

Stockage de l'énergie dans les applications stationnaires

Bernard MULTON, Gaël ROBIN,
Erika ERAMBERT, Hamid BEN AHMED

*Ecole Normale Supérieure de Cachan - SATIE UMR CNRS-ENS Cachan 8029
Antenne de Bretagne*



Pourquoi stocker ?

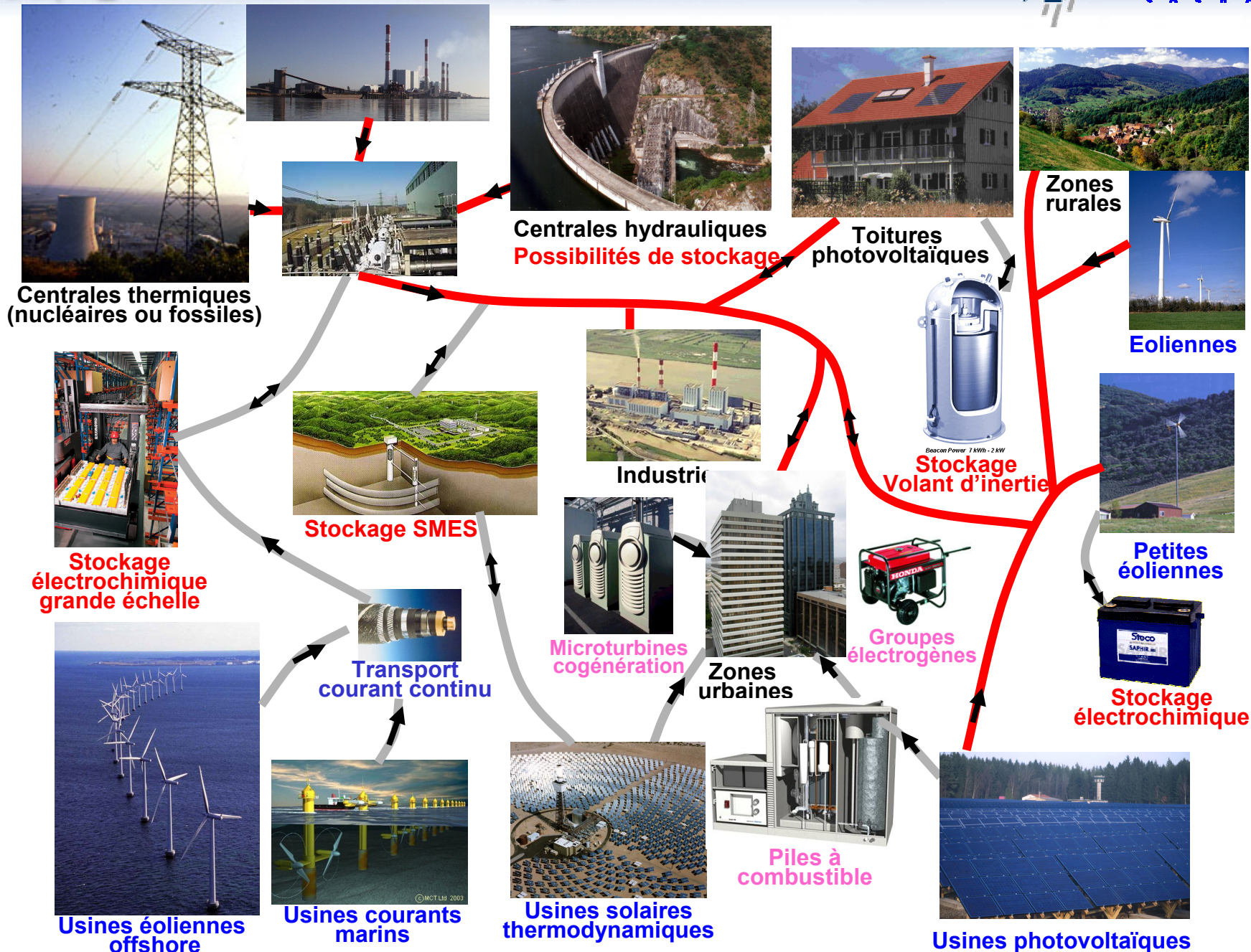
- améliorer et sécuriser la gestion du réseau dans un contexte d'ouverture des marchés de croissance des systèmes de production non pilotés par la demande
- permettre l'ilotage de consommateurs/producteurs

➔ 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...)

- **existe-t-il des solutions de stockage d'électricité techniquement viables ?**
- **peut-on amortir économiquement de tels systèmes dans un contexte de marché libéré ?**
- **où faut-il stocker l'électricité ?**



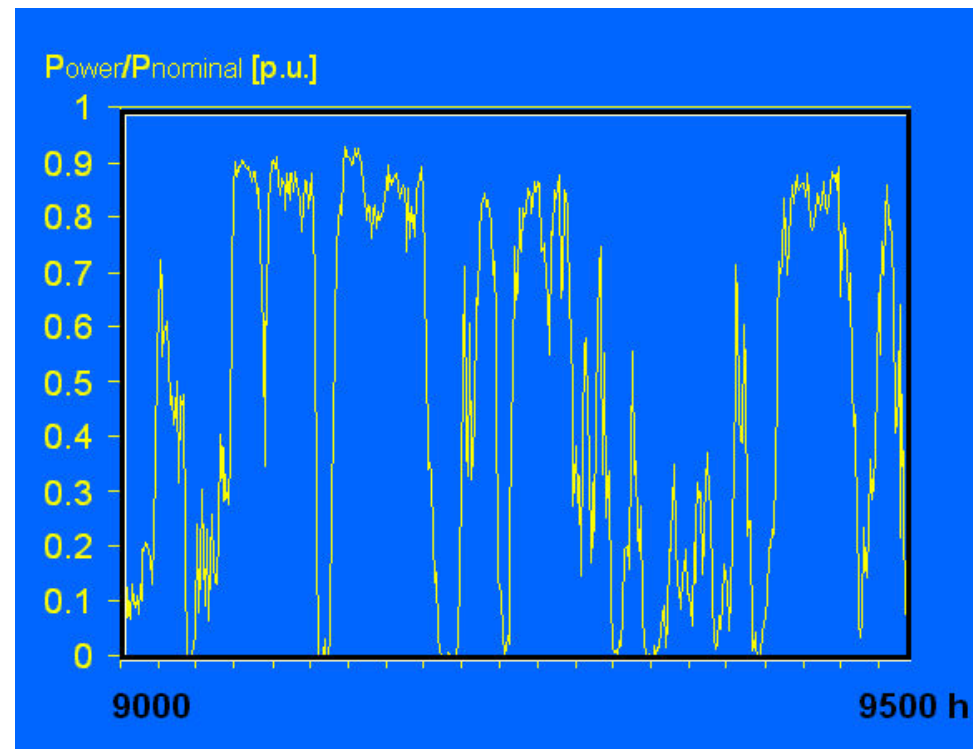
A quel niveau stocker ?

- au niveau des générateurs fluctuants

Amélioration de la
participation aux services
systèmes :

production de
puissances **active** et
réactive à la demande

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



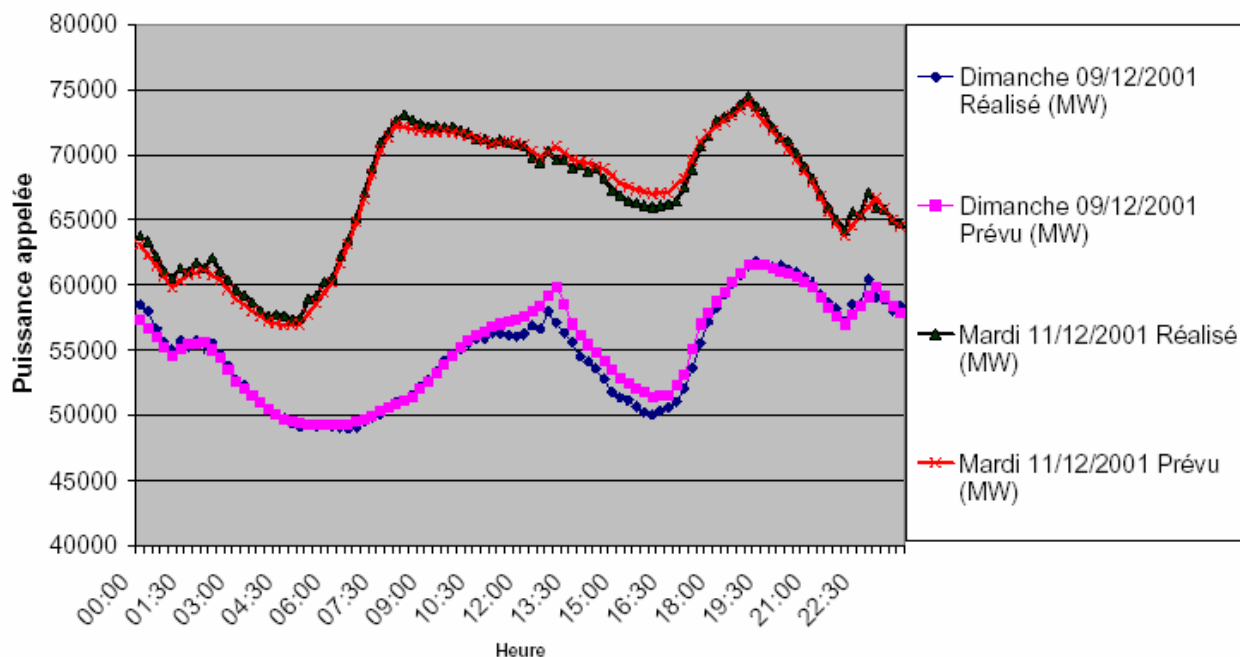
Ex. production éolienne (Kariniotakis, CENERG)

Rapport P_{\max}/P_{moy} de l'ordre de 4 (éolien) à 7 (PV)

- au niveau du réseau

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

Prévision de la demande journalière par RTE



Dans le monde : 90 GW (hydraulique gravitaire) sur 3400 GW soit 2,6 %

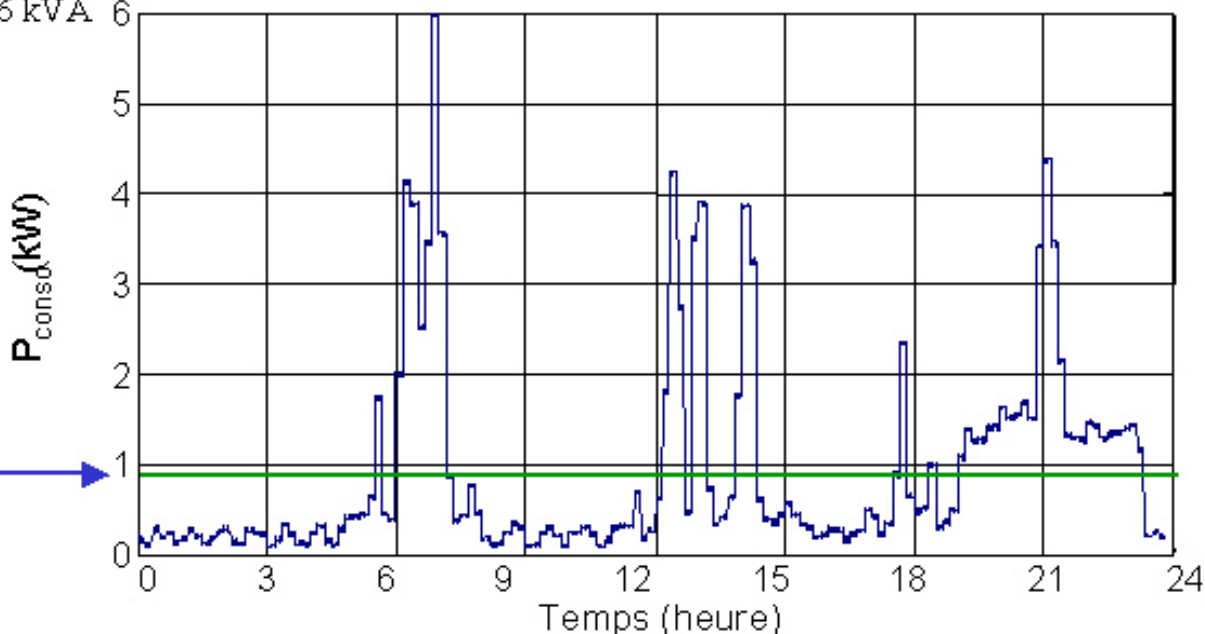
France : 6,3 GW

sur 116 GW soit 5,4%

- au niveau des consommateurs (fluctuations très importantes)

- sûreté de fonctionnement,
- lissage ou écrêtage de consommation,
- meilleur dimensionnement du réseau de distribution,
- possibilité d'îlotage long si une production locale existe

Puissance nécessaire 6 kVA



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

Puissance moyenne
journalière

Déjà des applications en secours (situations critiques)

Caractéristiques des systèmes de stockage

Nécessité de bien les définir,
notamment pour mieux comparer
et évaluer les différentes solutions

Capacité énergétique W_{stoc} en Wh (wattheures)
grandeur généralement fortement dimensionnante

Sa part exploitable est **fonction du rendement** de charge ou décharge,
elle varie donc avec le temps de transfert :

- pertes « en charge »
- pertes d'auto-décharge

Limites de décharge profonde (**état de charge minimal**)

L'énergie exploitable W_{util} est toujours inférieure à l'énergie totale stockée.

Attention à la définition de la capacité énergétique.

Puissance maximale P_{\max} de charge ou de décharge (parfois différentes)

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

Exemple : système de stockage hydraulique gravitaire

- Capacité de stockage liée à la masse d'eau et à la dénivelée entre les bassins haut et bas
- Puissance maximale définie par la taille des conduites et la puissance des groupes réversibles turbines-machines électriques

Découplage Energie Puissance : constante de temps ajustable

Rendement η : énergie restituée sur énergie prélevée

Définition souvent simpliste car fournie pour un seul point de fonctionnement.

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

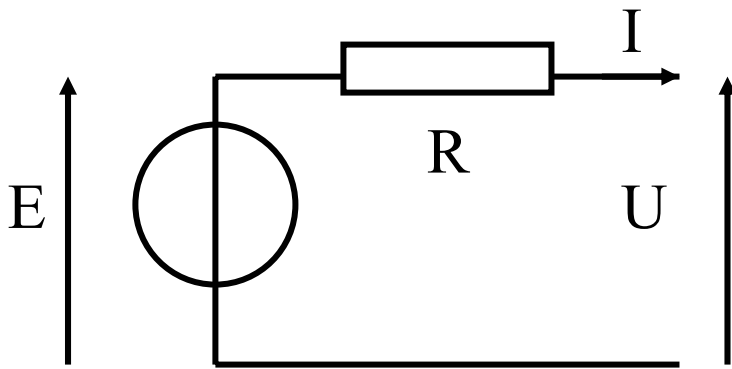
Un système optimisé pour une faible « constante de temps » aura

- un meilleur rendement pour des sollicitations rapides
- et éventuellement une assez forte auto-décharge.

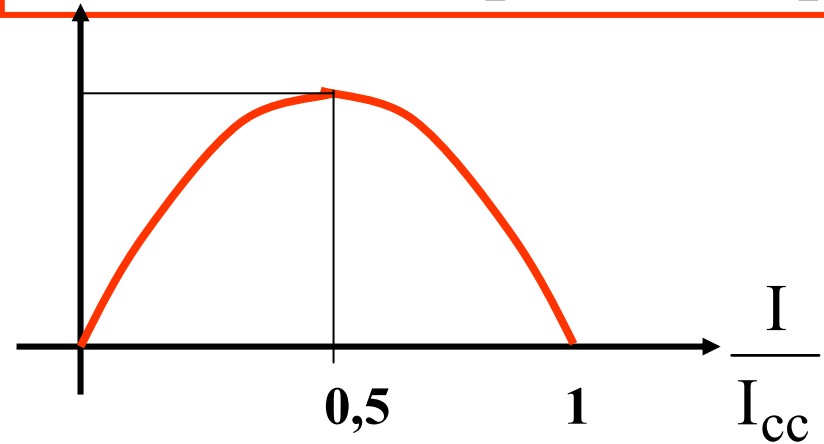
Modèle avec source de tension et résistance interne,

énergie initiale stockée : $W_{\text{stoc}} = E.Q$

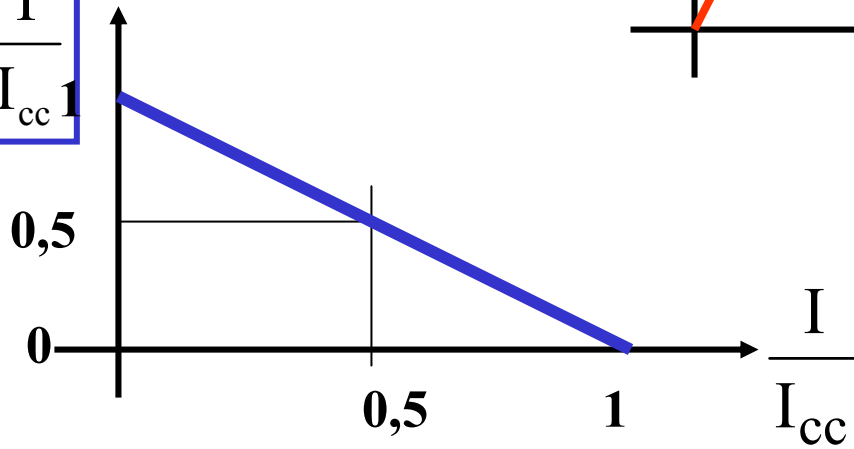
Décharge :



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



$$\eta_{\text{dech}} = 1 - \frac{I}{I_{cc}}$$



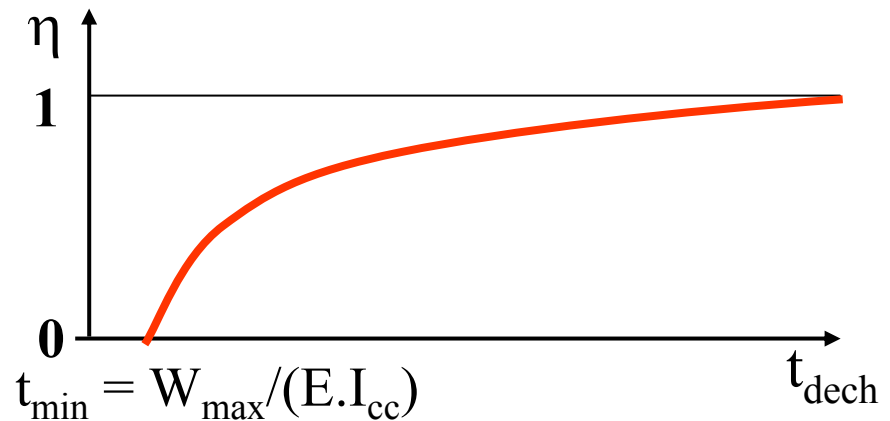
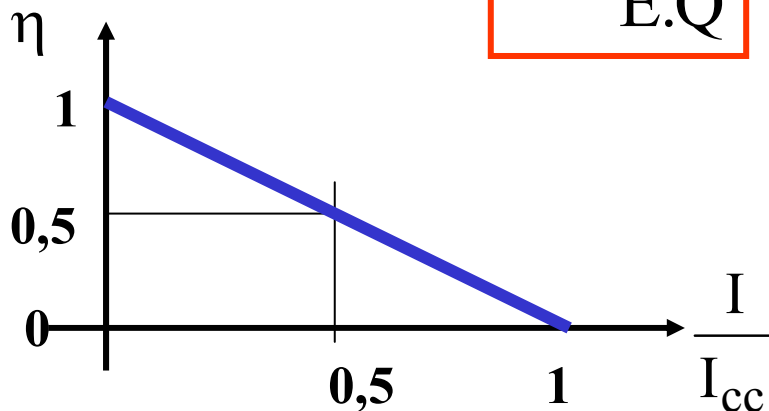
Décharge (ou charge) à courant constant I : durée Q/I donc :
à Q donné, le temps de décharge (ou de charge) est proportionnel à I^{-1}

$$t_{\text{dech}} = \frac{Q}{I}$$

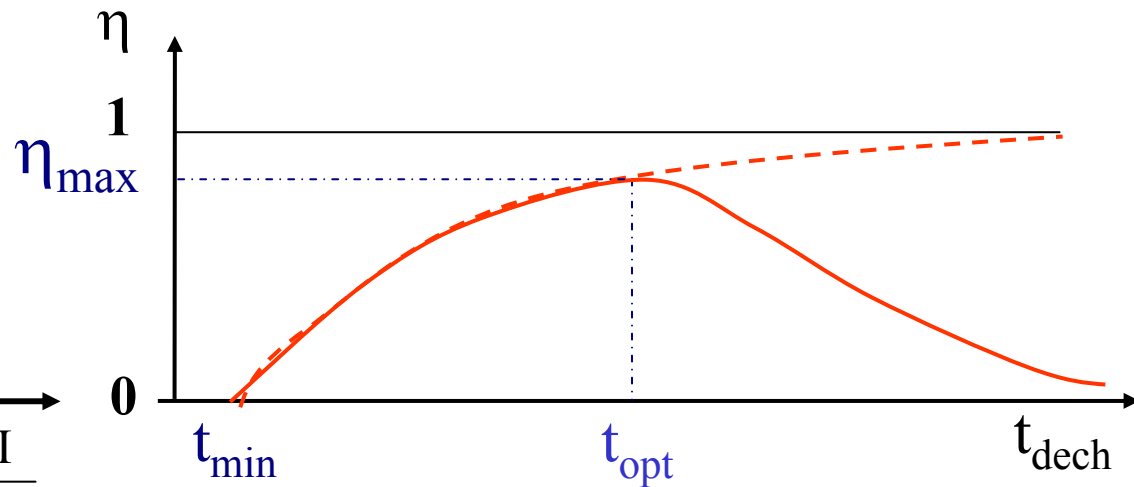
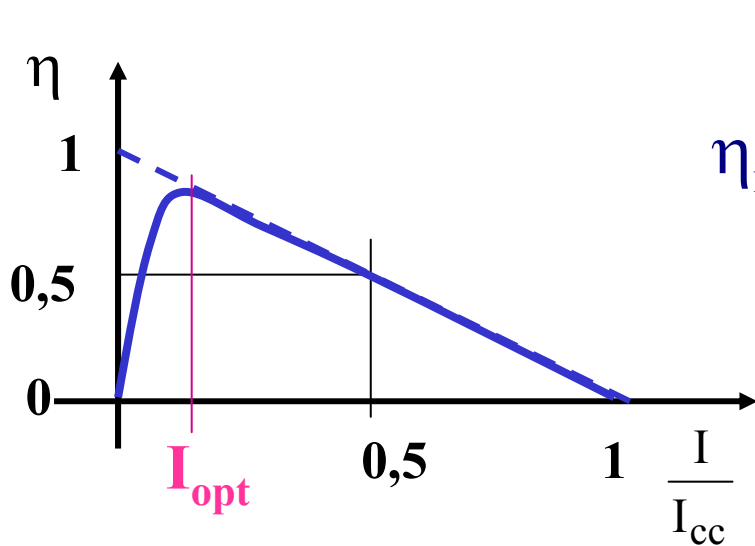
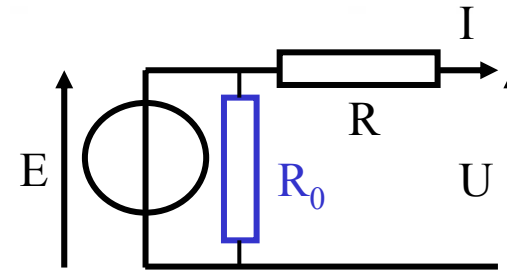
En décharge continue à $I = C^{\text{te}}$:

le rendement en puissance est égal au rendement en énergie

$$\eta = \frac{W_u}{E \cdot Q}$$



En introduisant l'autodécharge
(par exemple : résistance en parallèle sur E) :



Pratiquement, dans un accumulateur, la capacité ou l'énergie récupérable dépend donc du temps de charge ou de décharge.

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 la première cause de vieillissement devant la dégradation thermique classique.

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

Cyclabilité fortement liée à l'amplitude des cycles et/ou à l'état de charge moyen.

Quantification de N_{cycl} délicate => travaux à mener.

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 (dimensionnés en **Energie**)
- en €/kW pour ceux plutôt dimensionnés en **puissance**, à faible constante de temps

Ce qu'il faudrait faire :

coût d'investissement total : $C_{inv_tot} = c_W \cdot W_{util} + c_P \cdot P_{max}$

où c_W et c_P s'expriment respectivement en €/kWh et €/kW

Minimisation du coût : indispensable analyse sur la durée de vie escomptée du système complet incluant le dispositif de stockage.

Les systèmes 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 au plomb-acide 200 €/kWh avec 1300 cycles (*pertes non prises en compte*)

Coût d'usure : 0,15 €/kWh

Ou encore : sur 20 ans avec 1 cycle par jour (7300 cycles), la batterie doit être **remplacée 5 fois**

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

Autres caractéristiques :

- **énergie massique** (particulièrement importante dans les applications embarquées, moindre importance dans les applications stationnaires),
- **énergie volumique**,
- **sécurité** (explosion, rejets...),
- **temps de réponse** (démarrage), etc...

Moyens de stockage d'électricité

Classification fréquente en moyens directs et indirects :

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

Condensateurs :

(en pratique **super-condensateurs**)

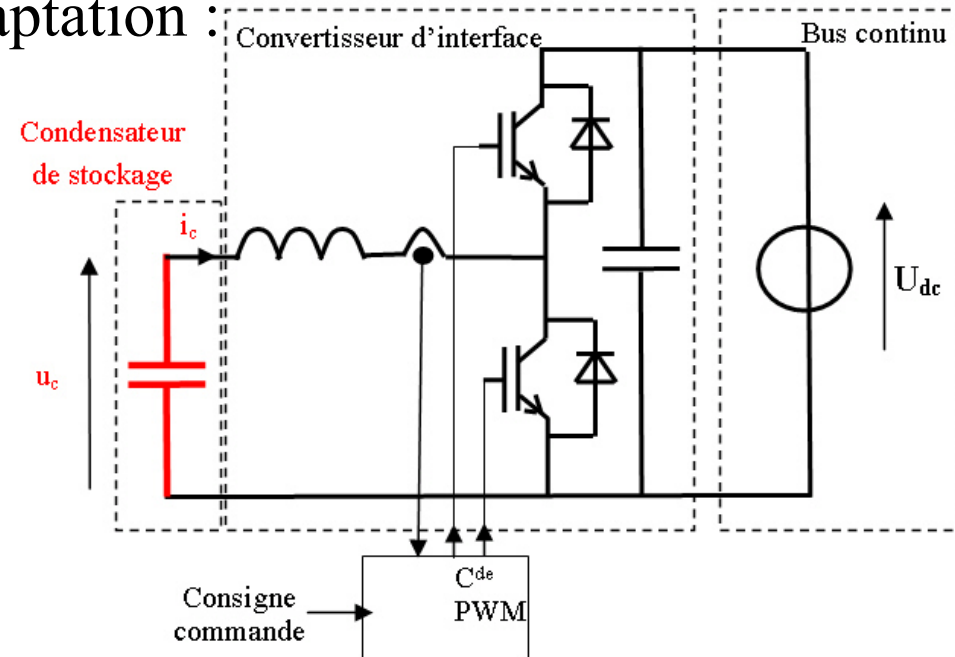
La tension varie avec l'état énergétique $W_c = \frac{1}{2} C.U_c^2$

nécessité d'un convertisseur d'adaptation :

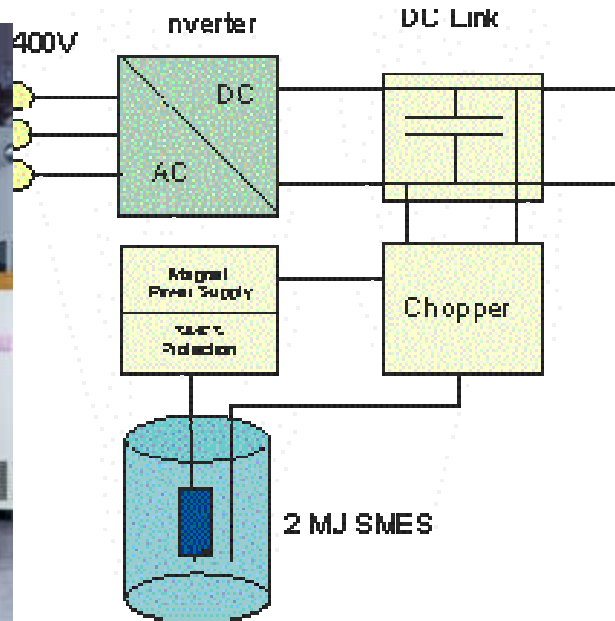
Pour une exploitation de 90%
de l'énergie maximale stockée :
tension mini = 1/3 de U_{cmax}

Alors pour exploiter P_{max} :

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



Inductances supraconductrices (SMES) :



ACCEL Instruments GmbH www.accel.de

2 MJ (0,5 kWh) – 200 kW ($\tau = 10$ s)

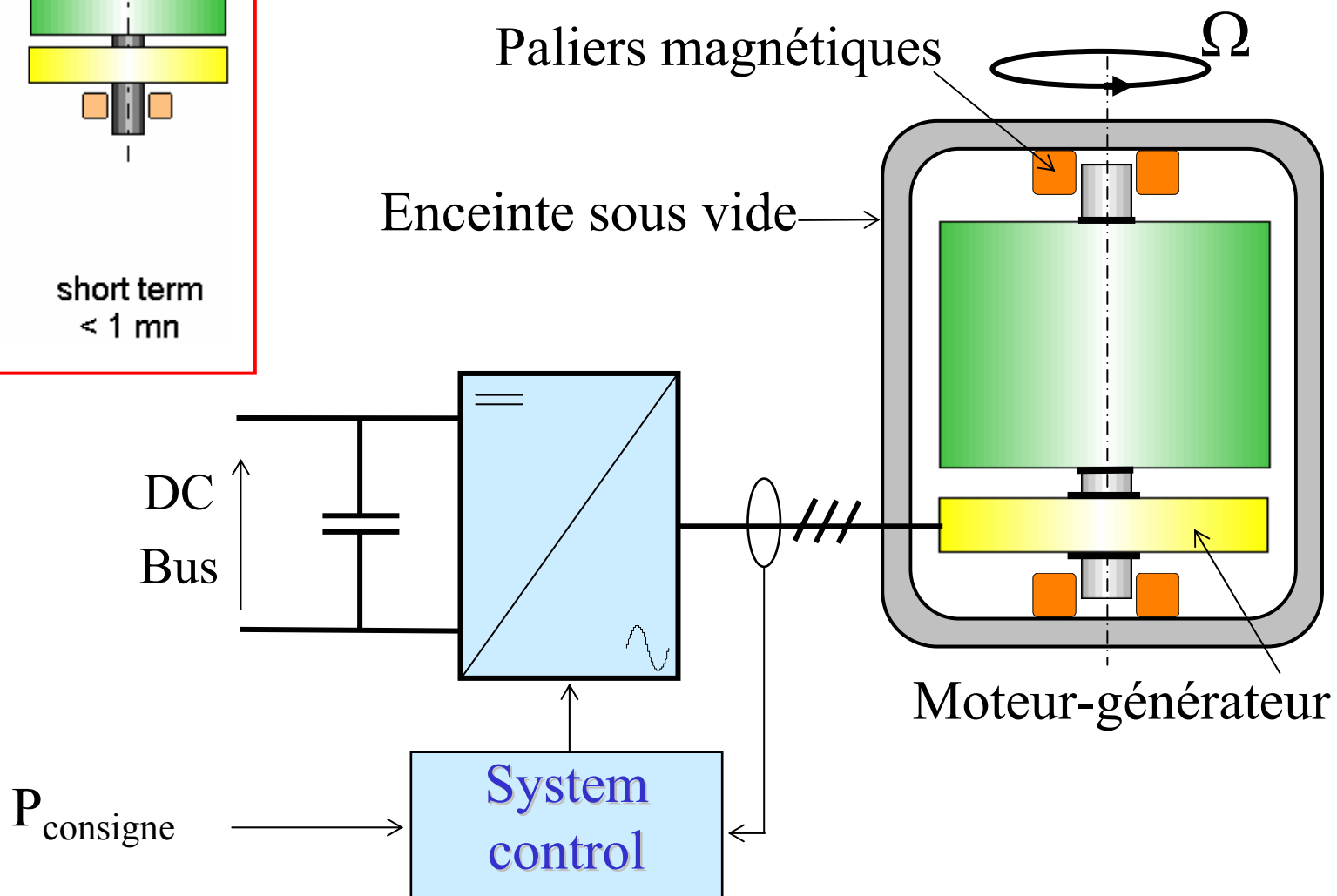
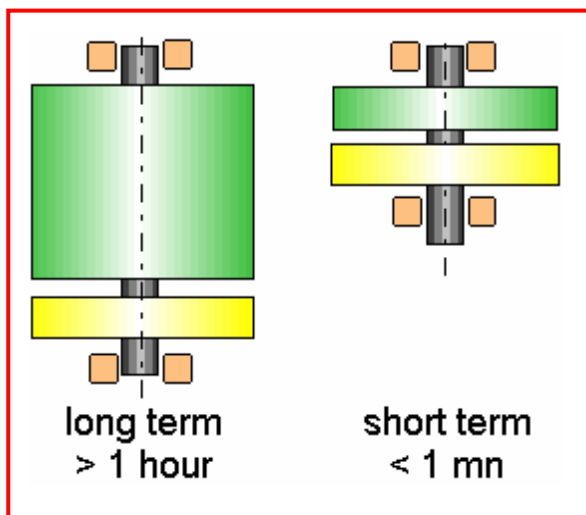
Supra LTC NbTi – 4,5 K

Camion American Superconductor
3MVA application Power Quality

www.amsuper.com

Applications accueilles : faibles constantes de temps,
comme les super-condensateurs

Volants d'inertie (Flywheel Energy Storage) :



Volants d'inertie (suite)

Plutôt utilisés pour les faibles constantes de temps
(produits commerciaux)

ACTIVE POWER

Volant Acier, gamme 160 à 800 kW (masse 1400 à 2250 kg)

vitesse : 7000 tr/mn, tps ch. 20 mn, **tps déch. 15 à 5 sec (≈ 1 kWh)**

Moteur-géné : réluctance variable

vide partiel, paliers hybrides (méca. + magn.)



Mais également des **produits dimensionnés en énergie**

BEACON POWER SYSTEMS

Produit commercial BHE6

$E_{\max} = 6$ kWh, $P_{\max} = 2$ kW **3 heures**

rotor composite 22 500 tr/mn

Sous vide (auto-décharge > 30 heures)

Paliers magnétiques aimants



Prévu pour
être enterré

Accumulateurs électrochimiques :

Nombreuses technologies disponibles
(différents compromis performances – coût)

Plomb-acide

Nickel-Cadmium

Nickel-Metal-Hydrures

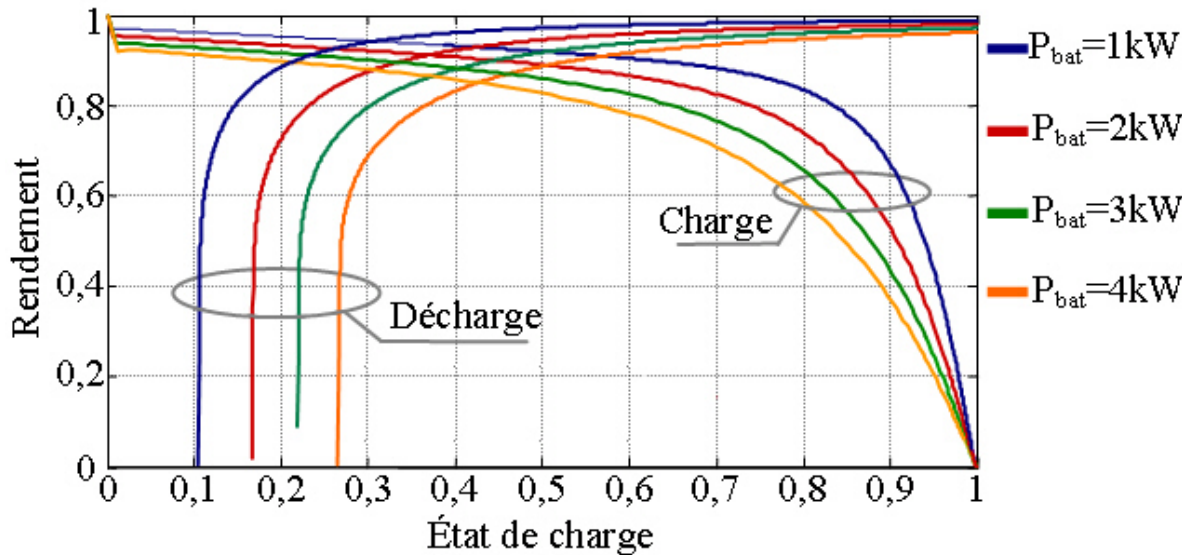
Lithium

Metal-air...



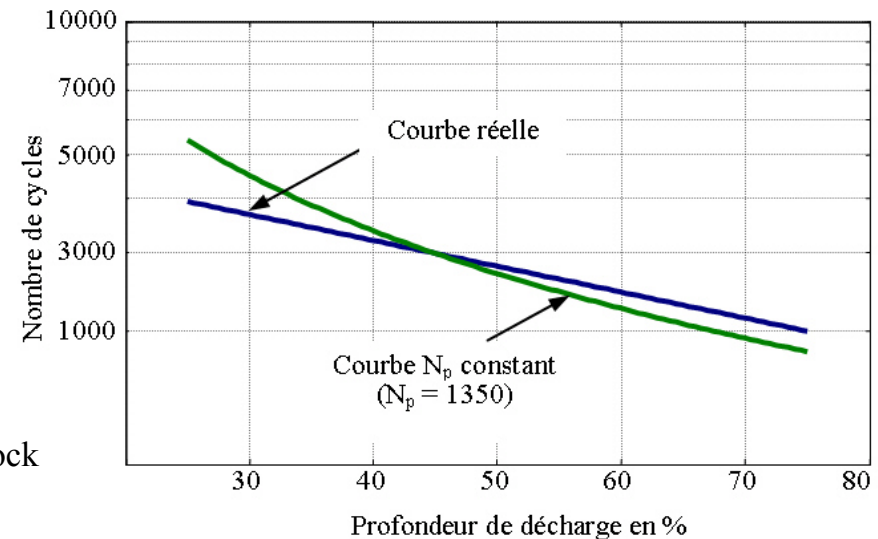
Les valeurs d'énergie massique les plus élevées (30 à 150 Wh/kg)
mais une cyclabilité faible (qq 100 à qq 1000 cycles)

Rendement et cyclabilité d'un accumulateur plomb-acide



Accu : 48 V - C₁₀ 310 A.h
(15 kWh en 10 heures)

$$W_{cumulée} = N_p \cdot W_{stock}$$



Premier comparatif moyens de stockage à petite échelle

Technologie	Inductif Supra- conducteur	Super condensateur	Electro- chimique	Volant Inertie	Air comprimé en bouteille	Hydrogène PAC réversible
Forme d'énergie	magnétique	électrostatique	chimique	mécanique	air comprimé	carburant
Densité d'énergie (accumulateur seul, hors équipements annexes)	1 à 5 Wh/kg	10 Wh/kg → 60 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg (200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq kWh	qq kWh	qq Wh à qq MWh	qq kWh à qq 10 kWh	qq kWh à qq 10 kWh	NA
Constante de temps	qq s à 1 mn	qq s à qq mn	qq 10 mn (NiCd) à qq 10 heures (Pb)	qq mn à 1 h	1 h à qq jours (peu d'auto- décharge)	1 h à qq jours (peu d'autodécharge)

Cyclabilité	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 10 000 à qq 100 000	qq 100 à qq 1000 dégradations chimiques	qq 10 000 à qq 100 000 fatigue mécanique	qq 1000 à qq 10 000 fatigue mécanique	??
Rendement électrique	> 0,9	0,8 à > 0,9 selon régime	0,7 à 0,8 selon techno et régime	0,8 à > 0,9 selon régime	0,3 à 0,5 selon régime	0,3 à 0,5
Connaissance de l'état de charge	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Difficile Paramètres variables	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H2)
Coût en €/kWh ⁽¹⁾	?	50 000 à 150 000 (dimensionnement en puissance)	Pb-acide : 50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (selon techno et performances)	?	500 à 1500
Remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Technologies matures	Coût global compétitif sur la durée de vie	Rendement faible	Intéressant si contexte de réseau d'hydrogène

⁽¹⁾ Attention, le coût est ici intégralement rapporté à l'énergie stockée (donnée différente de c_w)

Moyens de stockage à grande échelle

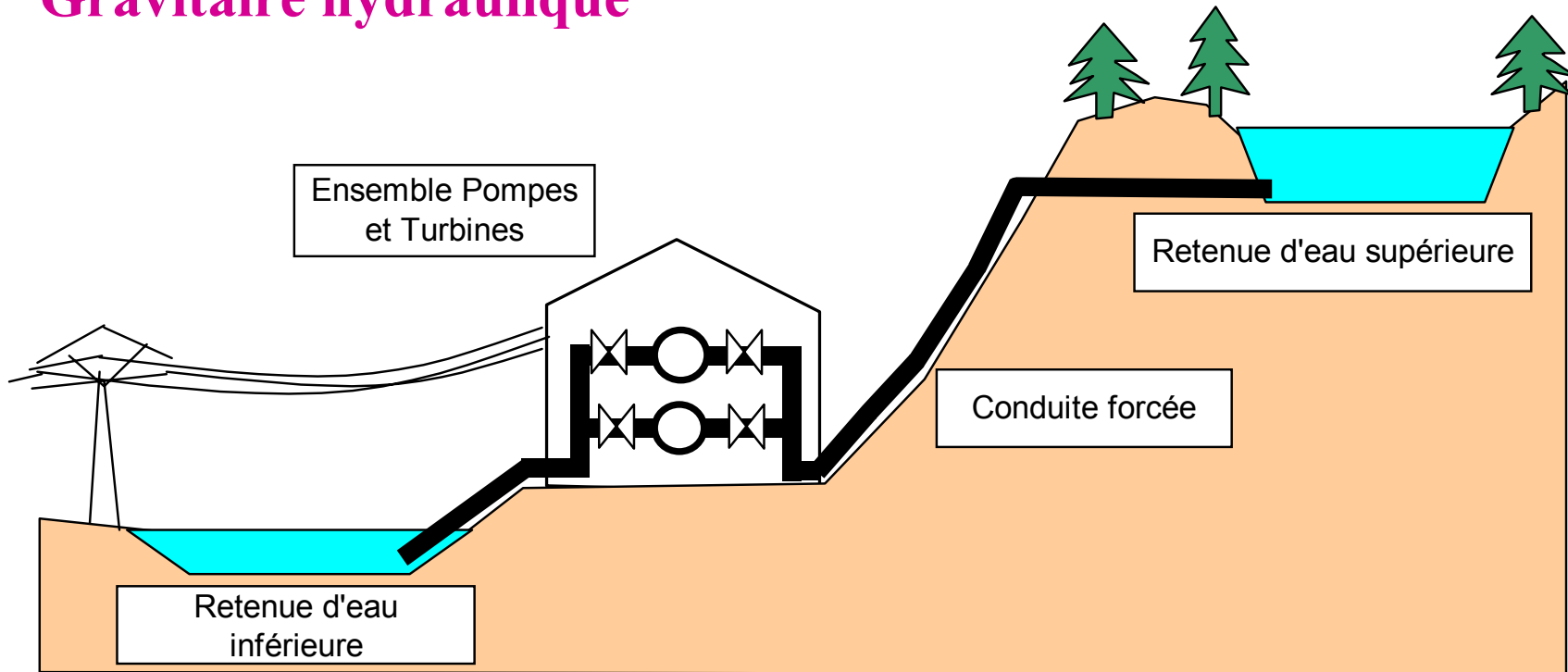
Plutôt destinés à un fonctionnement au niveau du réseau
ou de fermes de « grande puissance »

éoliennes, photovoltaïques, houlomotrices...

Actuellement, on préfère souvent maintenir en chauffe
des centrales thermiques

qu'investir dans des systèmes de stockage

Gravitaire hydraulique



Rendement : 65 à 75 %

Démarrage : 10 à 15 min

Capacité : 1 à qq 100 GWh

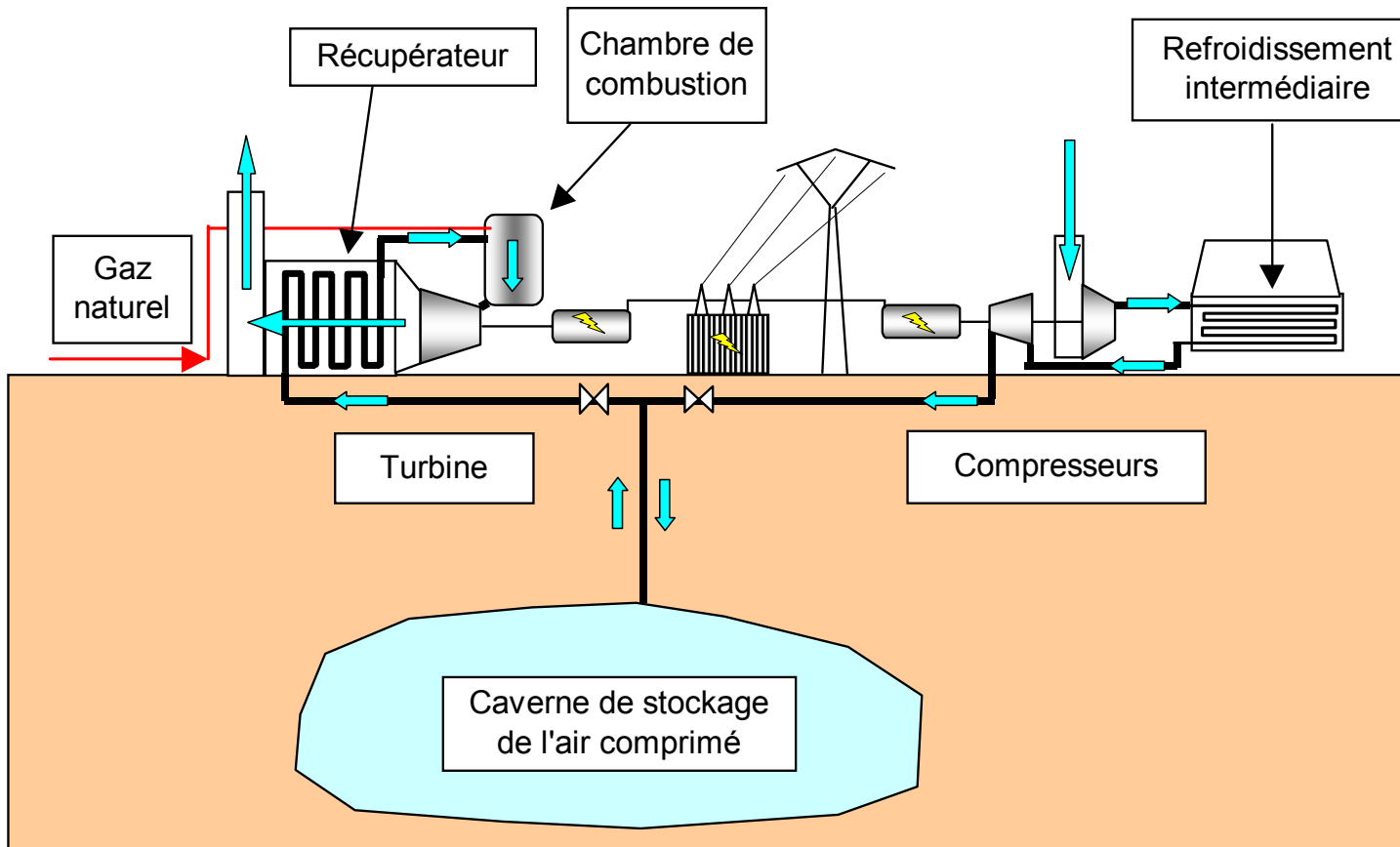
Puissance : 100 à 1000 MW



Exemple : Grand-Maison
935 m de dénivelée, 170 Mm³
400 GWh
12 groupes 150 MW
1400 MW en pompe
1800 MW en turbinage

Données et dessins Jacques RUER, SAIPEM

Air comprimé en caverne



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

290MW, 2 heures

12 kWh/m³ de caverne à 100 bars

Rendement : 50 % (avec apport Gaz)

Démarrage : 5 à 10 mn

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



Batteries électrochimiques : quelques expériences à grande échelle...



Exemple 1 Plomb-acide

Chino - Californie

Capacité : 40 MWh – 10 MW

Coût :

200 Euros/kWh ou 800 Euros/kW

www.electricitystorage.org

Exemple 2 Nickel-Cadmium (1000 tonnes)

Fairbanks Alaska (2003)

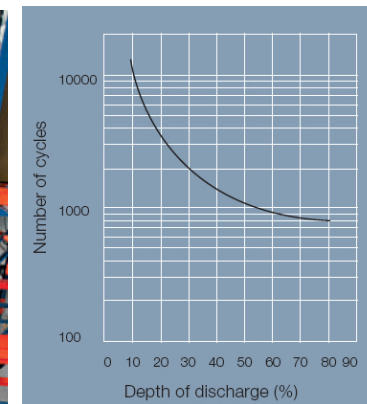
Capacité :

40 MW durant 7 mn (4,7 MWh)

ou 27 MW durant 15 mn (6,7 MWh)

Coût :

4000 Euros/kWh ou 700 Euros/kW



Durée de vie
escomptée :
25 ans

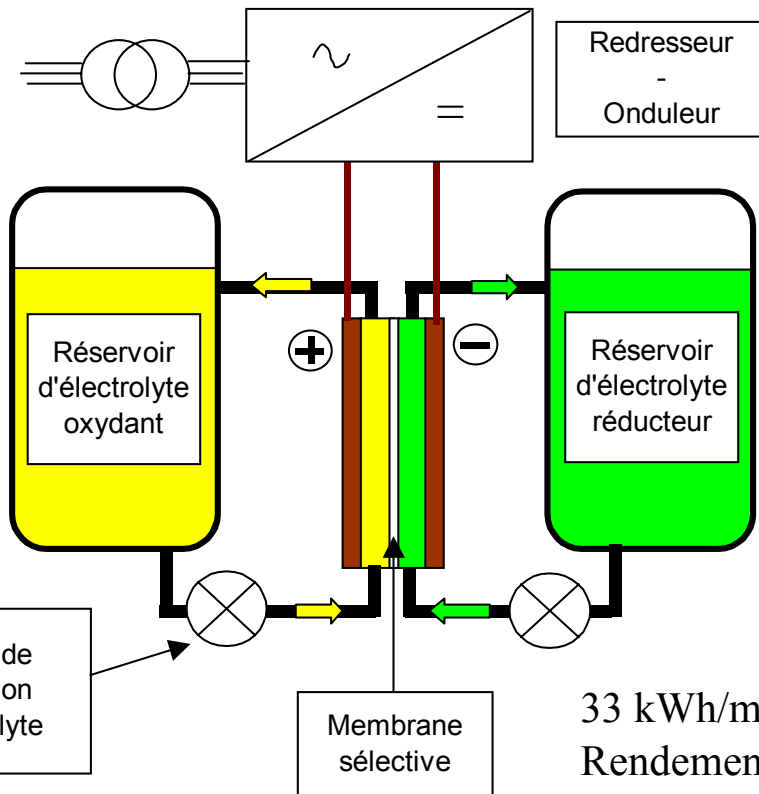
Batteries à circulation

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

3 technologies : ZnBr (Zinc-brome)

NaBr (Sodium-brome)

VBr (Vanadium-brome)



33 kWh/m³

Rendement : environ 70 %

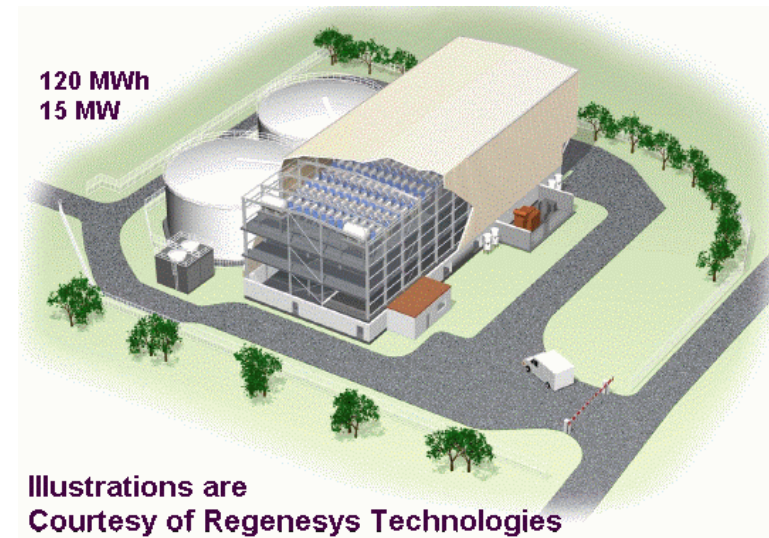
Capacité : 10 à qq 100 MWh

Puissance : 1 à 10 MW

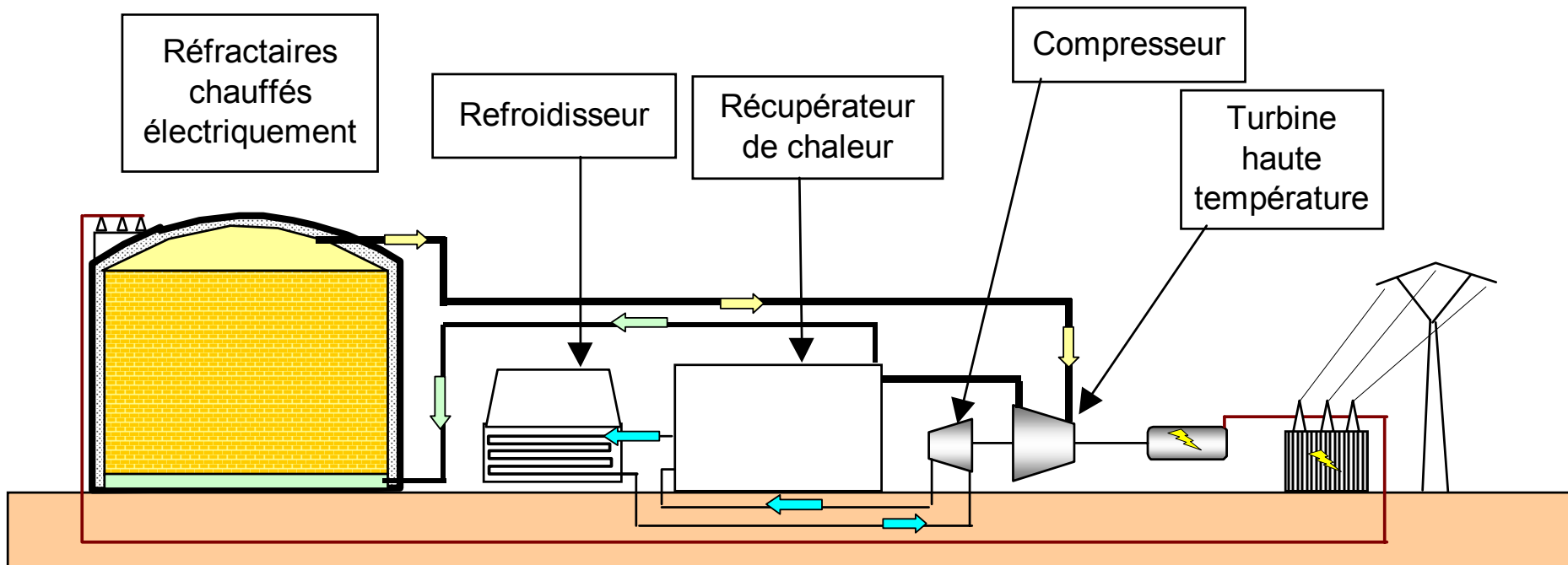
Exemple :

Little Bardford

1800 m³ d'électrolyte



Systeme à stockage thermique : à l'étude



200 kWh/m³

Rendement : environ 60 %

Capacité : 1 à qq 100 GWh

Puissance : 10 à 100 MW

Gaz chauds 1400°C

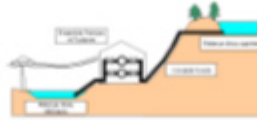


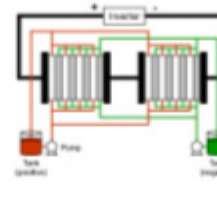

À l'étude,

Pas encore de réalisation.

Potentiel économique et géographique attractif

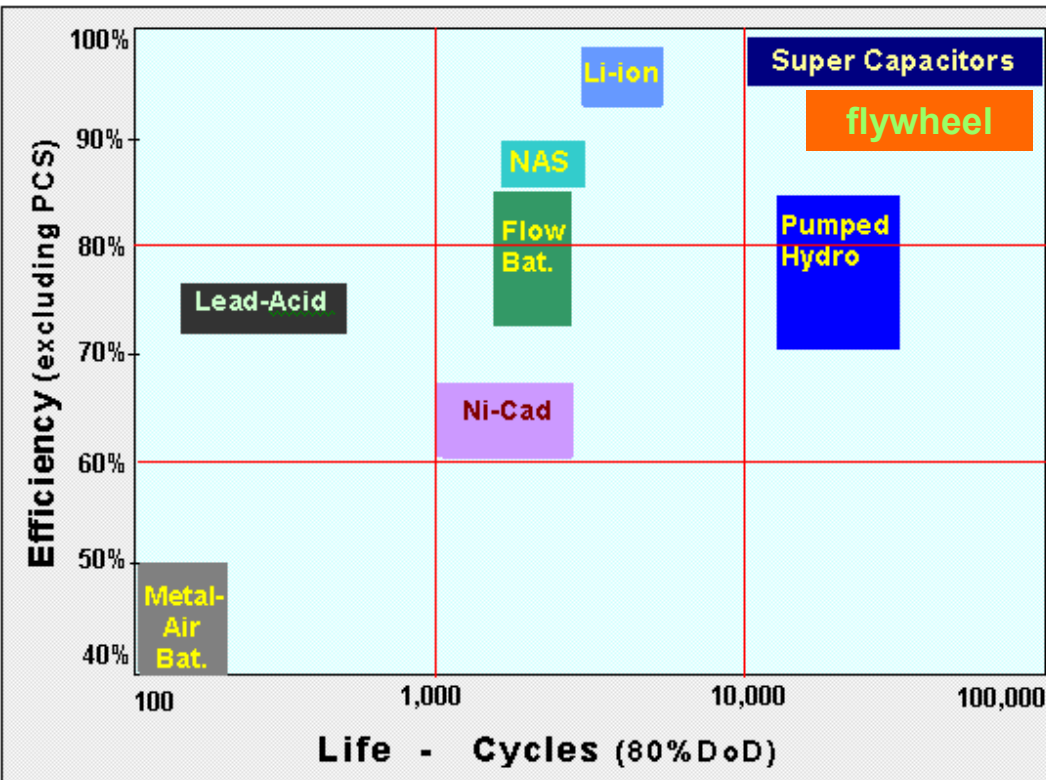
Données et dessins Jacques RUER, SAIPEM

Tableau comparatif moyens de stockage à grande échelle

Technologie	Hydraulique gravitaire	Air comprimé en caverne	Batteries électrochimiques	Batteries à circulation	Thermique à turbine
					
Densité d'énergie	1 kWh/m ³ pour une chute de 360 m	12 kWh par m ³ de caverne à 100 bars	Batterie au plomb : 33 kWh/t Batterie Li-ion : 100 kWh/t	33 kWh/m ³	200 kWh/m ³
Capacité réalisable	1000 – 100000 MWh	100 – 10000 MWh	0,1 – 40 MWh	10 – qq 100 MWh	1000 – 100000 MWh
Puissance réalisable	100 – 1000 MW	100 – 1000 MW	0,1 – 10 MW	1 – qq 10 MW	10 – 100 MW
Rendement électrique	65% - 80%	50% (avec l'apport de gaz naturel)	70% ou moins en décharge rapide	70%	60%
Installations existantes	100 000 MWh 1000 MW	600 MWh 290 MW	40 MWh 10 MW	120 MWh 15 MW	----
Coût €/kWh ⁽¹⁾ et €/kW ⁽¹⁾	70 à 150 600 à 1500	50 à 80 400 à 1200	200 (Pb) à 2000 (Li) 300 (Pb) à 3000 (Li)	100 à 300 1000 à 2000	50 350 à 1000
Maturité	Très bonne	Plusieurs expériences au monde	Plusieurs expériences au monde	En développ ^{nt} prototypes en fonctionnement	A l'état de projet
Remarques	Sites avec dénivelée et retenues d'eau	Sites avec cavernes	Métaux lourds	Produits chimiques	Indépendant des contraintes géographiques

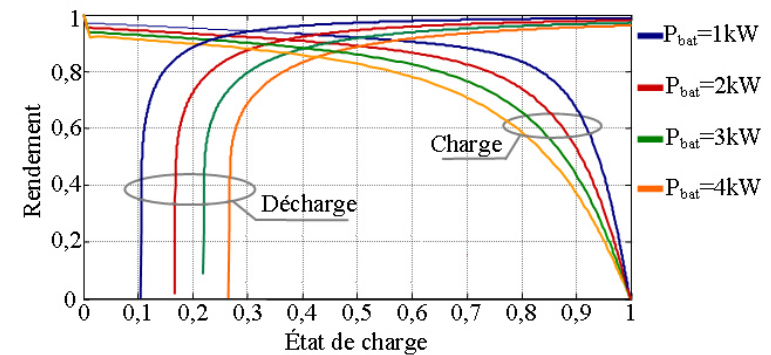
Critères de comparaison :

Cyclabilité, rendement



Attention à la caractérisation du rendement (pb complexe)

Exemple batterie Pb-acide :



Le stockage d'énergie :

enjeu majeur pour permettre une réelle pénétration des ressources renouvelables (électrique, thermique...)

et contribuer au développement durable

Des problèmes techniques : oui, le stockage est difficile mais possible

Problèmes surtout économiques :

le stockage doit devenir compétitif

- ➔ Développement de nouvelles solutions ou de variantes technologiques bien adaptées aux besoins
- ➔ Meilleure définition et caractérisation des besoins
- ➔ Meilleurs modèles énergétiques et de vieillissement

Domaines de faisabilité

UR19978 - 2001 *Energy Storage, a key technology
for decentralised power, power quality
and clean transports*

