



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

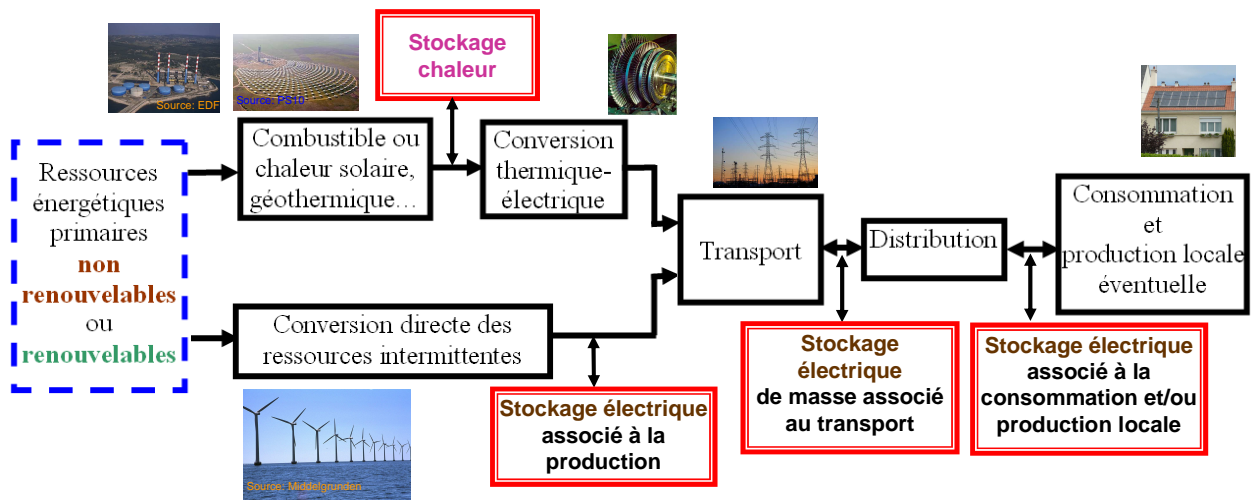
➡ **Alimentation en électricité plus sûre et plus robuste**

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

➡ **Développement durable (CO2, 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



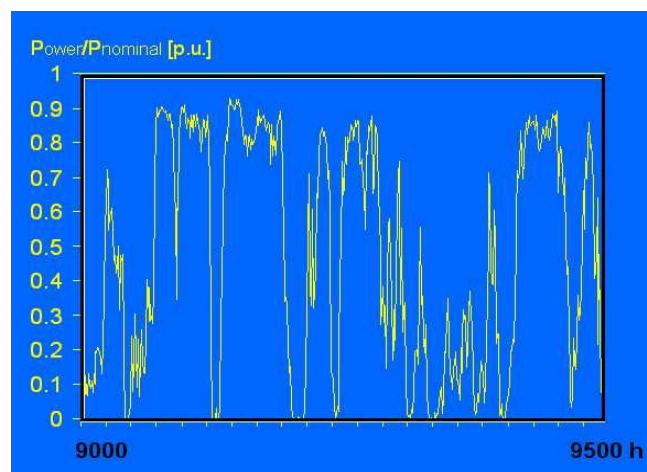
Stocker au niveau des générateurs ?

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...

4

B. Multon ENS de Rennes



Stocker au niveau du réseau de transport ?

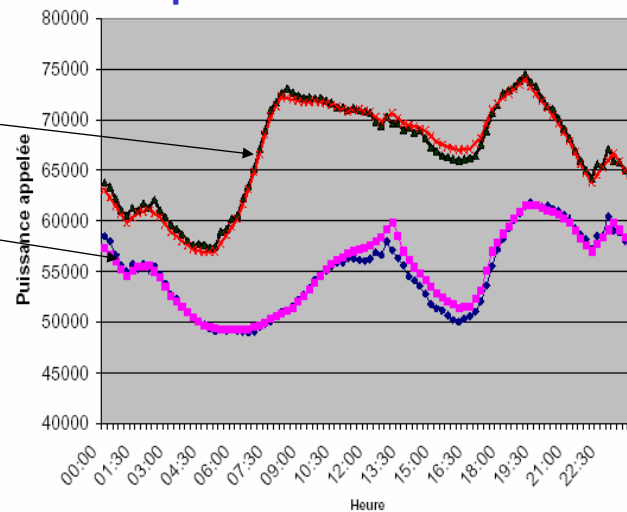
Un degré d'action supplémentaire pour le gestionnaire,
réduction des risques d'effondrement.

Courbes de production/consommation

un **mardi** de décembre 2001

un **dimanche** de décembre 2001

décembre 2010 :
pic d'environ 95 GW



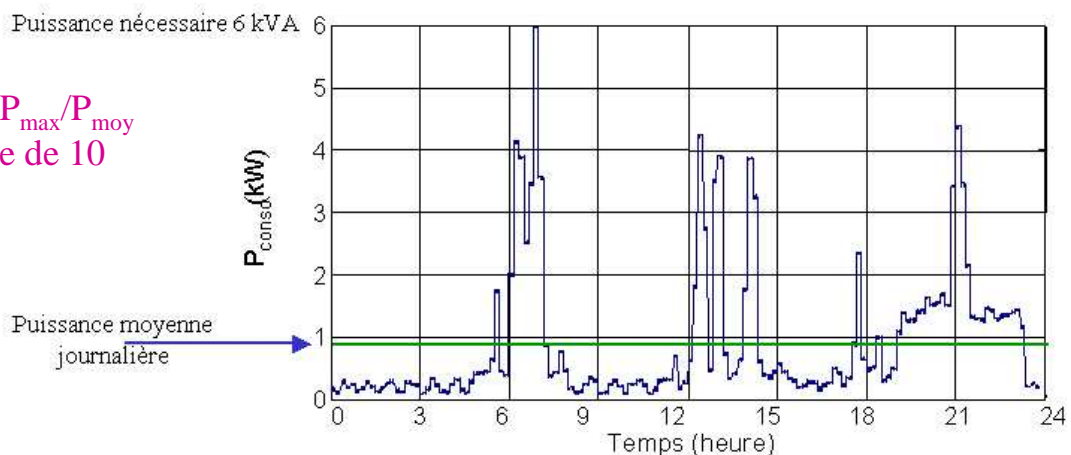
Capacité de **stockage** déjà installée (données début des années 2000) :

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



Stocker au niveau des consommateurs ?

Rapport P_{\max}/P_{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** (électrochimiques, volants d'inertie, groupes électrogènes)



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

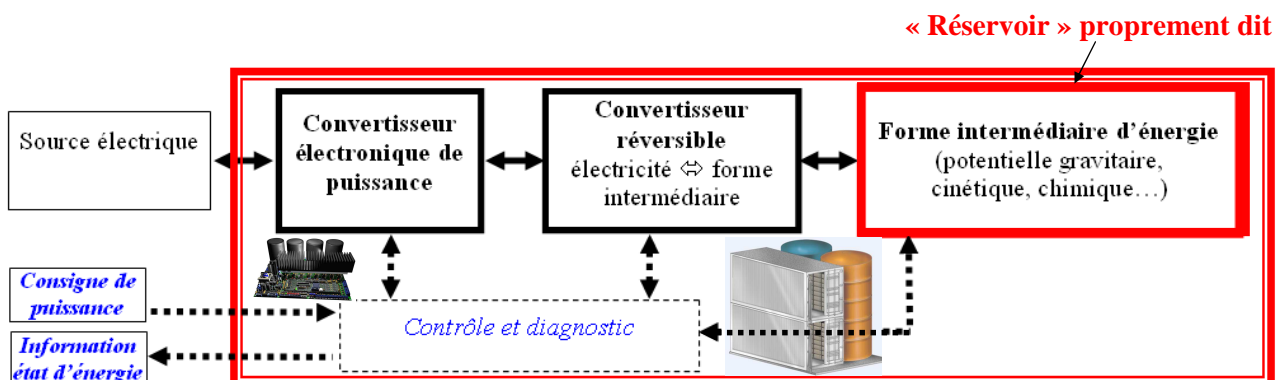


Le système de stockage d'énergie électrique (SSEE) (ESS : Energy Storage System)

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** :





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)

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

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

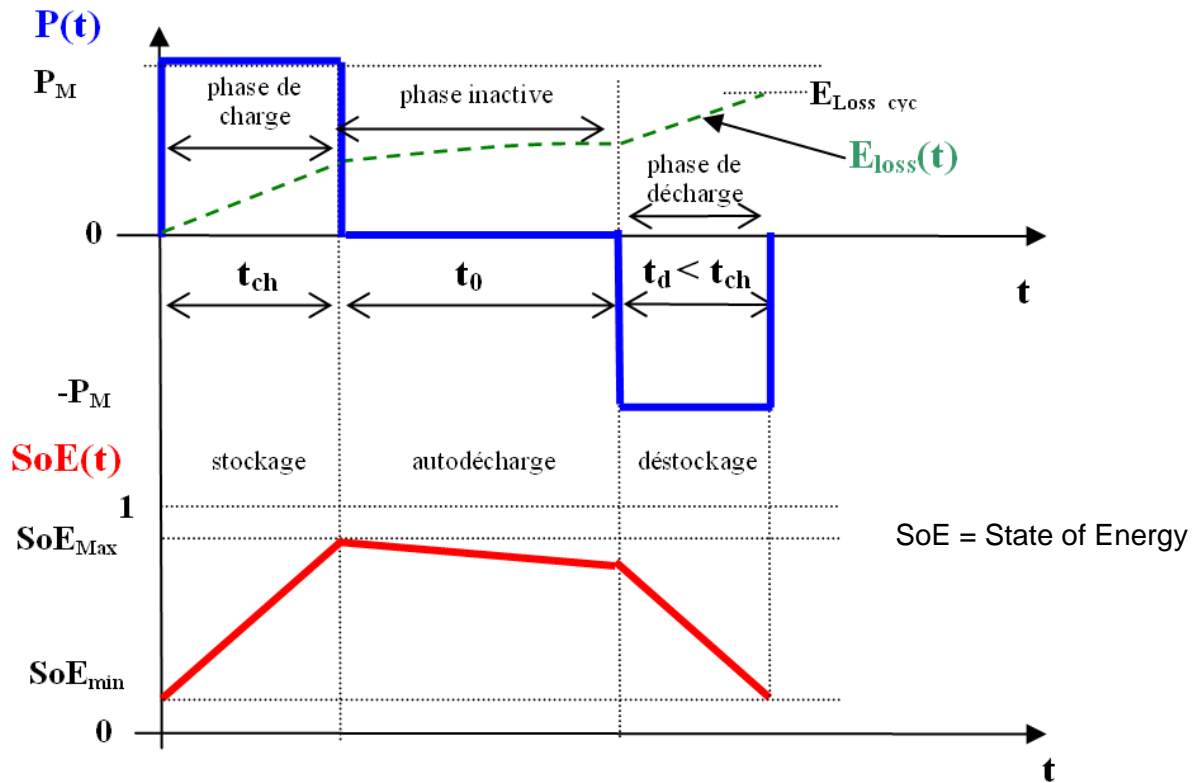
} Puissance maximale

Découplage Energie / Puissance \longleftrightarrow 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 $\eta_{\text{cycle}} = \frac{E_d}{E_{\text{ch}}} = \frac{P_M \cdot t_d}{P_M \cdot t_{\text{ch}}} = \frac{t_d}{t_{\text{ch}}}$

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

Rendements de charge et de décharge : $\eta_{\text{ch}} = \frac{E_{\text{ch}} - E_{\text{loss_ch}}}{E_{\text{ch}}}$ $\eta_d = \frac{E_d}{E_d + E_{\text{loss_d}}}$

Rendement total sur cycle :

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

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.

12

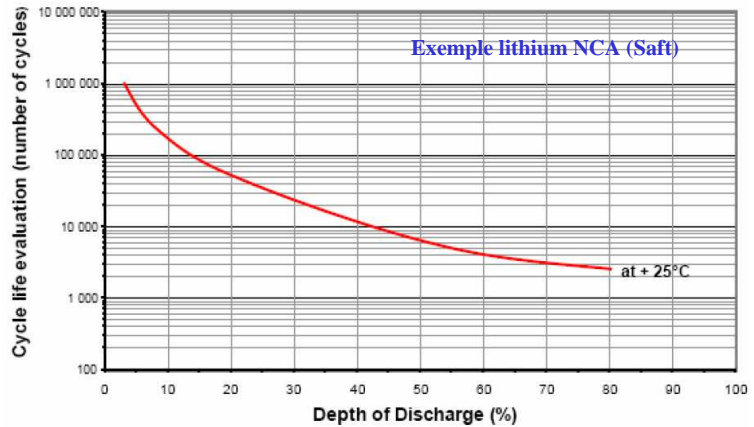
B. Multon ENS de Rennes



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 €/kWh pour les accumulateurs à longue constante de temps
(plutôt dimensionnés en Énergie)

ou

- en €/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 €/kWh et €/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 ($1000 \text{ €} / (0,8 \times 2500 \text{ cycles})$)

ou :

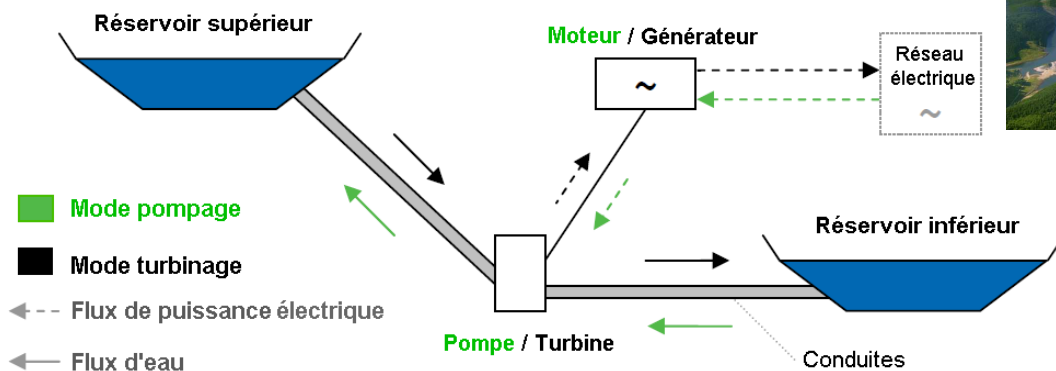
avec 60 000 cycles à 20% de DoD (*surdimensionnement*) :

« Coût d'usure » : 0,08 €/kWh ($1000 \text{ €} / (0,2 \times 60\,000 \text{ cycles})$)

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



Stockage hydraulique gravitaire (STEP)



Goldistahl (Allemagne) :
1 GW – 8,5 GWh

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
Chiotas	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

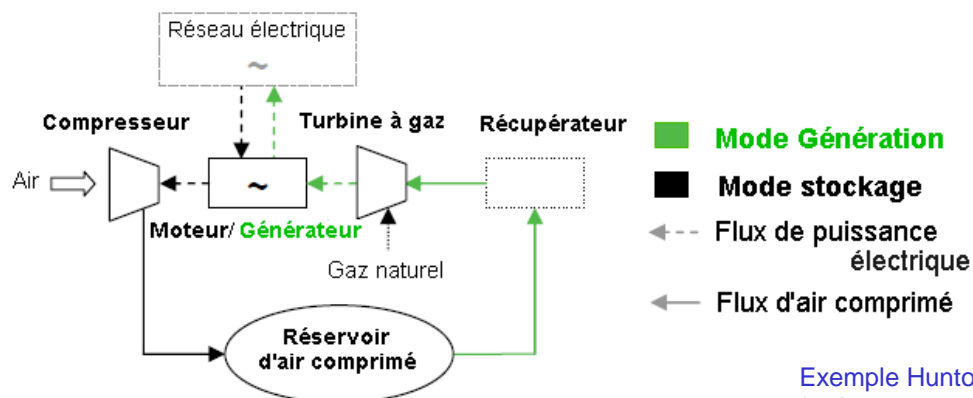
Exemple 2 :
Nant de Drance (Suisse 2008-2015)
H 250 m
Alstom
4 groupes 157 MW
+ vitesse variable +/-10%

Source :

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



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



Rendement médiocre :

pour produire 1 kWh_e apport de 1,6 kWh_{th} de gaz
et 0,7 kWh_e (compresseur au stockage)

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

12 kWh/m³ de caverne à 100 bars

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

Démarrage : 5 à 10 mn

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

Exemple Huntorf (Allemagne 1979 et 2006)
(air à 70 bars dans 2 cavernes de 310 000 m³)

Charge : 60 MW – 12 h maxi

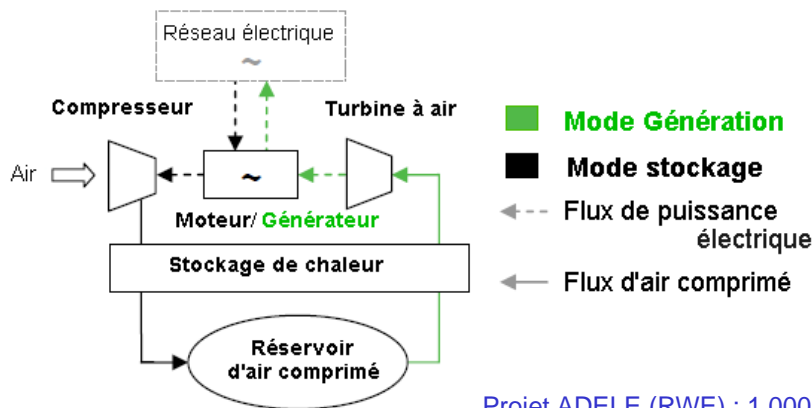
Décharge : 329 MW – 3 h maxi





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^{ère} étape 2013 : 90 MW – 360 MWh)
Rendement \approx 70%



Vers cavernes

Source : RWE



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

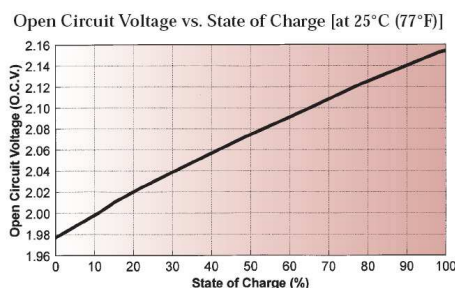
B. Multon ENS de Rennes



Technologies plomb - acide

Caractéristiques électriques :
2 V par élément

fem fonction de l'état de charge

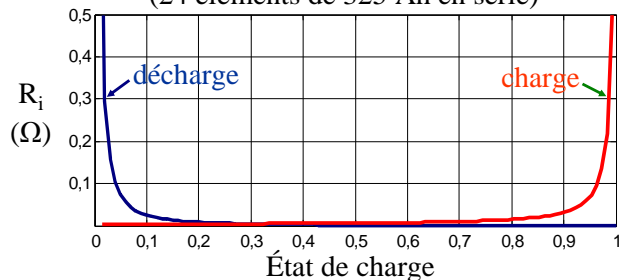


fem fonction de T°C

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

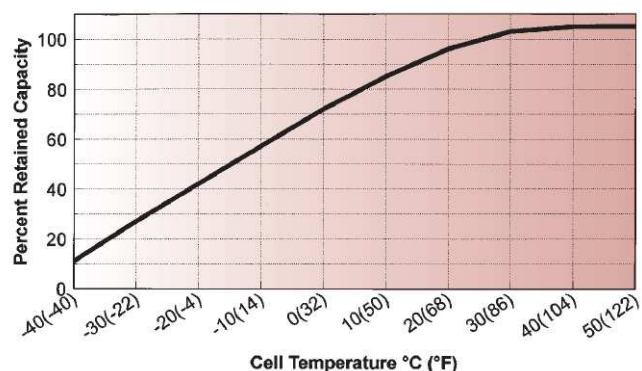
Résistance interne

(24 éléments de 325 Ah en série)



Perte de capacité aux basses températures

Absolyte IIP Performance Characteristics
Capacity Retention vs. Temperature

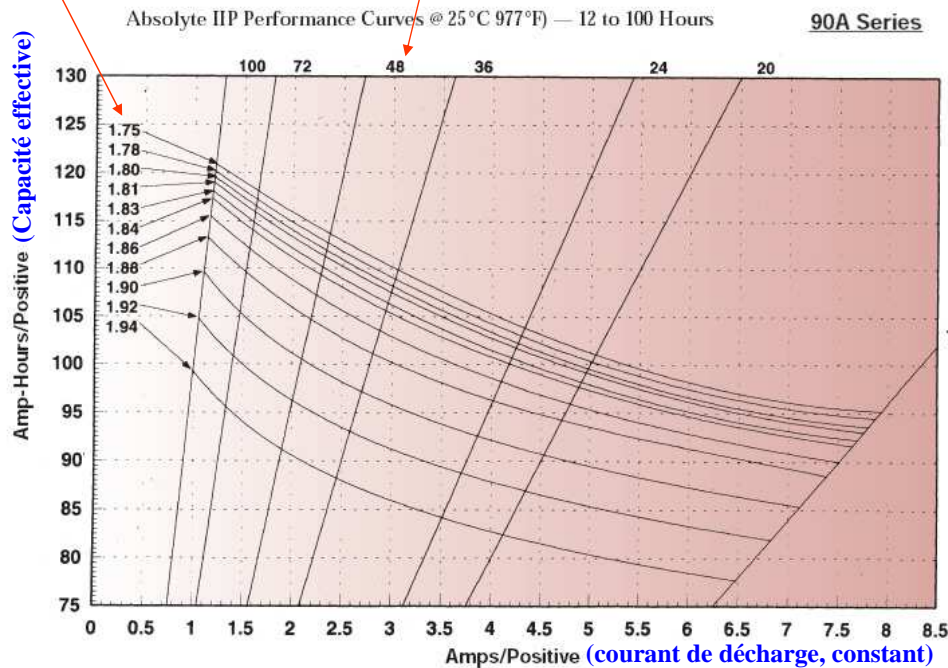




Influence du courant de décharge sur la valeur de la capacité (rendement coulombien, loi de Peukert)

Tension finale

Durée de décharge à courant constant



$$Q = \frac{K}{a + I_{\text{dech}}^n}$$

La capacité en décharge décroît lorsque le courant de décharge est plus élevé.

12 Avec une décharge en 1h, la capacité tombe à 50 Ah

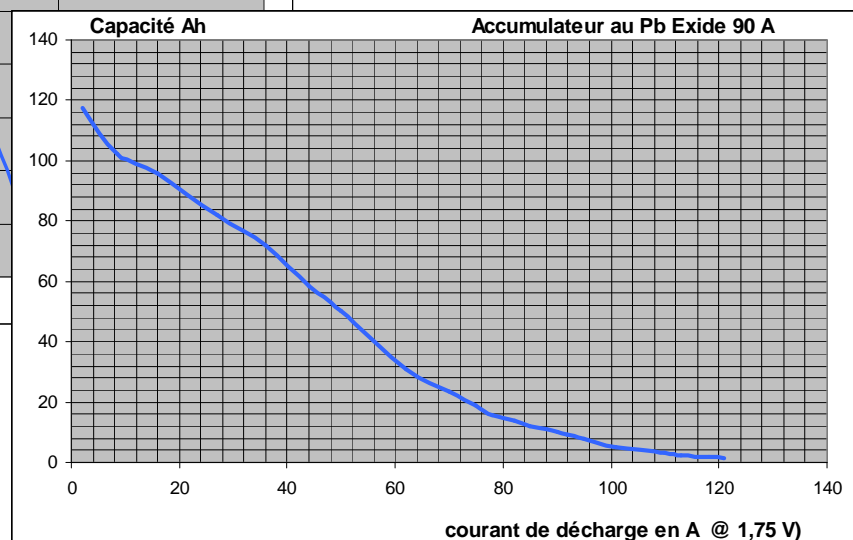
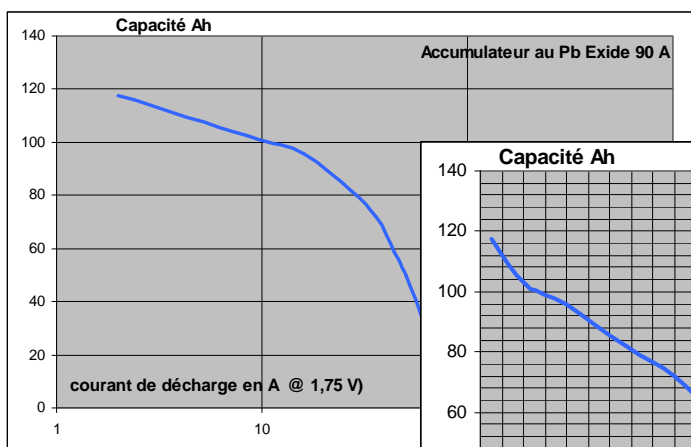


23 Source: batteries Exide <http://networkpower.exide.com/>



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

Accumulateur Exide Absolyte IIP 90 A



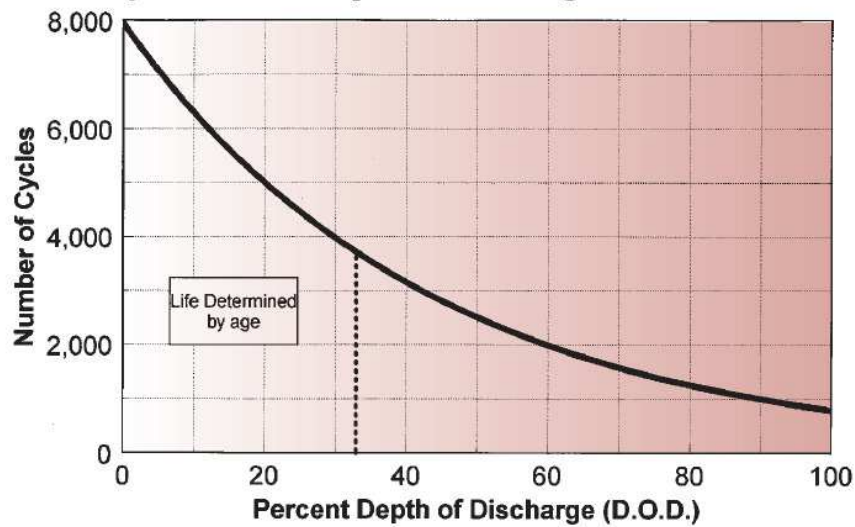
$$Q = \frac{K}{a + I_{\text{dech}}^n}$$



Nombre de cycles limité par la profondeur de décharge

Absolute IIP Performance Characteristics

Cycle Life vs. Depth of Discharge [at 25°C]



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/>

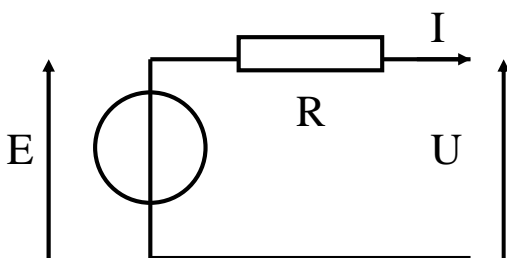
B. Multon ENS de Rennes



Limite de puissance et rendement en décharge

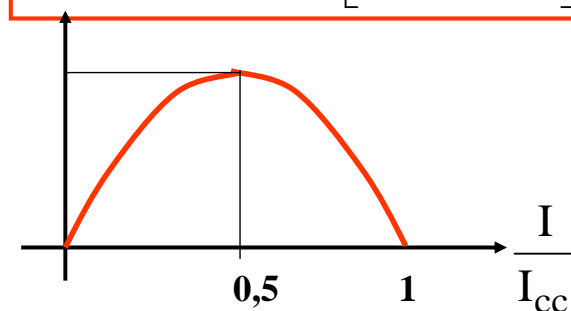
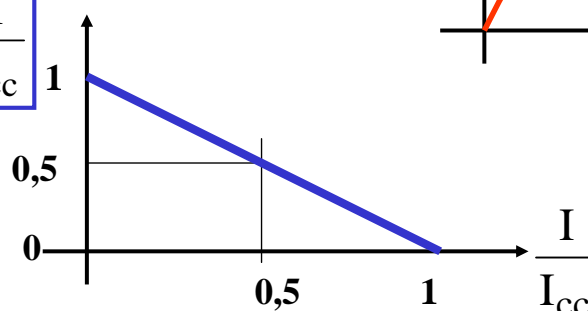
Modèle assez générique :

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



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

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

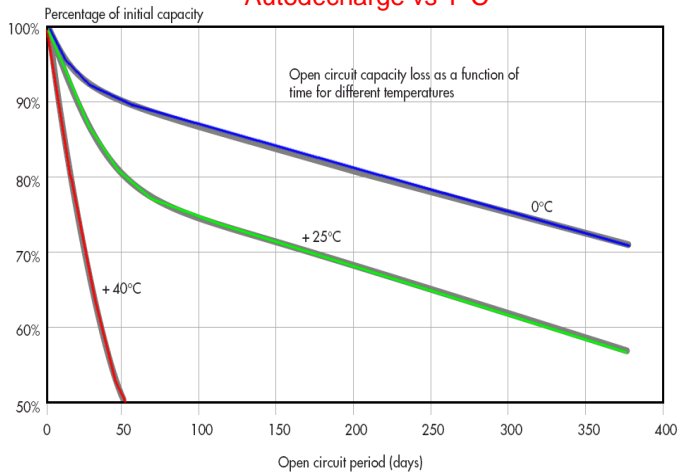




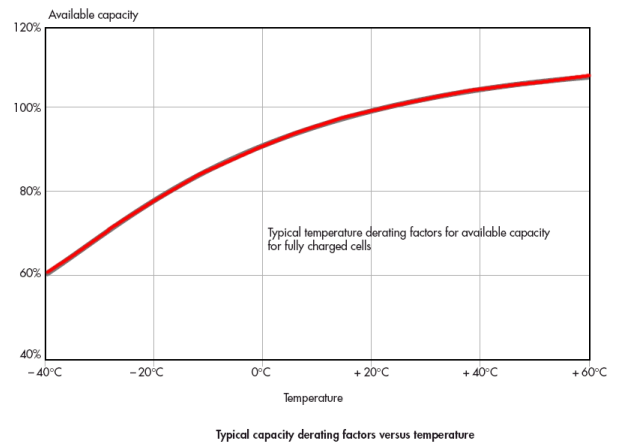
Technologie NiCd

Force électromotrice :
1,2 V par élément

Autodécharge vs T°C



Capacité énergétique vs T°C

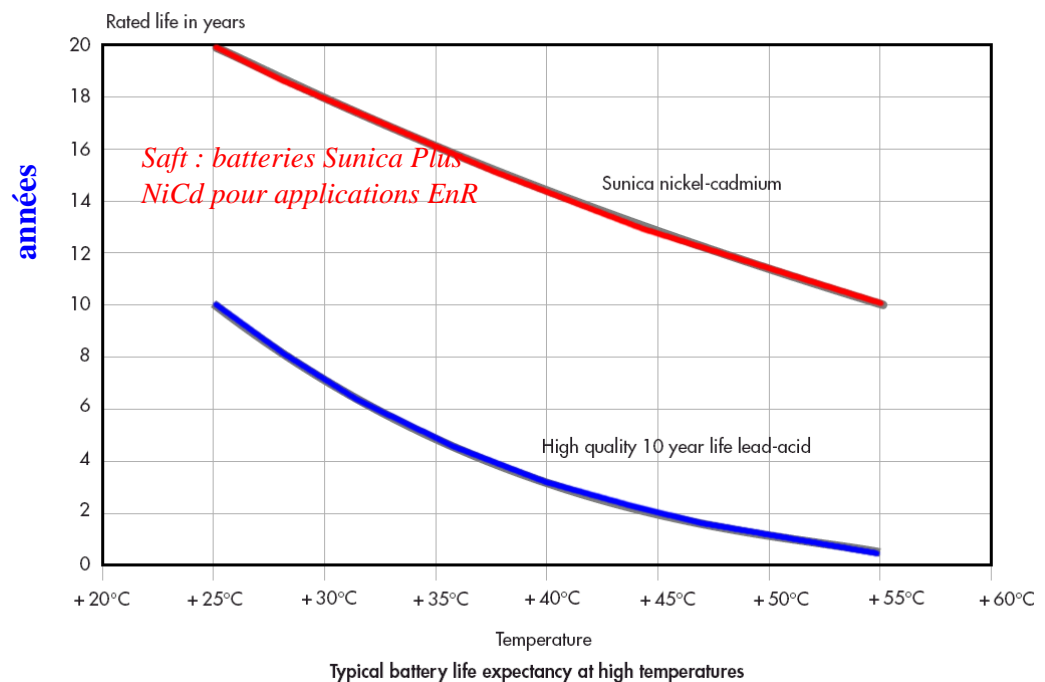


Saft : batteries Sunica Plus NiCd pour applications EnR



NiCd

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



Saft : batteries Sunica Plus NiCd pour applications EnR



Technologies Lithium : une grande variété

Classification

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

LCO : 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 : LiFePO_4 ,

LMO : LiMn_2O_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

(LiC_6 , notées LiC)

titanates (LTO) :

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

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

Source : EDF R&D S. Lascaud, 2009

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

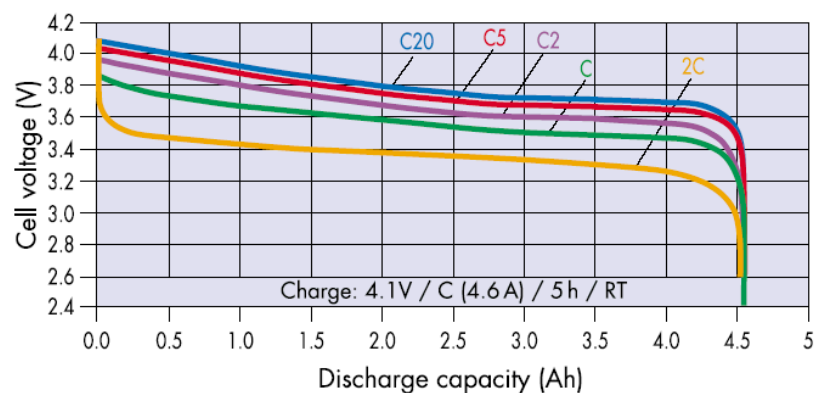
Mechanical characteristics

Thickness max (mm)	18.5
Width max (mm)	48
Height max (mm)	65
Weight max (g)	125
Volume (cm ³)	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

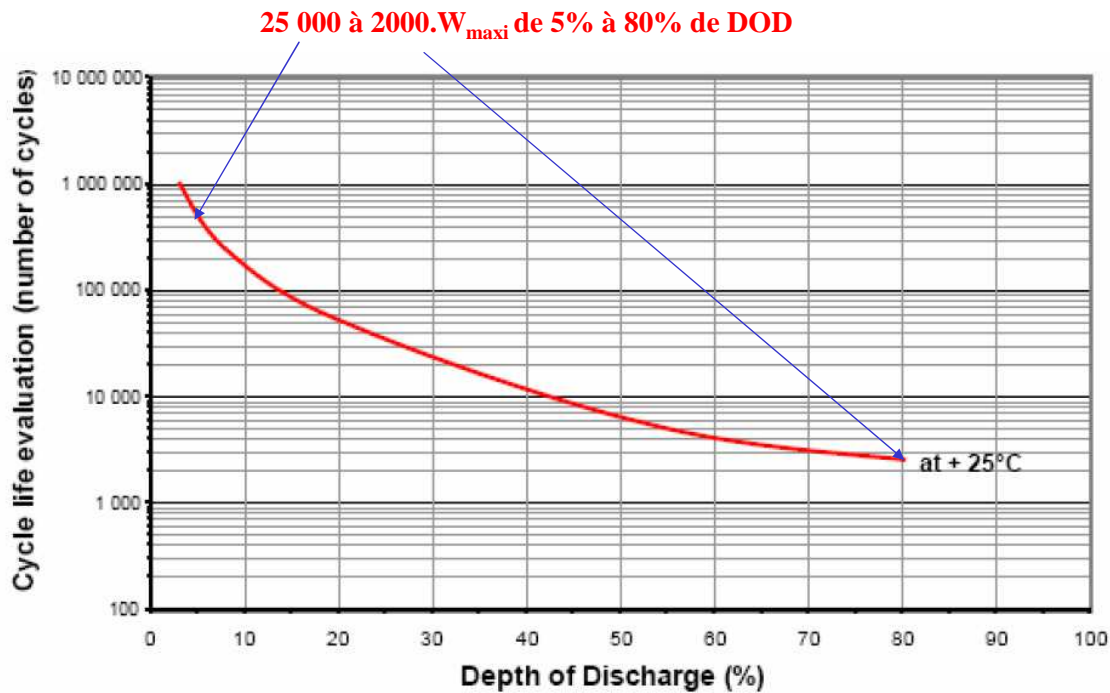


30

B. Multon ENS de Rennes



Vieillessement en cyclage technologie Lithium-Ion NCA



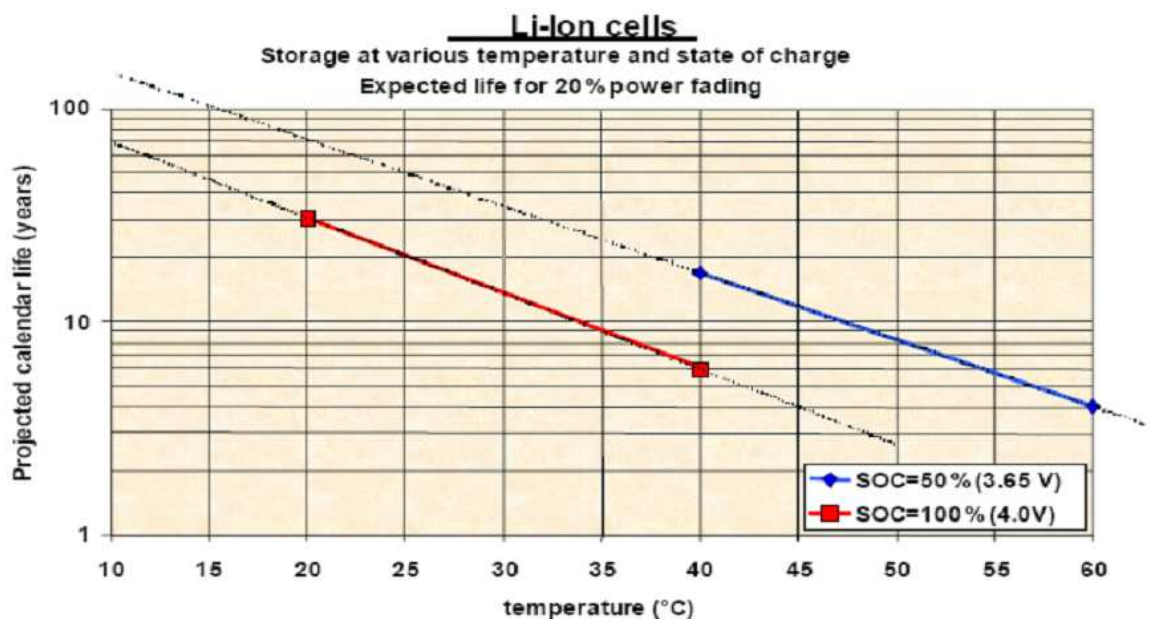
Source : Saft

31

B. Multon ENS de Rennes



Vieillessement 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

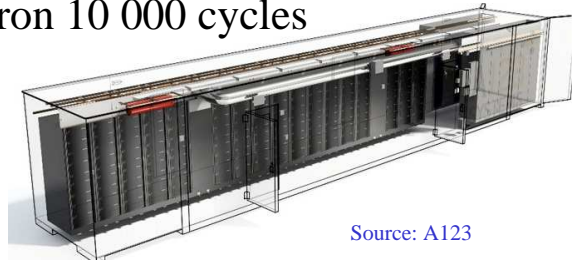
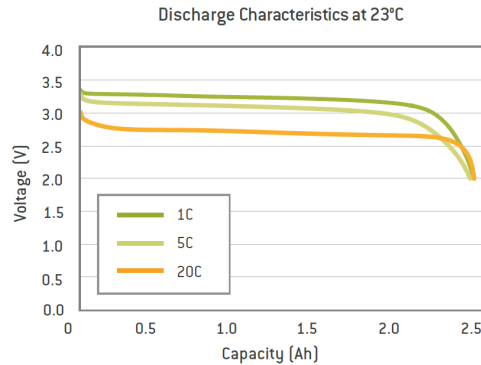
A123

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

Nanophosphate™ cells



2,5 Ah



Source: A123

Assemblées en Modules

6 modules par tiroir

8 tiroir par rack

18 racks



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/>

Modèles :

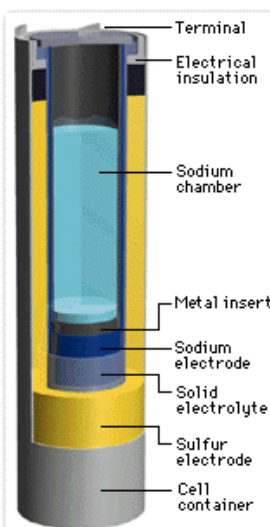
PS (peak shaving)

50 kW - 430 kWh

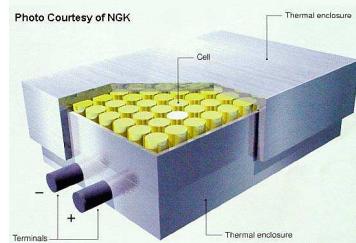
PQ (power quality)

50 kW permanents 360 kWh

150 ou 250 kW crêtes (30 s par heure)



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



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

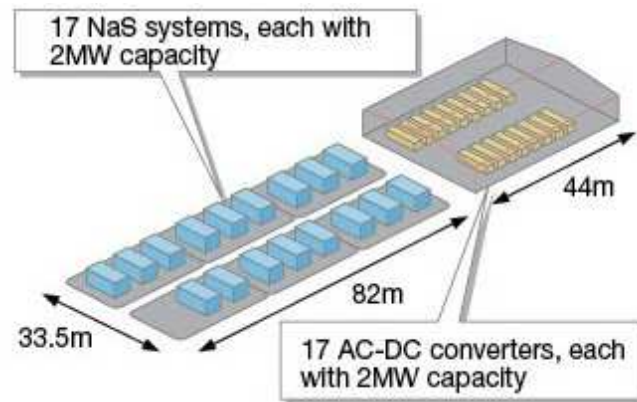
34

B. Multon ENS de Rennes



Application dans une ferme éolienne (Futamata Japon 2008)

Lissage de production



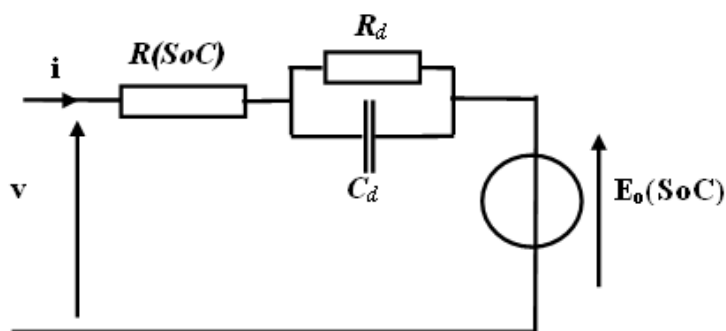
Puissance éolienne : 51 MW

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

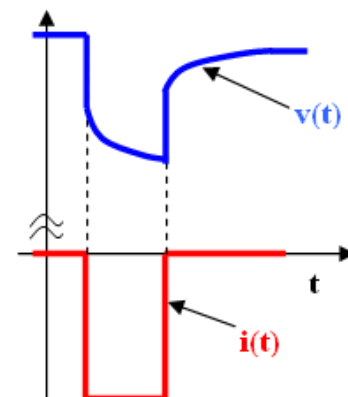
Source: NGK
<http://www.ngk.co.jp/>



Modélisation électrique simplifiée et **générique** pour les accumulateurs électrochimiques



Réponse à un échelon de courant de décharge :

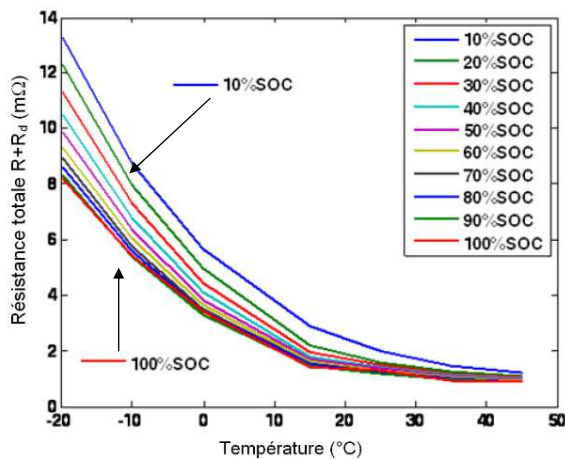


$R(\text{SoC})$ subit des lois fortement non-linéaires avec le SoC,
 dépendantes du régime (charge ou décharge)

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



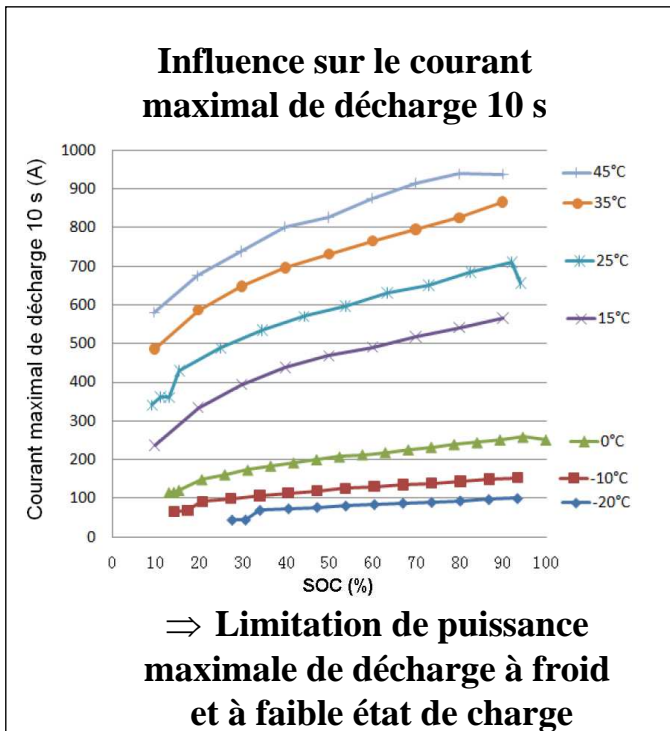
Variations de la résistance interne en fonction de la température et du SoC, cas de la technologie **LiFeP**



En général, en décharge, la résistance interne (ohmique) est plus élevée :

- à basse température
- à faible état de charge

Source : L. LU "LiFePO4 battery performances testing and analyzing for BMS" U.S.-China Workshop, Aug.2011



B. Multon ENS de Rennes

37



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

Exemple 2 Nickel-Cadmium (1000 tonnes)

Fairbanks Alaska (2003)

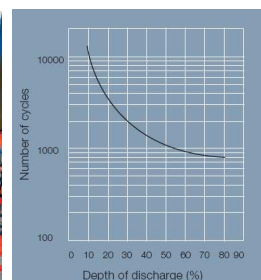
Capacité nominale 18,4 MWh

- 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

Sources : ABB et Saft



Durée de vie escomptée : 25 ans

B. Multon ENS de Rennes

38

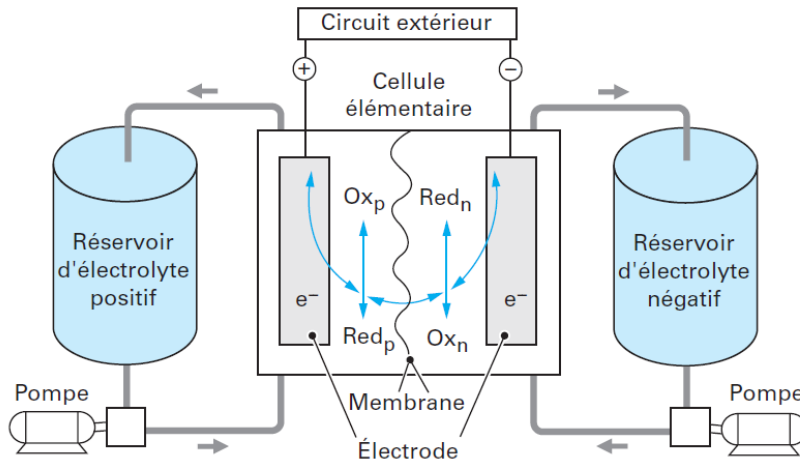
Batteries à circulation (Redox flow batteries)

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)



Dissociation énergie/puissance

Energie volumique : 10 à 30 kWh/m³

Rendement : 70 % à 90%

Capacité : 1 à qq 100 MWh

Puissance : 1 à 10 MW

quelques heures (4 à 8)

Source: J. Alzieu et J. Robert

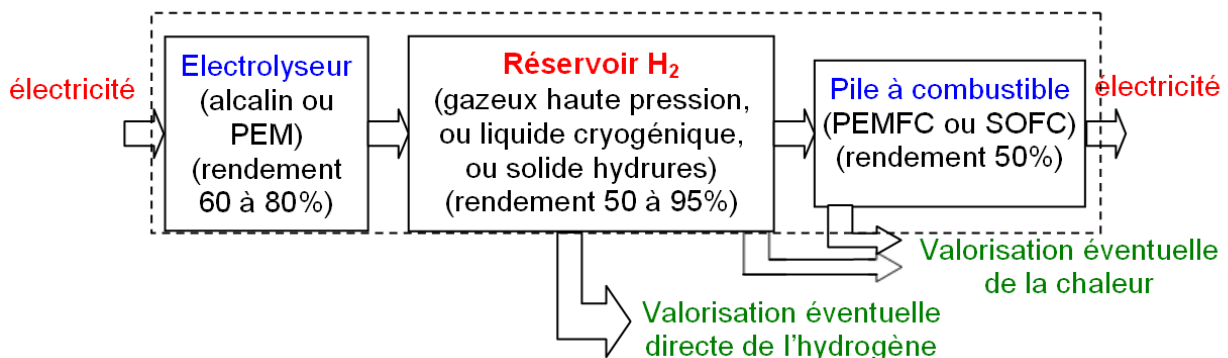
Techniques de l'Ingénieur D3357, 2007

39

B. Multon ENS de Rennes



Stockage via l'hydrogène



+ convertisseurs électroniques

+ lissage (Supercondensateurs ou batteries électrochimiques...)

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

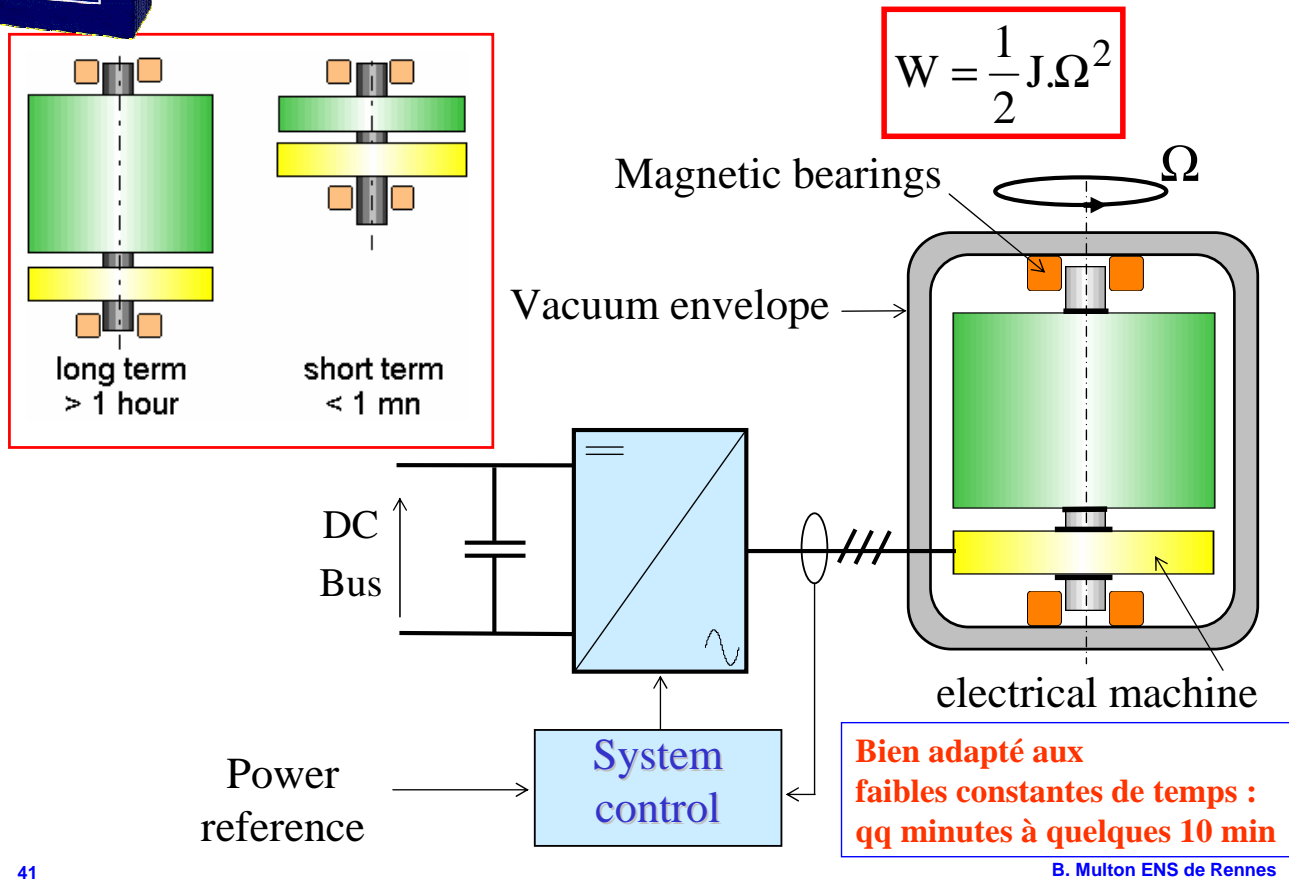
plutôt que de vouloir en refaire de l'électricité...

40

B. Multon ENS de Rennes



Stockage à volant d'inertie (flywheel energy storage)



41



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



42

B. Multon ENS de Rennes



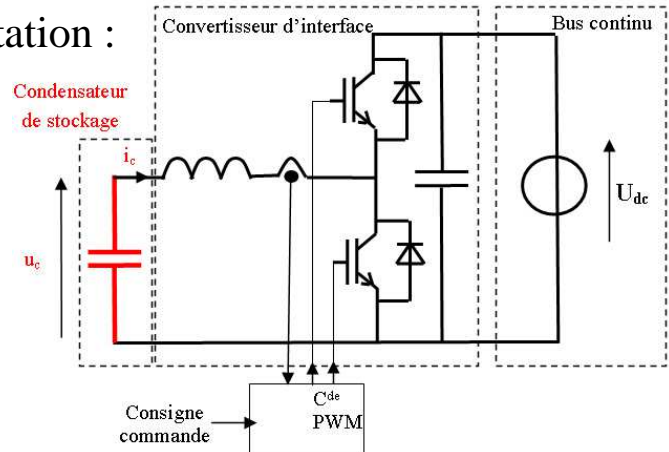
Super-condensateurs

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.

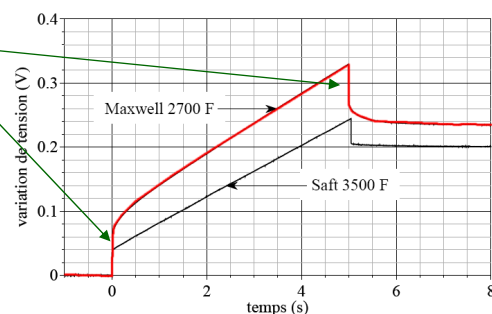
43

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 créneau 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	: 0,6 l
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%

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

Exemple technologie Ultracaps EPCOS

+ 30°C (25 à 55°C)

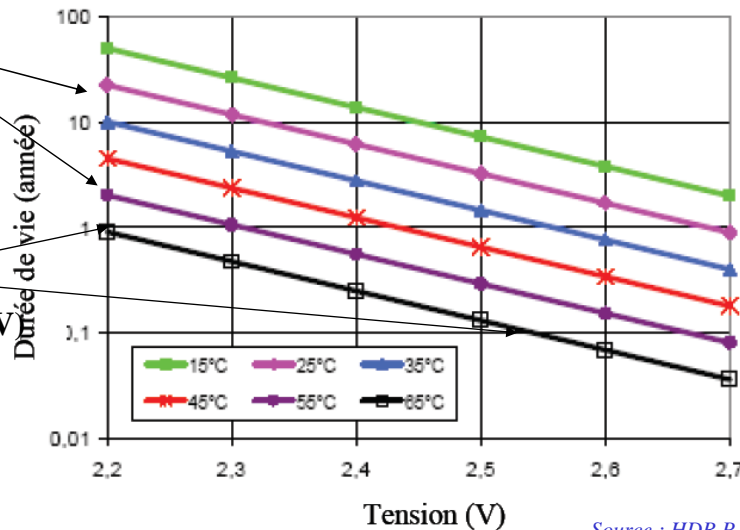
⇒ Durée de vie 1/10

(divisée par 2 tous les 9°C)

+ 0,3 V (2,2 à 2,54 V)

⇒ Durée de vie 1/10

(divisée par 2 tous les 100 mV)



Source : HDR P. Venet 2007

45

B. Multon ENS de Rennes



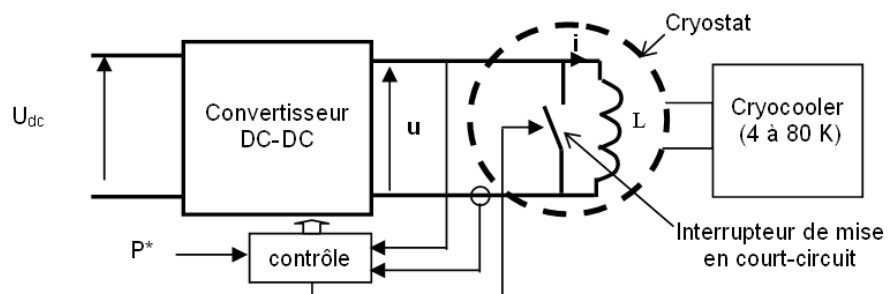
Inductances supraconductrices :

(SMES Superconductor Magnetic Energy Storage)

adaptées à des charges/décharges très rapides (quelques secondes)



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



ACCEL Instruments GmbH 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

46

B. Multon ENS de Rennes



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 ³ /(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 ⁵ à 10 ⁶ ~ 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 ³	qq h à qq 10h	?	~ 1 €/W	60 à 75%	C
Air comprimé caverne adiabatique	(caverne) 10 Wh/dm ³ (200 bars)	1h à qq 10 h	?	0,6 à 1,2 €/W	~ 70%	D+
Thermodynamique haute temp.	(réservoirs) ~ 250 Wh/dm ³	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 ⁵ à 10 ⁶ ~ 15 ans	15 €/Wh + 0,7 €/W	~ 85% à 95%	B

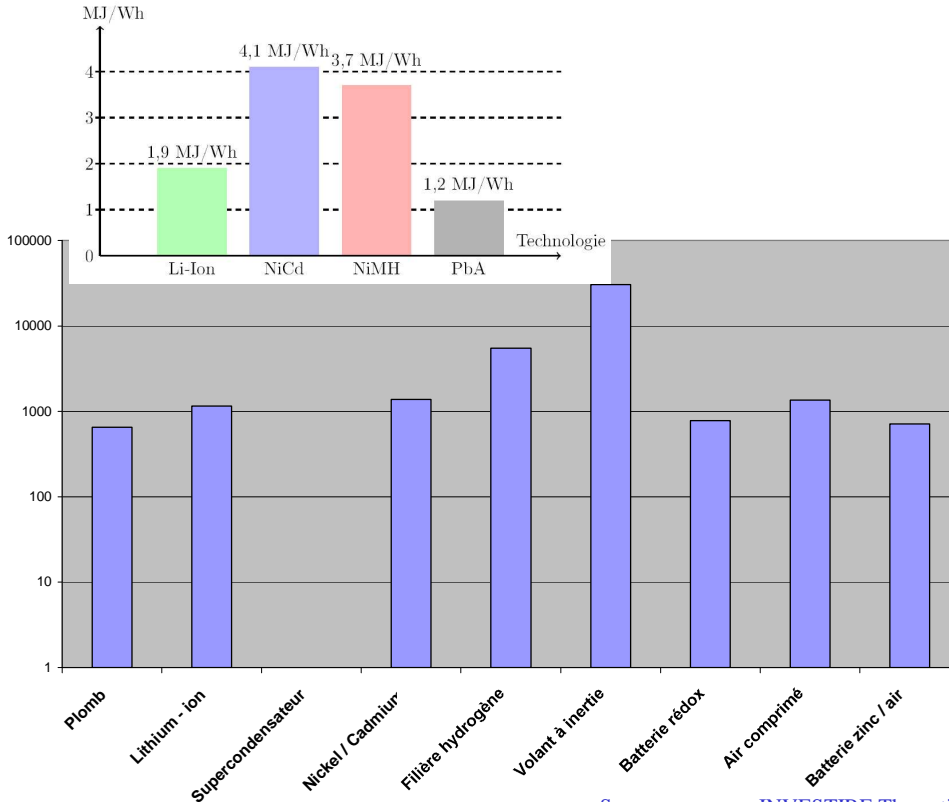
Source: B. Multon et al., « Systèmes de stockage d'énergie électrique », Techniques de l'Ingénieur BE8100 2013

48

B. Multon ENS de Rennes



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



1000 MJ/kWh

=

280 kWh/kWh

Le stockage est très coûteux dans une ACV

49

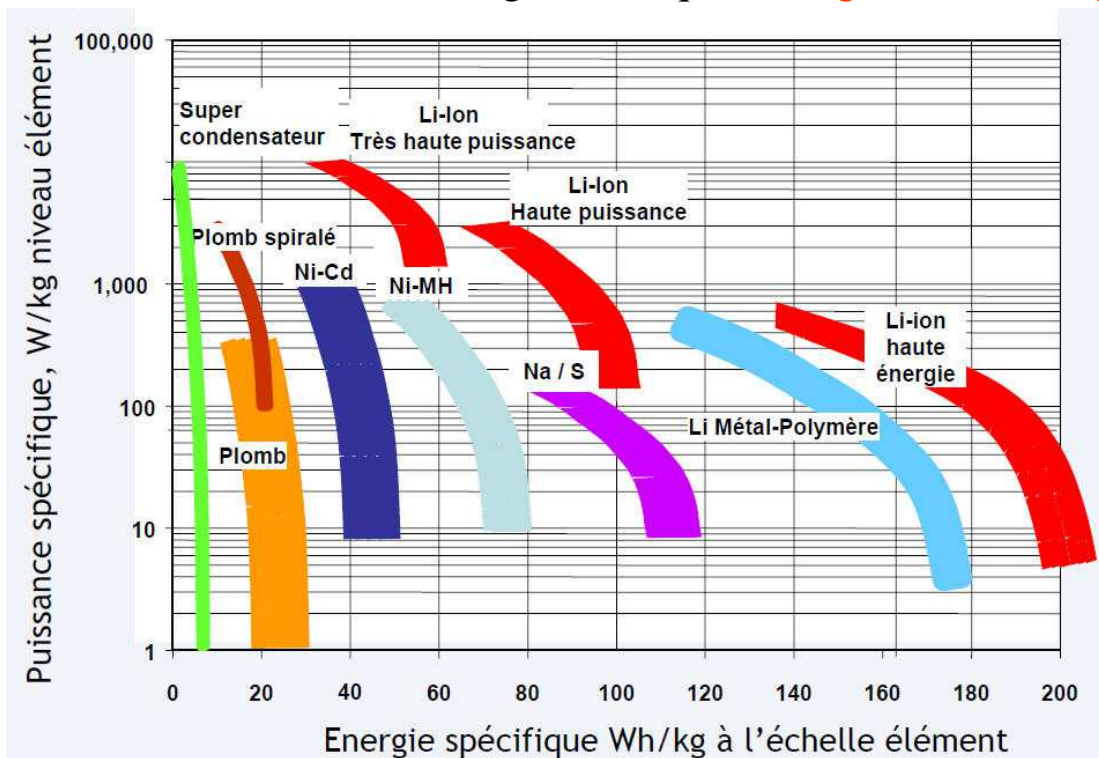
Source : program INVESTIRE Thematic Network

B. Multon ENS de Rennes



Critères de comparaison

Puissance et énergie massiques : **diagramme de Ragone**



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

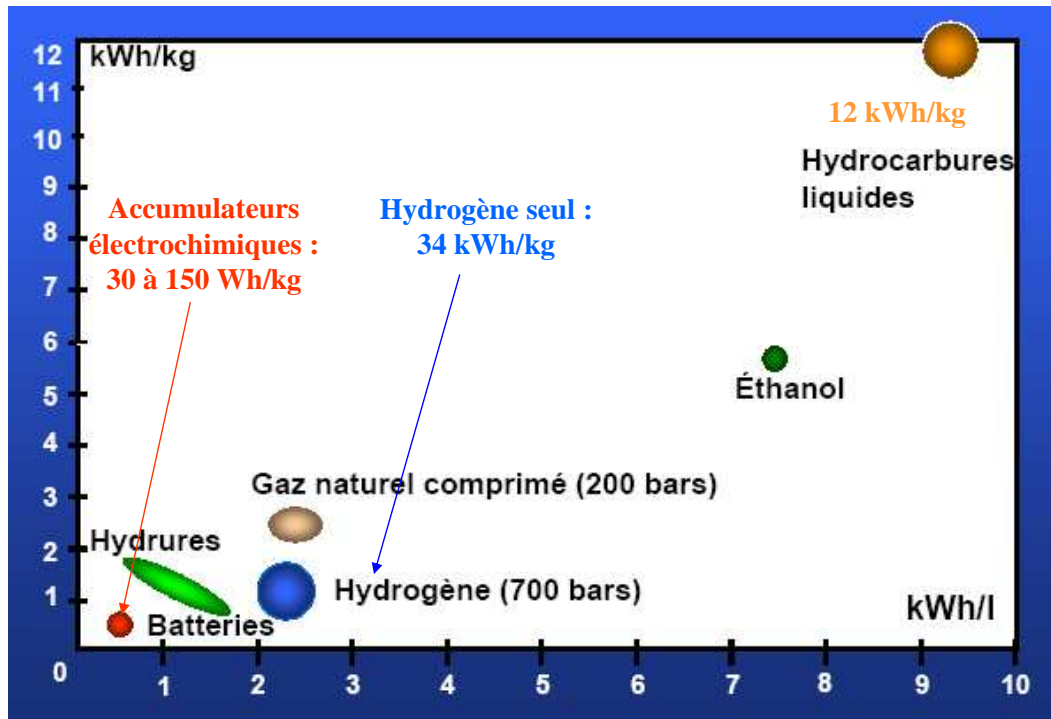
50

B. Multon ENS de Rennes



Critères de comparaison :

Energie massique et volumique de différents moyens de stockage

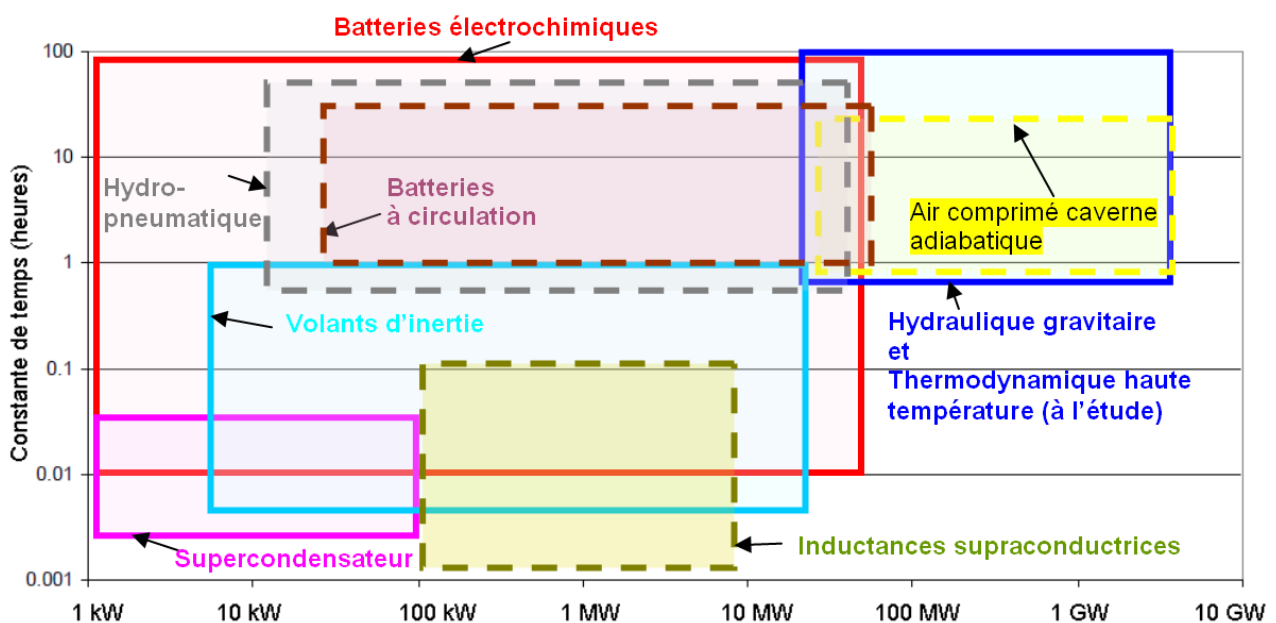


51

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)

52

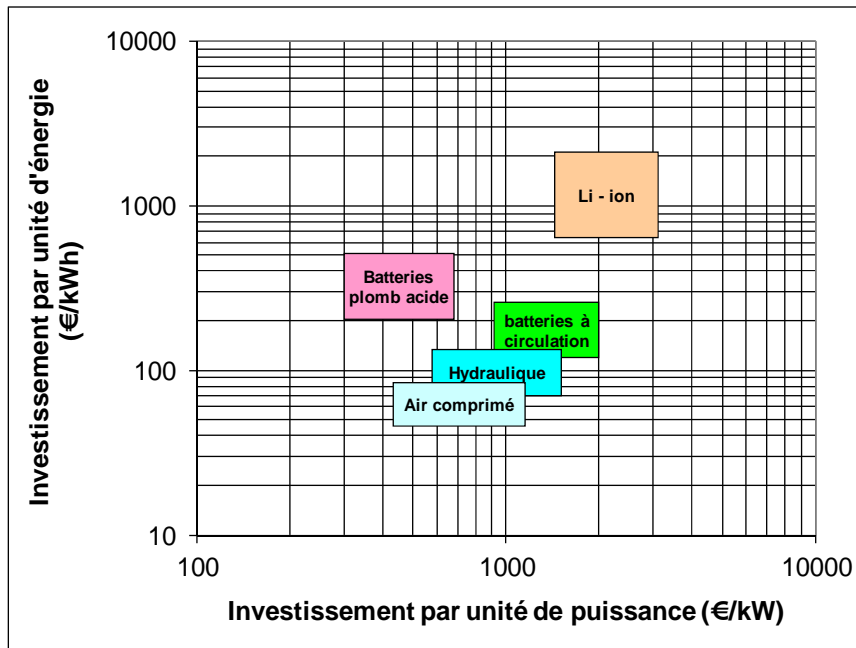
B. Multon ENS de Rennes



Critères de comparaison :

Coût d'investissement du kWh stocké

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



de 40 à 2000 €/kWh

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

de 300 à 3000 €/kW

Source : Jacques RUER, SAIPEM, ECRIN

53

B. Multon ENS de Rennes

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

utilisation d'un critère plus objectif que
le critère économique :

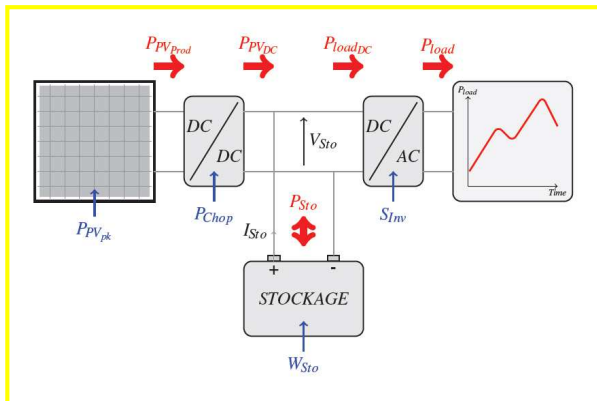
**l'énergie primaire consommée
sur l'ensemble du cycle de vie**

54

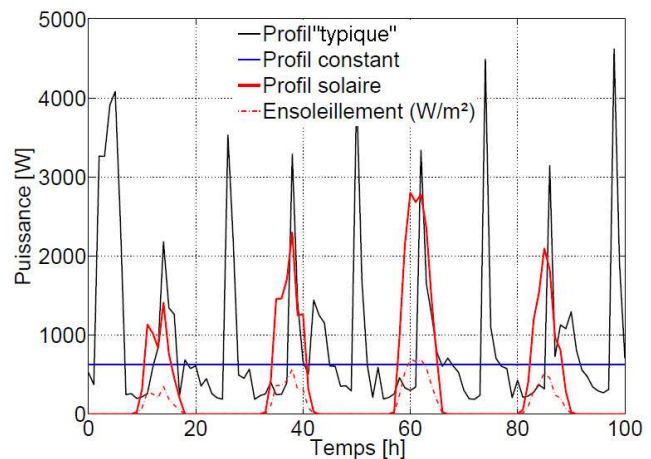
B. Multon ENS de Rennes

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

Système autonome photovoltaïque :



Etude de l'impact du profil temporel de consommation sur le coût énergétique global :
(pour 164 MWh_e sur 30 ans)



Thèse Yaël THIAUX (2010) - SATIE

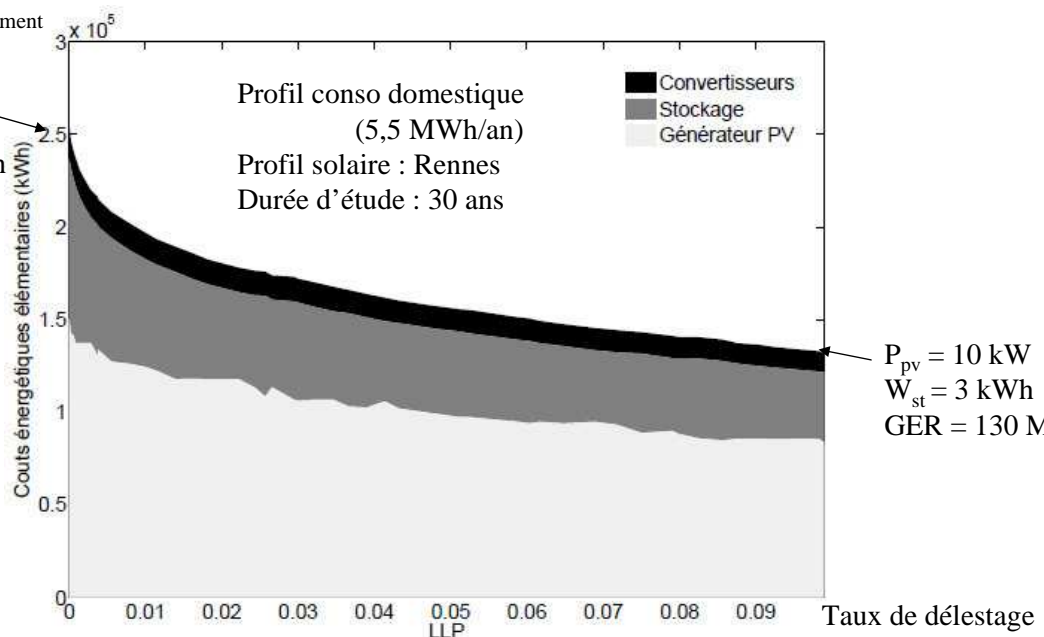
55

B. Multon ENS de Rennes

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

GER =
Global Energy Requirement

$P_{pv} = 17 \text{ kW}$
 $W_{st} = 11 \text{ kWh}$
GER = 250 MWh

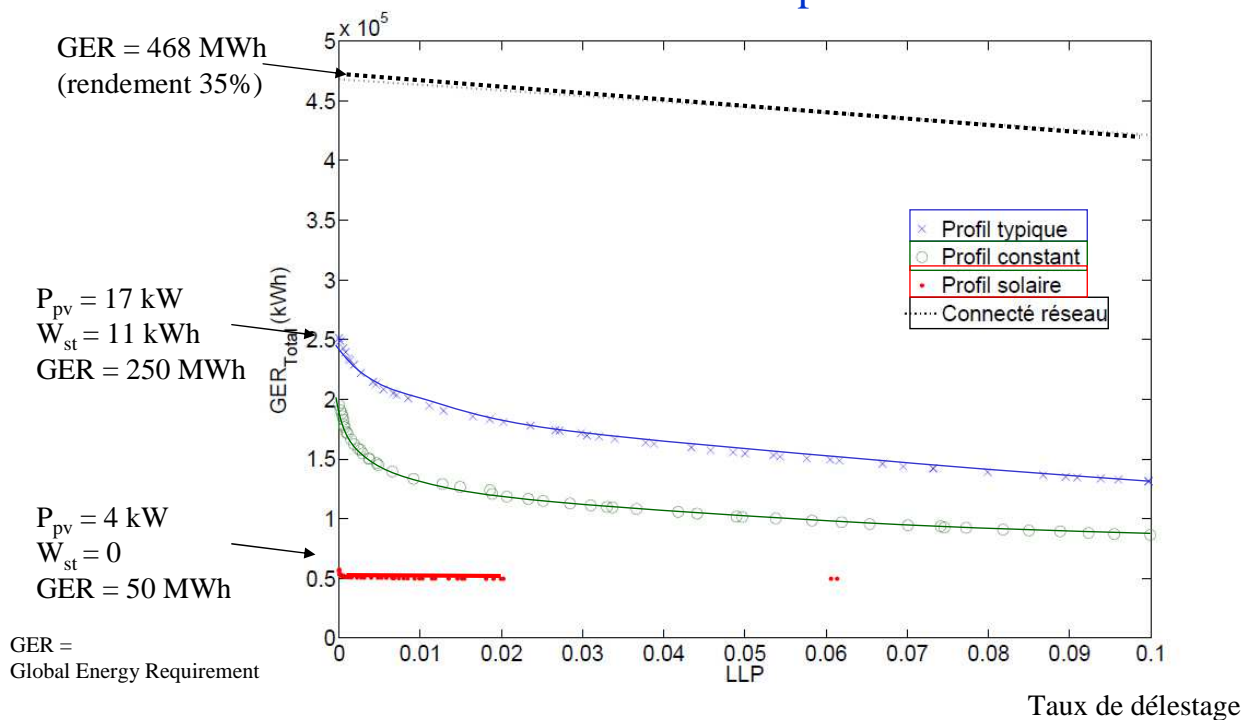


$P_{pv} = 10 \text{ kW}$
 $W_{st} = 3 \text{ kWh}$
GER = 130 MWh

56

B. Multon ENS de Rennes

Système photovoltaïque autonome avec batteries, influence du profil de consommation



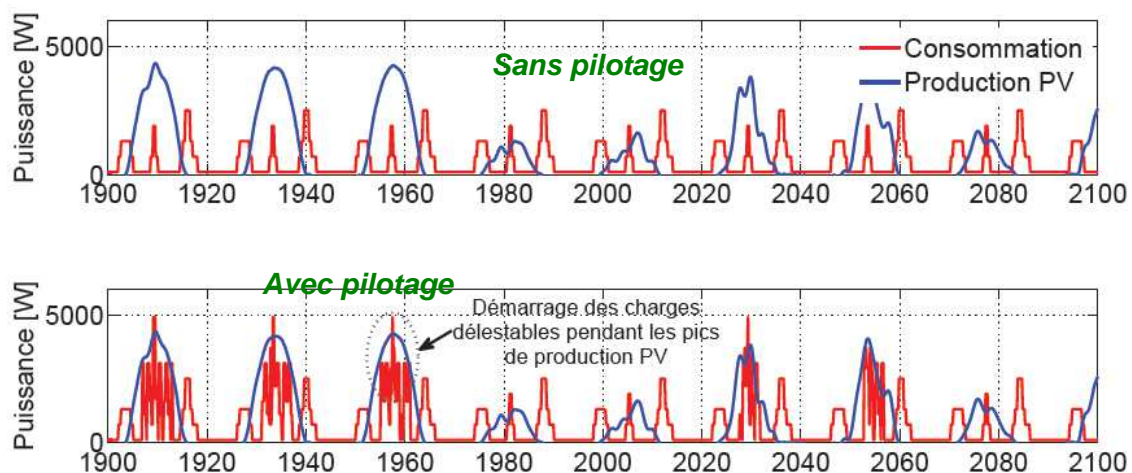
57

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
- 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
- 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

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