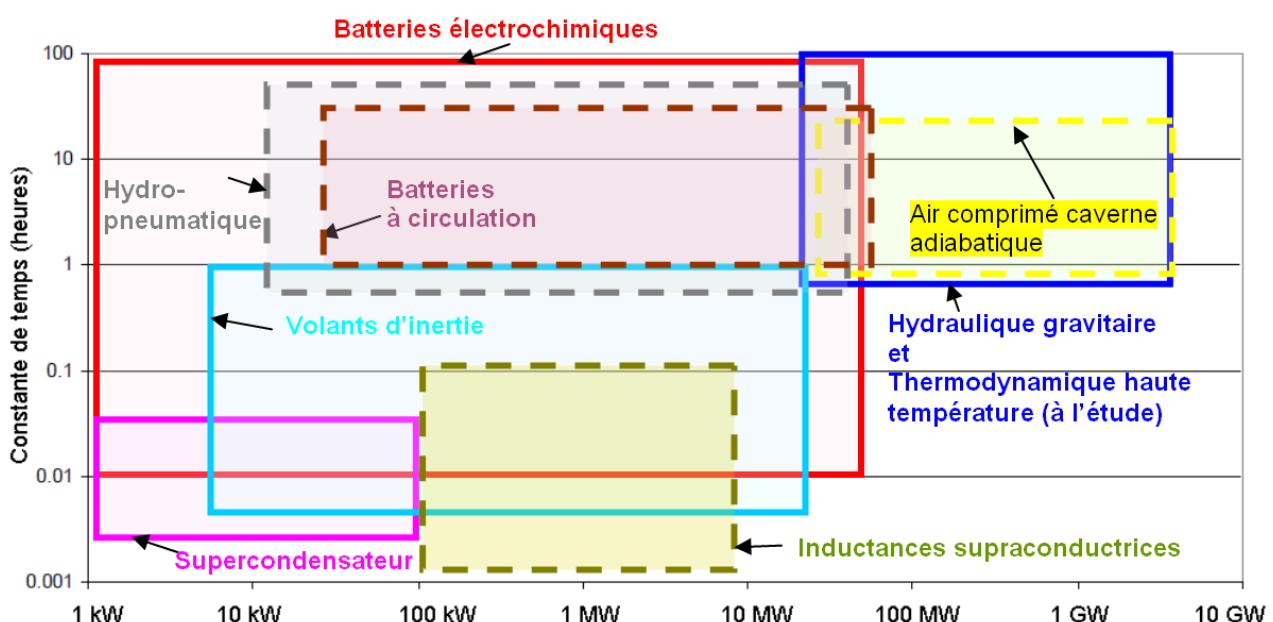


51

Source : A. Rojey IFP, ECRIN 2006

B. Multon ENS de Rennes

## Domaines d'application des technologies, dans le plan « constante de temps » - puissance



en pointillés : les systèmes peu développés ou en cours de développement

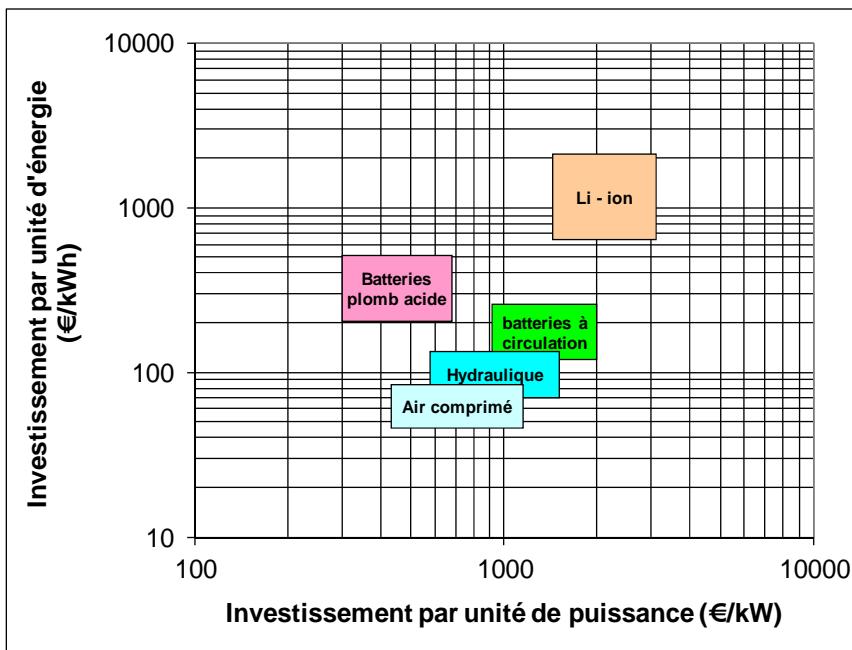
Source: B. Multon et al., « Systèmes de stockage d'énergie électrique », Techniques de l'Ingénieur BE8100 (à paraître)



## Critères de comparaison :

**Coût d'investissement du kWh stocké**

**ou du kW (cas d'un dimensionnement en puissance)**



Source : Jacques RUER, SAIPEM, ECRIN

53

B. Multon ENS de Rennes

**de 40 à 2000 €/kWh**

**Exemple Pb-acide  
avec 150 €/kWh et 1000 cycles  
0,15 €/kWh !**

**de 300 à 3000 €/kW**

**Influence du profil de consommation  
sur le dimensionnement  
d'un système photovoltaïque autonome :**

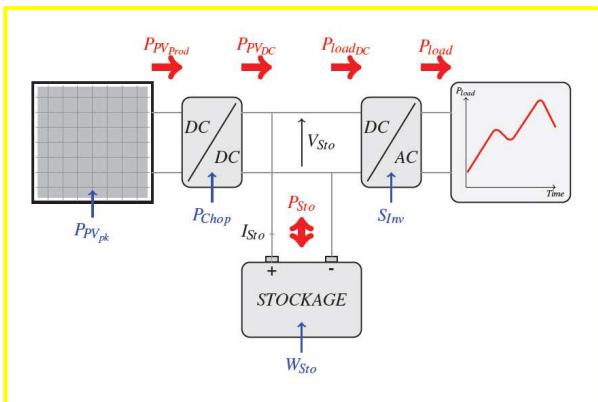
**utilisation d'un critère plus objectif que  
le critère économique :  
l'énergie primaire consommée  
sur l'ensemble du cycle de vie**

54

B. Multon ENS de Rennes

# Optimisation de la gestion d'énergie pour minimiser le coût énergétique global sur cycle de vie

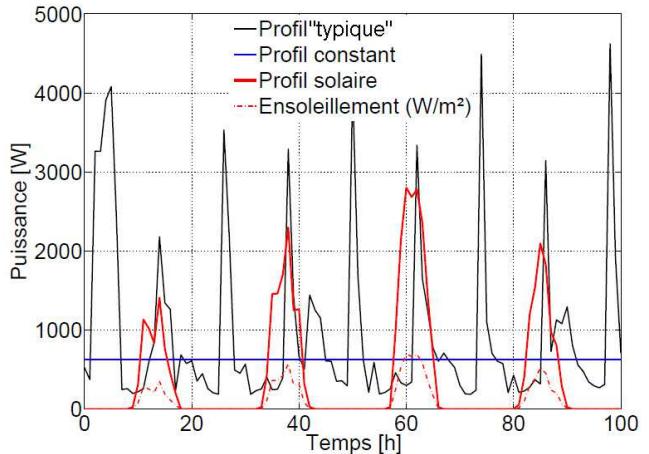
Système autonome photovoltaïque :



Thèse Yaël THIAUX (2010) - SATIE

**Etude de l'impact du profil temporel de consommation sur le coût énergétique global :**

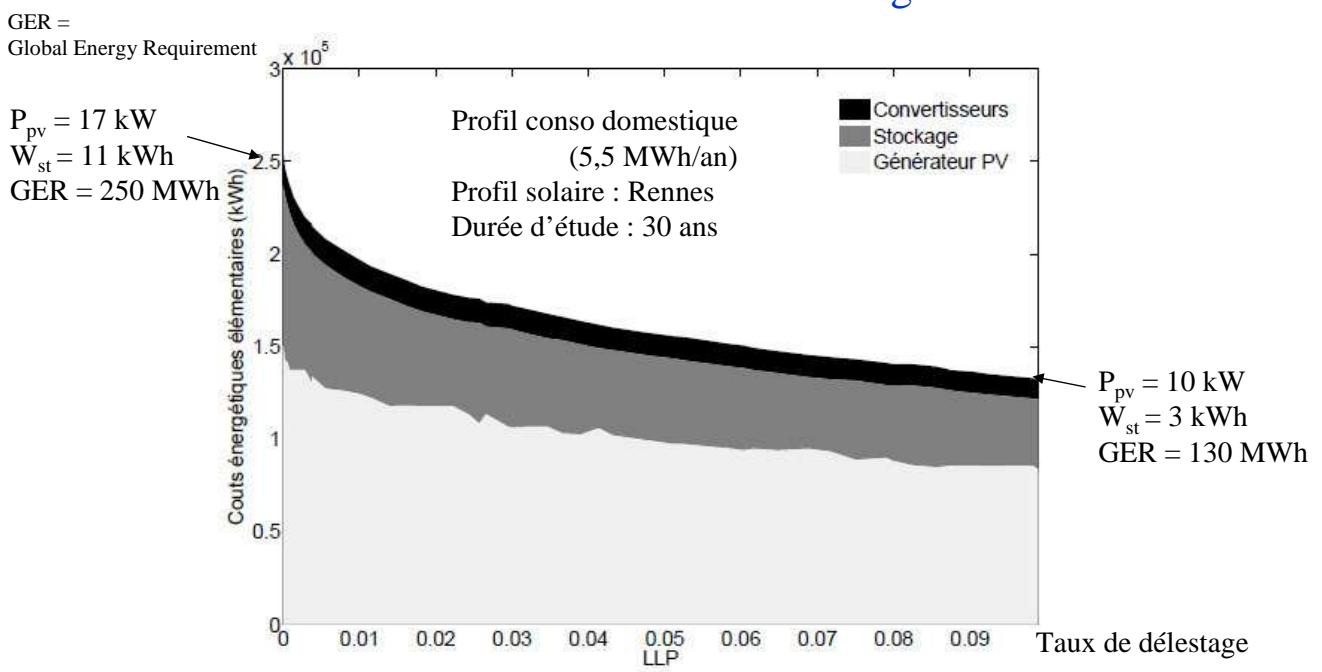
(pour 164 MWh<sub>e</sub> sur 30 ans)



55

B. Multon ENS de Rennes

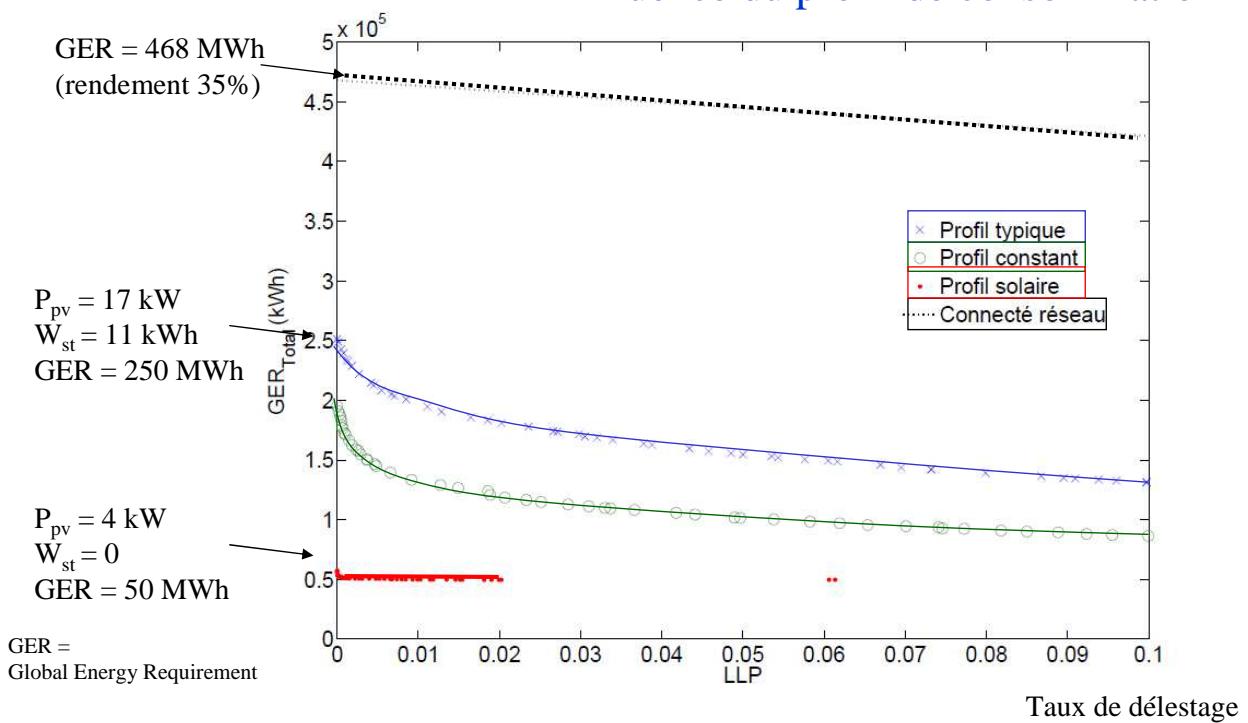
Système photovoltaïque autonome avec batteries et onduleur, influence du délestage de consommation



56

B. Multon ENS de Rennes

## Système photovoltaïque autonome avec batteries, influence du profil de consommation



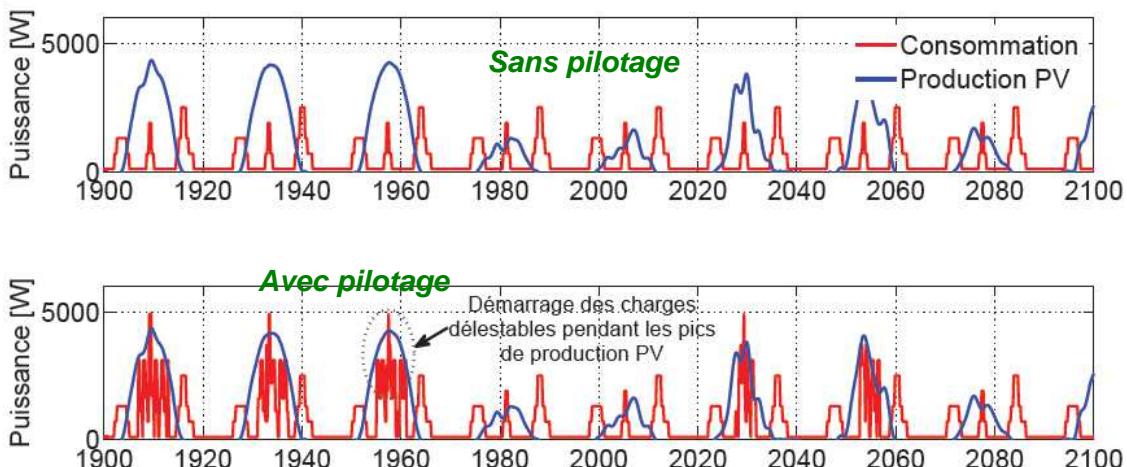
57

B. Multon ENS de Rennes

### Optimisation temps réel de la gestion d'énergie pour minimiser le coût énergétique global sur cycle de vie

#### Système de pilotage des charges « non prioritaires »

Améliore la corrélation du profil de consommation au profil de productible solaire



+ évaluation du potentiel de la technologie lithium-ion

→ Amélioration sensible sur l'ensemble du cycle de vie,

par rapport à la techno Plomb-acide



## Quelques références :

### Stockage d'énergie pour la production décentralisée d'électricité

- B. MULTON, J. AUBRY, P. HAESSIG, H. BEN AHMED, « Systèmes de stockage d'énergie électrique », Techniques de l'Ingénieur, BE8100, 2013.
- A. MARQUET, C. LEVILLAIN, A. DAVRIU, S. LAURENT, P. JAUD, « Stockage d'électricité dans les systèmes électriques », Technique de l'ingénieur D4030 5-1998.
- EUROPEAN COMMISSION, Community Research Report, « Energy storage - A key technology for decentralised power, power quality and clean transport » Report European Communities EUR 19978, 2001.
- ENIRDGnet « D5 :Technical assessment of DG-Technologies and tendencies of technical development », Janvier 2004.
- T. DEVRIES, J. McDOWALL, N. UMBRICH, G. LINHOFER, « Cold Storage : Battery energy storage system for Golden Valley Electric Association » ABB Revue 1-2004, pp38-43.
- B. MULTON, J. RUER, « Stocker l'électricité :oui, c'est indispensable et c'est possible. Pourquoi, où, comment ? », Publication ECRIN en contribution au débat national sur l'énergie, avril 2003, téléchargeable : <http://www.ecrin.asso.fr/energies/>
- B. MULTON, G. ROBIN, E. ERAMBERT, H. BEN AHMED, « Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires », Colloque Energie électrique : besoins, enjeux, technologies et applications, Belfort, 18 juin 2004, pp.64-77.
- C. SAUDEMONT, L. LECLERCQ, B. ROBYNS, G. CIMUCA, M. RADULESCU, « Développement d'un émulateur Temps Réel d'un Système de Génération Eolienne Associé à un Stockage Inertiel d'Energie », Electrotechnique du Futur 2003, Gif Sur Yvette, déc. 2003.
- F. ABOU CHACRA, P. BASTARD, G.FLEURY, R. CLAVREUL, « Optimisation MultiObjectifs du Stockage d'Energie dans un Poste Source HTB-HTA », Electrotechnique du Futur 2003, Gif Sur Yvette, déc. 2003.
- G. ROBIN, O. GERGAUD, N. BERNARD, H. BEN AHMED, B. MULTON, « Problématique du stockage d'énergie situé chez le consommateur connecté au réseau », Electrotechnique du Futur 2003, Gif Sur Yvette, déc. 2003.
- N. BERNARD, H. BEN AHMED, B. MULTON, C. KERZREHO, J. DELAMARE, F. FAURE, "Flywheel energy storage systems in hybrid and distributed electricity generation", Congrès PCIM, Nürnberg, may 2003.

#### Thèses ENS

C. KERZREHO, « Conception et optimisation d'une batterie électromécanique à ensemble volant d'inertie-convertisseur électromécanique intégré », thèse LMT ENS de Cachan, Antenne de Bretagne, 8 janvier 2002,

téléchargeable : [http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Page\\_SystemesEM\\_HautesPerf/These\\_kerzreho\\_jan02.pdf](http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Page_SystemesEM_HautesPerf/These_kerzreho_jan02.pdf)

N. BERNARD, « Conception, dimensionnement et commande d'un moteur-générateur de type synchrone à excitation homopolaire, à bobinages dans l'entrefer, pour accumulateur électromécanique d'énergie », thèse LESIR ENS de Cachan, Antenne de Bretagne, 17 décembre 2001,

téléchargeable : [http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Page\\_SystemesEM\\_HautesPerf/These\\_Nicolas\\_Bernard\\_dec01.pdf](http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/Page_SystemesEM_HautesPerf/These_Nicolas_Bernard_dec01.pdf)

O. GERGAUD, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », thèse ENS Cachan, 9 décembre 2002,

téléchargeable : [http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/page304/these\\_complete\\_O.GERGAUD.pdf](http://arnica.bretagne.ens-cachan.fr/pdf/mecatronique/page304/these_complete_O.GERGAUD.pdf)

© Ecole Normale Supérieure de Rennes, xxx 2014  
ISBN : xxxxxxxxxxxx