

Stockage stationnaire d'électricité : enjeux et perspectives

Technologies, applications,
valorisation, régulation



Andrei NEKRASSOV
EDF R&D

Département Economie, Fonctionnement et Etudes des Systèmes Energétiques
Université d'été – SLC – 8 septembre 2012



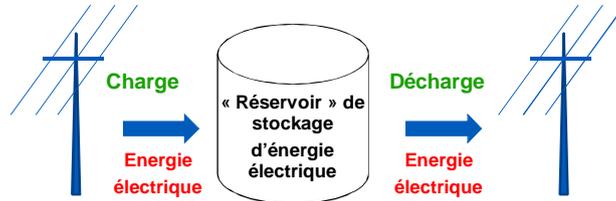
Stockage stationnaire d'électricité : quelques notions

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012



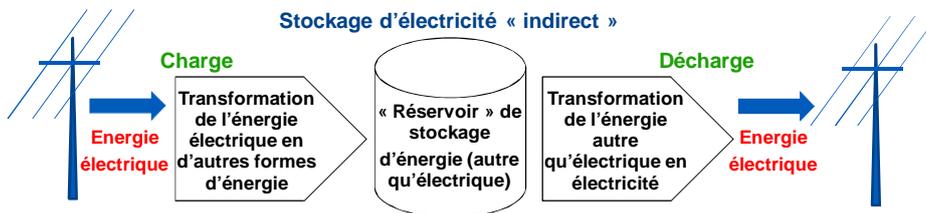
Stockage d'électricité : définition

Stockage d'électricité « direct »



OU

Stockage d'électricité « indirect »



Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

3 EDF

Stockage d'électricité stationnaire: définition

Différents types de stockage d'électricité

Réservoir d'énergie pour opérations autonomes

Systèmes embarqués:

- Téléphones mobiles, ordinateurs portables, ..
- Véhicules électriques;

Systèmes électriques:

- Black Start
- UPS (alimentation ininterrompue)

Pour augmenter la flexibilité

Systèmes électriques:

- Equilibre Production/Consommation
- Sécurité du système / Qualité de la fourniture
- Réduction des congestions / Report des investissements;

Systèmes embarqués:

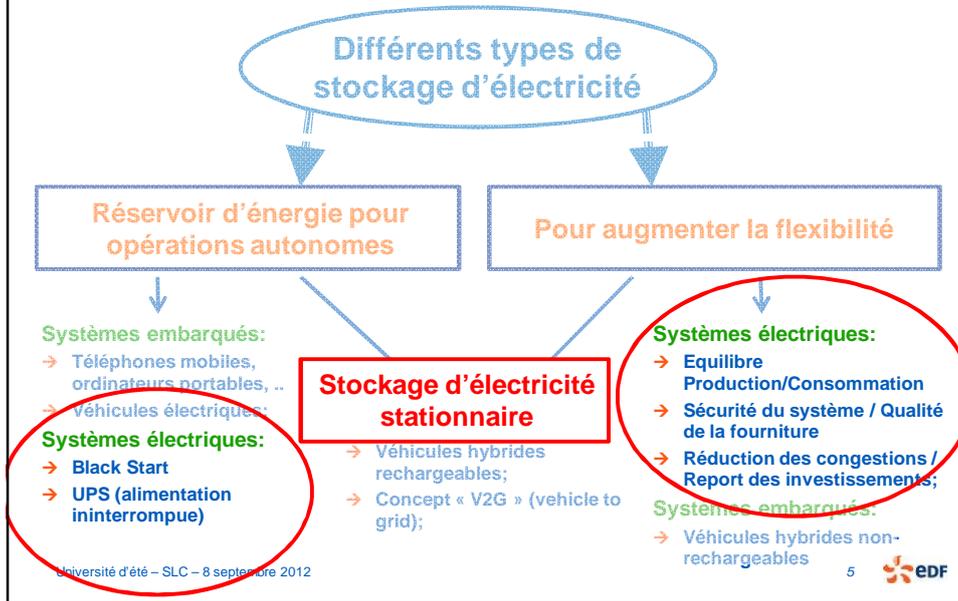
- Véhicules hybrides non-rechargeables

- Véhicules hybrides rechargeables;
- Concept « V2G » (vehicle to grid);

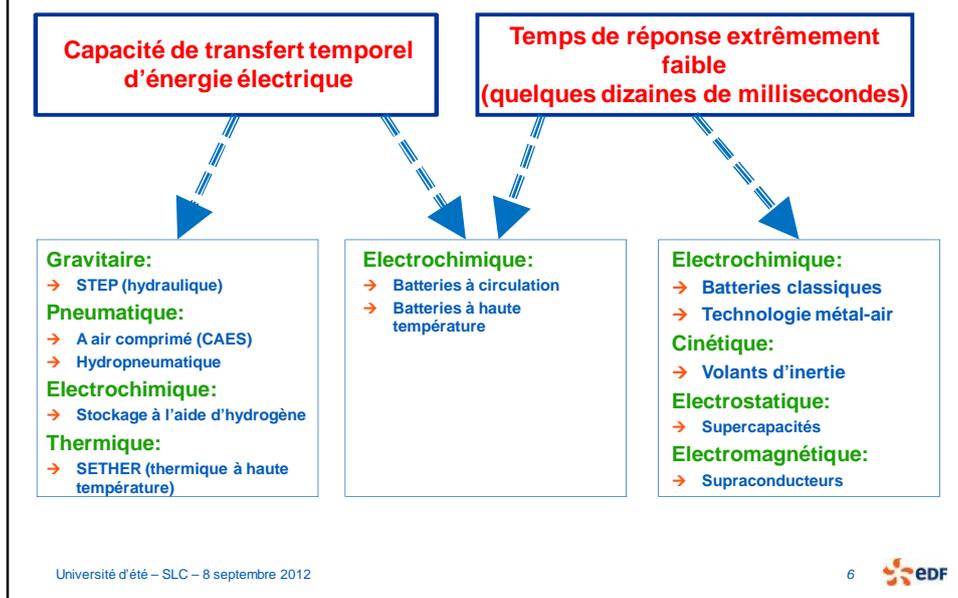
Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

4 EDF

Stockage d'électricité stationnaire: définition



Stockage d'électricité : Deux vertus principales





Stockage stationnaire d'électricité : quelques notions

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012



Le stockage d'électricité : source de flexibilité pour le système électrique

POUR :

- Intégrer les EnR intermittentes (éolien, solaire)
- Intégrer les VE / VHR
- Réduire les émissions du CO₂ du parc de production conventionnel
- Maîtriser des coûts d'approvisionnement des consommateurs
- Assurer la sécurité de l'approvisionnement et la qualité de la fourniture

Mais il existe des solutions "concurrentes" pour apporter de la flexibilité au système électrique :

- Renforcement des réseaux et du parc de production conventionnel
- Développement de la production décentralisée,
- Gestion avancée de la demande d'électricité
- ...



Ainsi, le stockage peut être vu comme une alternative économique à d'autres solutions de flexibilité pour le système électrique

Se pose donc la question de l'évaluation économique du stockage

Approche :

- Identifier les services que le stockage peut apporter au système électrique
- Evaluer les bénéfices potentiels de ces services
- Comparer les bénéfices identifiés avec les coûts du stockage

Difficultés :

- Le champs de l'analyse est trop large :
 - Le nombre de services que le stockage peut apporter au système est très important
 - Le nombre de technologies du stockage est également assez important
- Le niveau d'incertitude élevé quant à la prévision de l'évolution des performances et des coûts de certaines technologies du stockage à long terme
- Sinon, les coûts du stockage sont généralement élevés → difficile d'identifier les cas où le stockage dégagerait une forte rentabilité

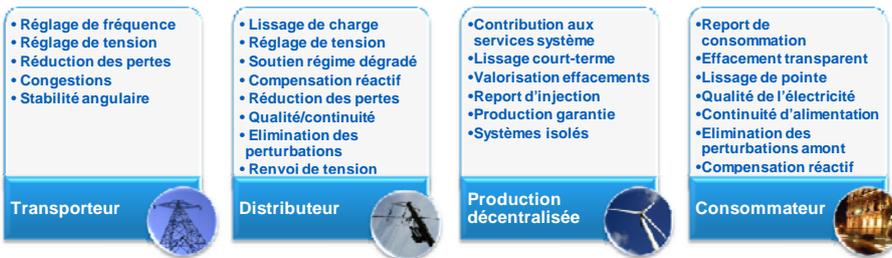


Différents usages du stockage dans le système électrique :

Quelques exemples

Usages du stockage stationnaire d'électricité

- Le nombre total de services que le stockage d'énergie peut fournir aux différents acteurs du système électrique est très important...



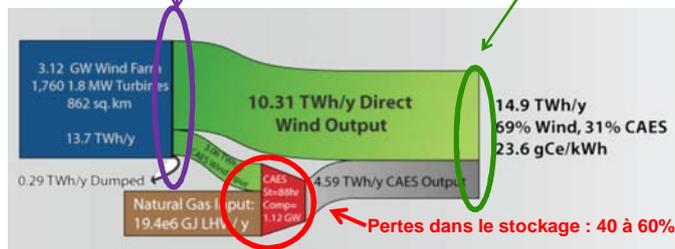
...Mais la question de la **valorisation** de ces services reste souvent difficile à résoudre

Usages du stockage stationnaire d'électricité

- Exemple du couplage du stockage d'électricité avec une ferme éolienne

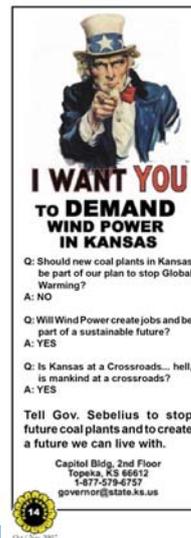
Aucune flexibilité de l'outil de production pour suivre la courbe de charge

L'outil de production dispose d'une flexibilité suffisante pour suivre la courbe de charge



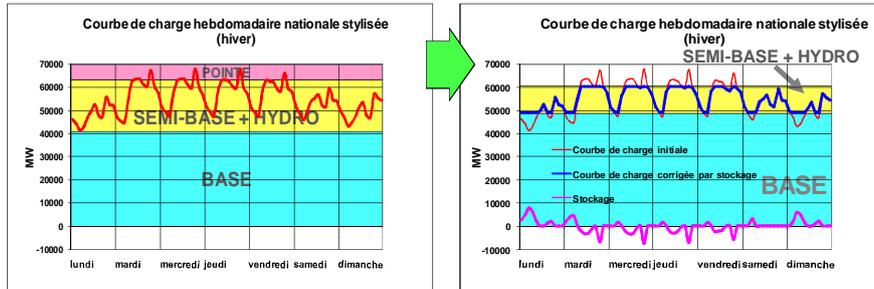
Source : "Wind Coupled To Compressed Air Energy Storage (CAES) For Baseload Power Generation An Integrated Optimization of Wind with Storage", Samir Succar and Robert Williams, Princeton Environmental Institute, Princeton University

Mais est-ce que le stockage est le moyen le plus économique pour augmenter la capacité d'insertion des éoliennes ?



Usages du stockage stationnaire d'électricité

Optimisation de l'opération d'un parc de production



◆ Démarrage des centrales en semi-base à la place de celle de pointe;

◆ Démarrage des centrales en base à la place de celle en semi-base ;

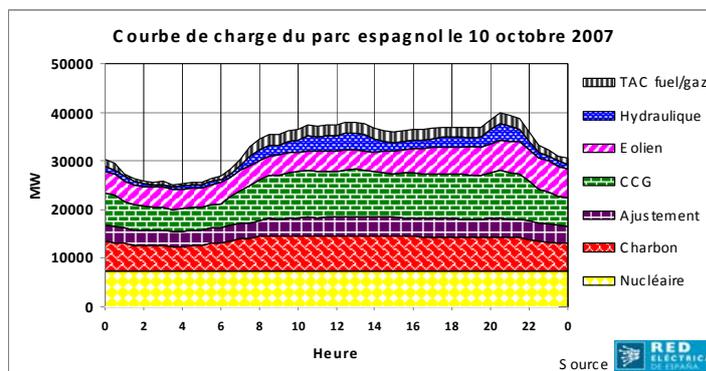
Intérêt : réduction des coûts de production et des émissions du CO2

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

13 EDF

Usages du stockage stationnaire d'électricité

Optimisation de l'opération d'un parc de production : exemple



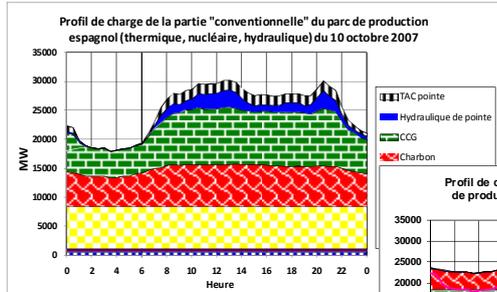
Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

14 EDF

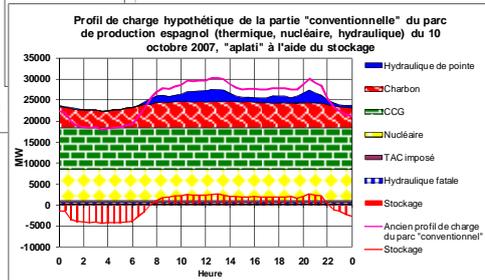
Usages du stockage stationnaire d'électricité

- Optimisation de l'opération d'un parc de production : exemple

Sans stockage



Avec stockage

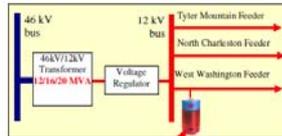


Usages du stockage stationnaire d'électricité

- American Electric Power (USA) : report d'investissement dans les transformateurs

AEP 2006 Project – Battery in an Existing Substation

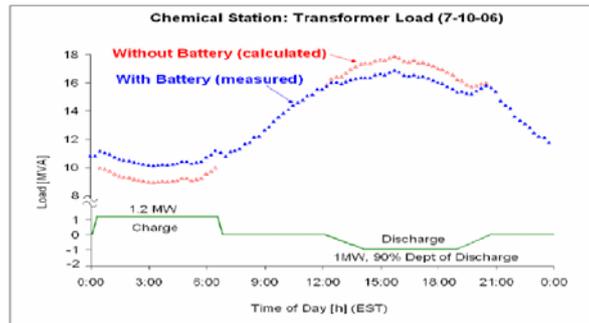
- Installed 1MW, 7.2 MWh of NAS battery on a feeder to defer building a new substation for three years
- Daily Peak Shaving –summer
- Three years of successful operation
- Battery is being moved to a different site



Usages du stockage stationnaire d'électricité

- American Electric Power (USA) : report d'investissement dans les transformateurs

Peak shaving (load leveling).

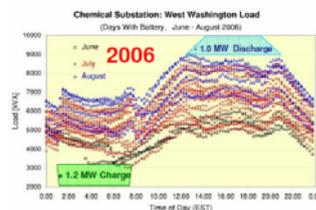


Usages du stockage stationnaire d'électricité

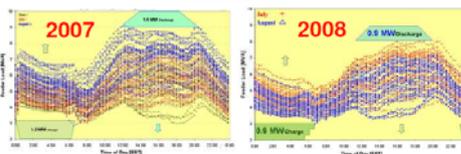
- American Electric Power (USA) : report d'investissement dans les transformateurs

AEP 2006 Project – Performance Data

- Scheduled trapezoidal Charge & Discharge profiles
- Improved the feeder load factor by 5% (from 75% to 80%)
- Reduced the oil temperature of the 20MVA transformer by about 4 degrees C

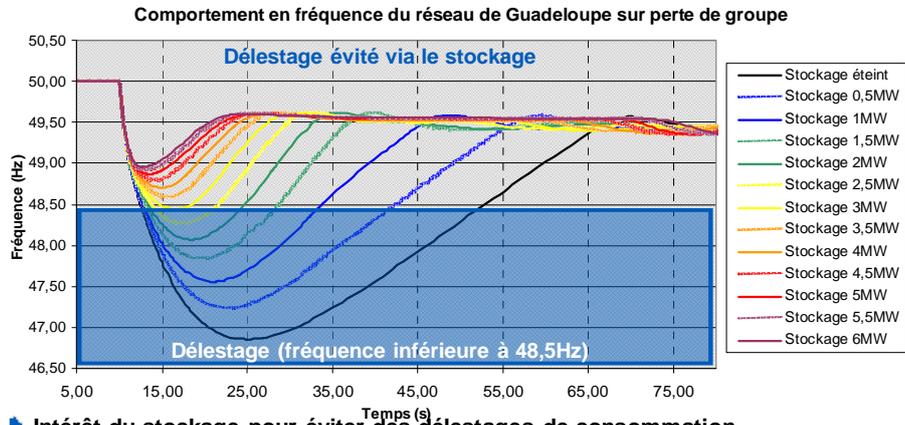


Three Successful Years of Peak Shaving



Usages du stockage stationnaire d'électricité

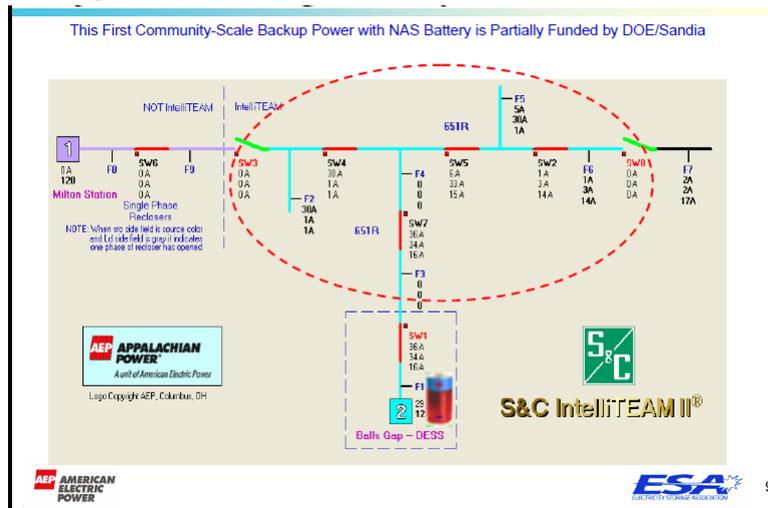
- ◆ Apport du stockage à la dynamique des systèmes insulaires



- ◆ Intérêt du stockage pour éviter des délestages de consommation
- ◆ Une solution potentielle au problème de perte d'inertie électromécanique des systèmes insulaires à forte pénétration des EnR

Source: thèse de doctorat « Contribution du Stockage à la Gestion Avancée des Réseaux de Distribution », Gauthier Deille, 2010
 Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

Utilisation du stockage pour un îlotage dynamique dans le réseau BT



Utilisation du stockage pour un îlotage dynamique dans le réseau BT

- Test Site : Balls Gap, Milton, WV
- Test Date: July 8, 2009
- Island Size: 700 customers
- Time to island customers: 0.5 to 2 min.
- Power Outage Duration: 28 min.
- Time to Exit Island: 6 sec. (not Synchronized)
- Average Island Load: 0.8 MW



This First Community-Scale Backup Power with NAS Battery is Partially Funded by DOE/Sandia



10

Utilisation du stockage pour un îlotage dynamique dans le réseau BT



This First Community-Scale Backup Power with NAS Battery is Partially Funded by DOE/Sandia



11

Verrous techniques pour le stockage d'électricité

- **Rendements** : classiquement 60%-90%. 95% pour certaines batteries, mais les rendements des installations complètes de stockage (batteries + contrôle + ELP,...) restent à améliorer
- **Autodécharge** : son impact sur la performance technique et économique du stockage dépend beaucoup du type d'usage (reports temporels d'énergie très sensibles). Concerne les volants d'inertie (autodécharge entre 2 et 48 heures), mais également les batteries à haute température NaS ou Zebra (cyclages fréquents requis, sinon, apport d'énergie pour maintenir la température)
- **Cyclabilité** : souvent la durée de vie (nombre de cycles charge/décharge) est extrêmement sensible à la profondeur de décharge
- **Coût** : on différencie le coût au kW et celui au kWh
 Batterie NaS : env. 2.5 M€ pour une batterie 1MW / 7.2 MWh installée
 Batteries Li-ion : offres actuelles entre 600 et 1200 €/kWh. Cible future avec très grands volumes de ventes inf. à 300 €/kWh. Possibilité d'utilisation stationnaire après une utilisation en traction / transports : mais compatibilité des spécifications techniques ? Quel *business model* ?

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

23



Marché du stockage d'énergie électrique

- Marché du stockage d'énergie électrique en Europe :

Technologie	Capacité actuelle	Capacités prévues
STEP	45 600 MW	4150 MW
Stockage air comprimé	290 MW (Huntorf)	200 MW (RWE) + ?
Batteries sodium-soufre	Quelques MW (îles)	Qques dizaines de MW
Batteries plomb-acide	20 – 30 MW	?
Batteries à circulation Redox	Env. 20 MW	?
Batteries lithium-Ion	Env. 1 MW	?

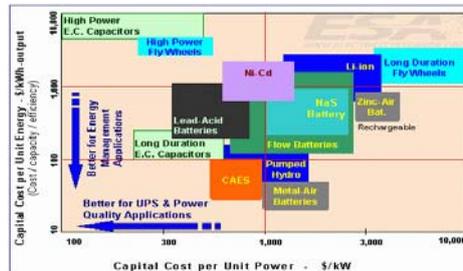
- Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) : technologie de stockage la plus répandue, plus de 100 GW dans le monde, env. 380 STEP
- Autres technologies de stockage : moins de 1% de la capacité des STEP (développement principalement hors de l'Europe)
- Croissance du volume de batteries, en particulier Japon (40 GW d'ici 2030) et USA

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

24



Stockage : une solution de flexibilité parmi d'autres



source ESA (USA)

- Investissement d'une TAC cycle ouvert : env. 500 €/ kW + coûts variables en €/kWh relativement faibles
- Pilotage de charge: < 500 €/ kW (?) + coûts variables en €/kWh élevés
- Le réseau électrique permet le foisonnement de certains aléas à large échelle. Le renforcement des réseaux: 100M€/ 100 km pour des lignes aériennes en 400 kV mais 700 M€ pour 65 km en câble souterrain (future interconnexion Espagne)
- Certaines contraintes sont par nature locales : maintien du plan de tension ou congestions locales de réseaux en cas de forte proportion de renouvelables intermittents

Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

25 EDF



Valorisation du stockage

Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

EDF

Comment valoriser ce service ?

- ◆ Deux grandes méthodes classiques de valorisation des services du stockage pour le parc de production

SUR LA BASE DES FONDAMENTAUX :

Analyse des coûts marginaux du système issus des simulations de son fonctionnement

- ◆ A partir d'un corps d'hypothèses : éléments macroéconomiques, aléas, scénarii,...
- ◆ En tenant compte des fondamentaux du système (coûts d'investissements, coûts fixes, coûts d'approvisionnement, rendements, taux d'indisponibilité, contraintes techniques,...)
- ◆ Permet de se projeter sur des horizons lointains, mais difficulté de prendre en compte l'ensemble des aléas et des contraintes dynamiques

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

SUR LA BASE DU SIGNAL DE MARCHÉ :

Analyse des gains potentiels du stockage en tant qu'outil d'arbitrage sur les marchés

- ◆ Prix de marchés estimés sur la base d'éléments macroéconomiques, d'aléas, d'état du système électrique (demande, interconnexions, régulations,...)
- ◆ Prise en compte du profil d'utilisation du stockage (usages)
- ◆ Le prix intègre l'ensemble des aléas, mais il est difficile de se projeter au delà de quelques années

27 

Valorisation sur la base des fondamentaux

- ◆ Exemples de résultats d'une valorisation marginale de la fonction stockage (valorisation d'1 MW de stockage)

- ◆ Scénario de "base" (prix du baril 40 – 60\$, tonne de CO2 à 25\$) :

→ Pas de rentabilité économique pour le stockage

- ◆ Scénario de "rupture" (baril à 200\$, tonne de CO2 à 150\$) :

→ Le stockage hydraulique (STEP) fonctionnant 2000 h/an avec des capacités de stock d'environ 50 heures pourraient être rentables jusqu'à quelques GW d'insertion

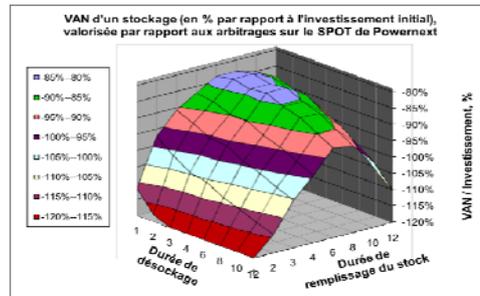
Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

28 

Valorisation sur la base du signal de marché

- ◆ Arbitrages de stockage / destockage en fonction du prix du marché spot
- ◆ Exemple de valorisation d'un stockage sur des prix spot Powernext



- ◆ Rentabilité non avérée sur le spot (France, mais également Danemark)
- ◆ Très forte sensibilité de la valeur du stockage (ici la VAN) aux paramètres techniques (durées stockage / déstockage)
- ◆ Difficile projection d'un dimensionnement technique d'un stockage : nécessaire anticipation des caractéristiques du prix spot dans quelques années (quelle pérennité de ces conditions ?)

Valorisation du stockage : questions substantielles

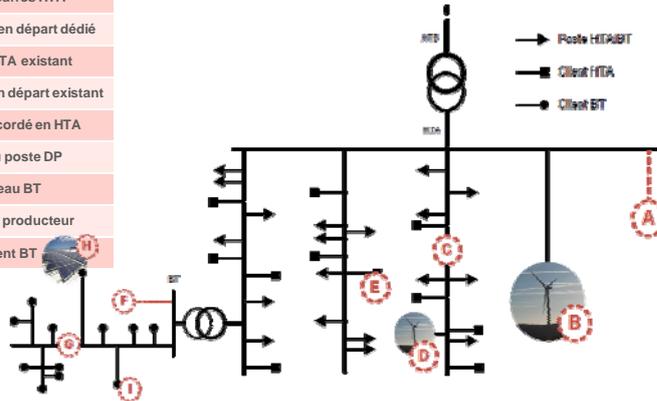
Pourquoi la valorisation du stockage avec des méthodes « classiques » est souvent décevante?

- ◆ Difficile valorisation du stockage pour un seul acteur et un seul service : vision fragmentée de la chaîne de valeur ;
 - ◆ Solution : considérer plusieurs services pour plusieurs acteurs, notamment régulés + dérégulés ;
- ◆ Mais :
 - ◆ Impossibilité pour les gestionnaires de réseaux européens de posséder ou d'exploiter du stockage ;
 - ◆ En cas de partage d'usages, quelles priorités donner ?
 - ◆ Dans un contexte libéralisé, les acteurs dérégulés investissant dans le stockage sont généralement soumis à un niveau de risque élevé (perspectives de spreads sur le prix de marché, conditions / risques réglementaires,...) se traduisant par des critères de rentabilité recherchée (WACC 'dérégulé') ;
- ◆ Peut-on trouver des modèles d'activités innovants, permettant aux acteurs d'accéder à l'ensemble de la chaîne de valeur du stockage?
- ◆ QUID des outils réglementaires incitatifs appropriés pour le stockage?

Valorisation du stockage dans un réseau de distribution

- Quels services, pour quels usages, où situer les moyens de stockage?
- Définition de neuf situations « typiques » pour le stockage distribué.

A	Stockage isolé au jeu de barres HTA
B	Stockage chez un producteur en départ dédié
C	Stockage isolé en départ HTA existant
D	Stockage chez un producteur en départ existant
E	Stockage chez un client raccordé en HTA
F	Stockage isolé en aval du poste DP
G	Stockage isolé en réseau BT
H	Stockage chez un client BT producteur
I	Stockage chez un client BT



Source : thèse de doctorat « Contribution du Stockage à la Gestion Avancée des Réseaux de Distribution », Gauthier Delille, 2010

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

31 EDF

Valorisation du stockage dans un réseau de distribution

- Recouvrements dans une matrice « service/localisation »
- Valeur du stockage liée à l'agrégation de services

Service	Puissance	Temps de déstockage requis	Temps de réponse max.	Fréquence d'utilisation	HTA				BT					
					A	B	C	D	E	F	G	H	I	
SD1 Lissage des transits	500kW-qqMW (HTA) qq100kW (BT)	2-10h	Minutes	Ponctuelle (pointes)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SD3 Réglage de tension	100kW-qqMW (HTA) 10kW-qq100kW (BT)	2-10h	Minutes	Ponctuelle (pointes)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SD4 Compensation de réactif	qq100kvar-qqMvar	(Réactif)	Minutes	Journalière	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SD6 Schéma de secours	100kW-qqMW (HTA) 10kW-qq100kW (BT)	2-10h	Minutes	Exceptionnelle	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SD9 Régime licité	100kW-10MW (HTA) 10kW-1MW (BT)	4-10h	Période électrique	Exceptionnelle	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SPc1 Raport d'énergie	1MW minimum	1-10h	Minutes	Journalière	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SPc2 Support au parc existant	1MW minimum	Variable	Variable	Variable	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ST1 Réglage de fréquence	1MW minimum	20min-1h30	15-30 secondes	Continue	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ST1 insulaire Régimes transitoires	1MW minimum	qq10s	1 seconde	Exceptionnelle	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SPd1 Contribution aux SSS	<qq100kW <2MW (insulaire)	20min-1h30	15-30 secondes	Continue	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SC3 Lissage de la pointe	qqkW (particulier) 0,5-10MW (industriel)	1-10h	Minutes	Ponctuelle (pointes)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
SC7 Compensation de réactif	qq10kVA-qqMVA	(Réactif)	Minutes	Journalière	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SE1 Arbitrage	1MW minimum	Quelques heures	Minutes	Journalière	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

■	Localisation bien adaptée pour ce service
□	Localisation techniquement possible pour ce service sous certaines réserves (agrégation, contractualisation, etc.)
○	Localisation peu ou pas du tout adaptée pour ce service
●	Axe prioritaire d'étude (symbole ■ si spécifique aux réseaux insulaires)
○	Service complémentaire (symbole □ si spécifique aux réseaux insulaires)

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

32 EDF

Source : thèse de doctorat « Contribution du Stockage à la Gestion Avancée des Réseaux de Distribution », Gauthier Delille, 2010

Valorisation du stockage dans un réseau de distribution

- Recoupements dans une matrice « service/localisation »
- Valeur du stockage liée à l'agrégation de services

Proposition : privilégier le potentiel de mutualisation

Problème : où chercher des cas rentables pour le stockage ?

		Temps de	Temps de	Fréquence		HTA			BT					
						A	B	C	D	E	F	G	H	I
SD4	Compensation de réactif	qq100kvar-qqMvar	(Réactif)	Minutes	Journalière	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SD6	Schéma de secours	100kW-qqMW (HTA)	2	Minutes	Exceptionnelle	●	●	●	●	●	●	●	●	●
		10kW-qq100kW (BT)				○	○	○	○	○	○	○	○	○

Utilisation de la matrice pour identifier des cas à étudier

Cas « prosumer »

Insertion des EnR en réseau rural

Service principal : tenue de tension

Et services complémentaires identifiés via la matrice, notamment alimentation de poches îlotées par du stockage après un incident.

Quelques heures de stockage

Cas « insulaire »

Utiliser la dynamique du stockage

Service principal : stabilité en fréquence des réseaux insulaires

Services complémentaires identifiés via la matrice et perspective d'une unité multistockage?

Quelques secondes de stockage

Localisation peu ou pas du tout adaptée pour ce service

● Axe prioritaire d'étude (symbole ● si spécifique aux réseaux insulaires)

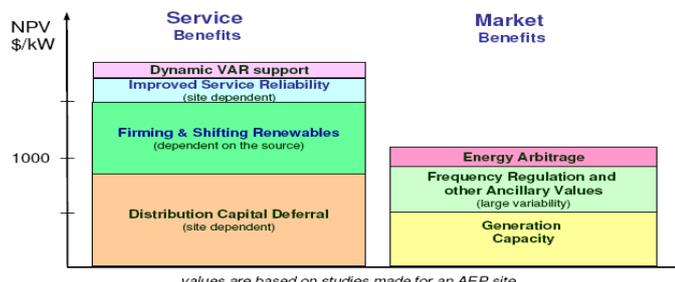
○ Unité de stockage spécifique aux réseaux insulaires

33 

Source : thèse de doctorat « Contribution du Stockage à la Gestion Avancée des Réseaux de Distribution », Gauthier Delille, 2010

Cumuler plusieurs usages pour le stockage : exemple d'AEP aux USA

- American Electric Power (AEP) est impliqué dans des démonstrations de stockage dans ses réseaux (essentiellement des batteries NaS)
- Plusieurs services identifiés par AEP pour le stockage :



- Report d'investissements dans le réseau de distribution en première place
- Report d'énergies renouvelables, services système, garantie de capacité,...
- Principe d'addition de plusieurs usages, donc de revenus : une bonne idée
- Généralisation difficile : compagnie verticalement intégrée, contraintes de réseau particulières, subventions diverses,...



Université d'été – SLC – 8 septembre 2012



Leviers réglementaires pour favoriser le développement du stockage

Approches du stockage dans le monde

Approche japonaise

- Contraintes de développement des EnR dans certaines régions (faiblement interconnectées)
- Spécifications techniques assez simples (lissage de production injectée)
- Conséquences : les producteurs EnR investissent dans le stockage qui se développe fortement (batteries NaS de faible capacité énergétique associées aux EnR - perspectives 40 GW d'ici 2030)

Approche américaine

- Stockage reconnu comme outil de gestion des réseaux T&D depuis 2002
- Contexte d'intégration des EnR et de développement économique (relance)
- Loi ARRA (*American Recovery and Reinvestment Act, 2009*) facilite les investissements dans le stockage utilisé pour améliorer le réseau électrique

Approche européenne

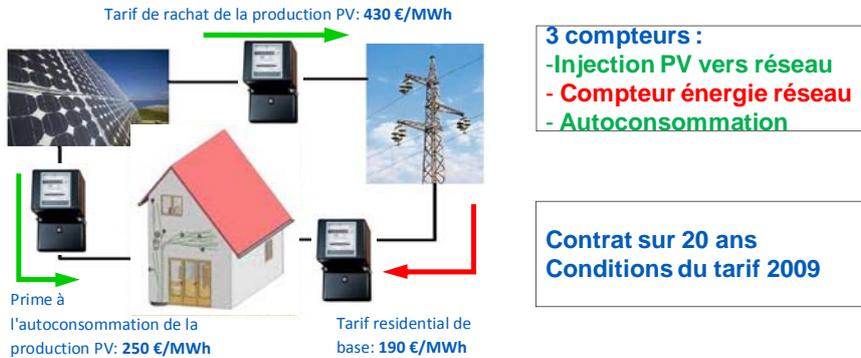
- Un système électrique assez flexible (vaste, très interconnecté, hydraulique, TAC, pilotage de demande, STEP,...)
- Investissements importants dans les réseaux pour accueillir les renouvelables
- Séparation marquée régulé/dérégulé (pas d'intégration des bénéfices potentiels sur la chaîne de valeur)
- Peu de réglementations relatives au stockage d'énergie électrique en Europe
- Intuition largement répandue sur la croissance de nouveaux besoins en stockage
- Vision politique favorable au niveau européen et dans les Etats Membres
- Recherche d'usages et de valorisation économique appuyée par des démonstrateurs

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

36

Exemple d'un tarif résidentiel d'électricité avec une prime à l'autoconsommation

Exemple avec le tarif allemand de rachat de la production PV au clients résidentiels



Incitation à autoconsommer :

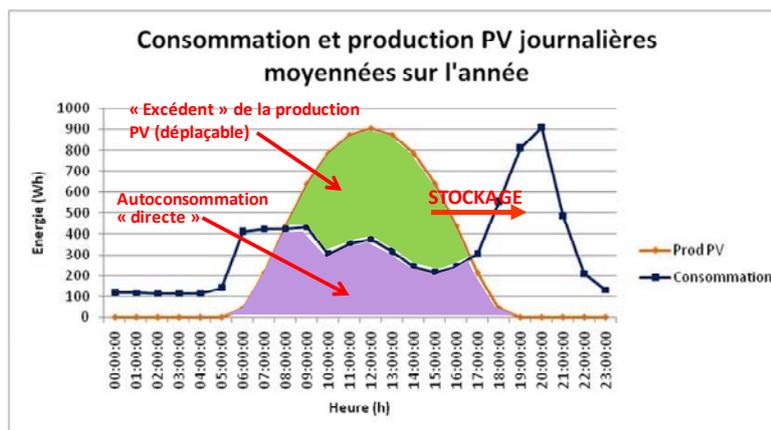
$$[\text{Revenu avec autoconsommation à 100\%}] - [\text{Revenus sans autoconsommation}]$$

$$= 250 - (430 - 190) = +10 \text{ €/MWh}$$

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

37 EDF

Exemple d'un tarif résidentiel d'électricité avec une prime à l'autoconsommation



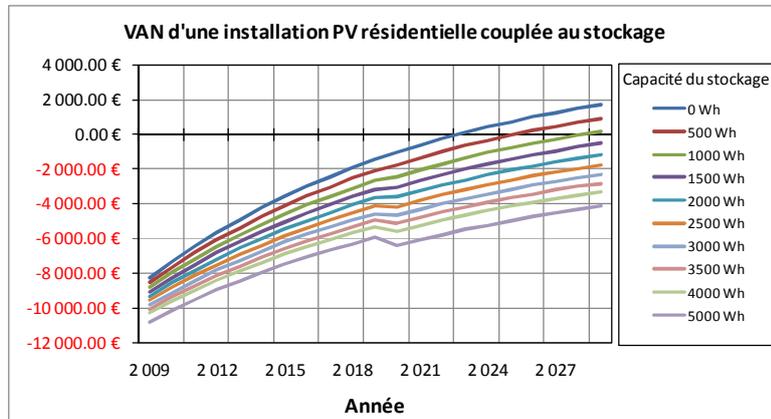
Naturellement une partie de la consommation est déjà synchrone avec la production locale. Le stockage pourrait déplacer le complément (avec des pertes)

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

38 EDF

Résultats de l'analyse du tarif allemand

Valeur économique du projet



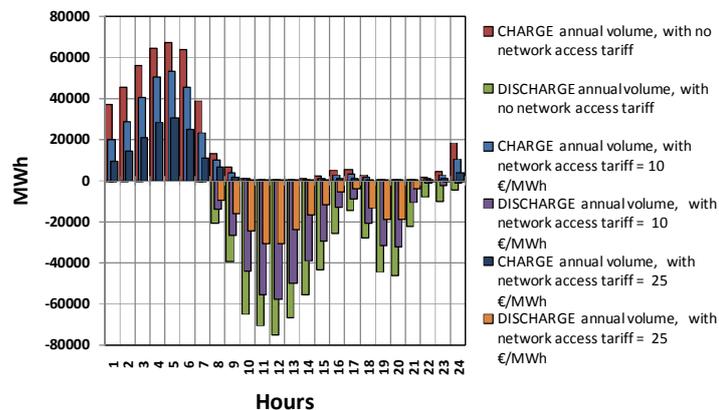
L'utilisation du stockage résidentiel pour augmenter le niveau de l'autoconsommation d'électricité n'a pas d'intérêt économique pour le consommateur

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

39

Exemple de l'impact du tarif d'accès au réseau sur la performance économique d'un stockage à air comprimé (CAES) *

- Simulation des volumes annuels d'énergie accumulés par un stockage CAES dans le cas de son utilisation pour les arbitrages sur le marché SPOT



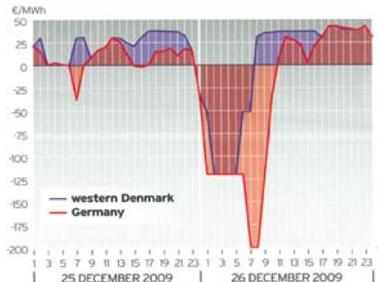
* - Sur la base des résultats des travaux réalisés dans le cadre d'une thèse de doctorat « Intérêts et externalités d'une gestion des stocks dans un système électrique », Xian HE, 2011

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

40

Une réflexion sur le signal prix négatif en tant qu'incitation à l'investissement au stockage

L'opportunité de stocker systématiquement au prix négatif pour revendre au prix de pointe, est-il un signal suffisamment incitatif pour le stockage ?



- Bourse allemande : 23 périodes de prix négatifs entre octobre 2008 et octobre 2009
- Total de 60 h (inf. 1% du temps sur l'année)

- ◆ L'injection des énergies renouvelables intermittentes n'est pas guidée par des considérations économiques ou de demande, mais souvent par des tarifs d'achat avec priorité d'accès
- ◆ Conséquences ponctuelles : prix < 0 (si techniquement les bourses le permettent)
- ◆ Va-t-on rencontrer ce phénomène de plus en plus souvent ?
- ◆ Des évolutions réglementaires à attendre pour corriger ou limiter ce phénomène
- ◆ A priori une mauvaise piste pour la valorisation du stockage
- ◆ Travaux de recherche en cours sur le sujet



Synthèse

Synthèse

- ◆ Les technologies de stockage sont variées, mais chères
- ◆ Les performances sont perfectibles (rendement, durée de vie)
- ◆ Besoin de R&D techno chez les constructeurs pour progresser en coûts et performances
- ◆ Besoin de démonstrateurs pour valider les performances et les usages des technologies actuelles
- ◆ Le stockage peut souvent jouer sur plusieurs éléments de valeurs qu'il convient d'agréger. On a donc besoin de travaux sur l'identification des services rendus, les valeurs associées, et les méthodes d'intégration de ces valeurs
- ◆ Les arbitrages sur le marché spot ou la gestion de l'intermittence des EnR fatales ne sont pas les uniques, voire les plus importantes, sources de valeur du stockage
- ◆ L'agrégation de valeurs pose le problème des intérêts des acteurs : interactions régulé / dérégulé, interactions dérégulé / dérégulé

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

43 

Merci de votre attention



IL VAUT MIEUX POMPER MEME S'IL NE SE PASSE
RIEN QUE RISQUER QU'IL SE PASSE QUELQUE CHOSE
DE PIRE EN NE POMPANT PAS.

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

44 



Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

ANNEXES

Principales technologies du stockage stationnaire d'électricité

45 

Technologies du stockage d'électricité

▀ Caractéristiques principales

■ Performances générales:

- ⊕ Puissance maximale
- ⊕ Energie stockable
- ⊕ Durée de fonctionnement à puissance nominale
- ⊕ Temps de réponse

■ Rendement

- ⊕ Rendement global (AC/AC or DC/DC)
- ⊕ Autodécharge

■ Dimensions

- ⊕ Energie spécifique
- ⊕ Surface/volume par kW/kWh

■ Coûts

- ⊕ Coût d'investissement
 - > Par kW
 - > Par kWh
- ⊕ Coûts opération / maintenance
 - > Coûts fixes
 - > Coûts variables

■ Durée de vie

- ⊕ Calendaire
- ⊕ Nombre de cycles

■ Autres caractéristiques

- ⊕ Impact environnemental
- ⊕ Maturité
- ⊕ Acceptabilité publique

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

46 

Technologies de stockage stationnaire d'électricité

- ▀ L'offre technologique est déjà présente, avec de nombreux développements et innovations en cours et à venir
- ▀ Un référentiel de technologies de stockage avec capacité, coûts par kW et par kWh, maturité, durée de vie, rendements,...

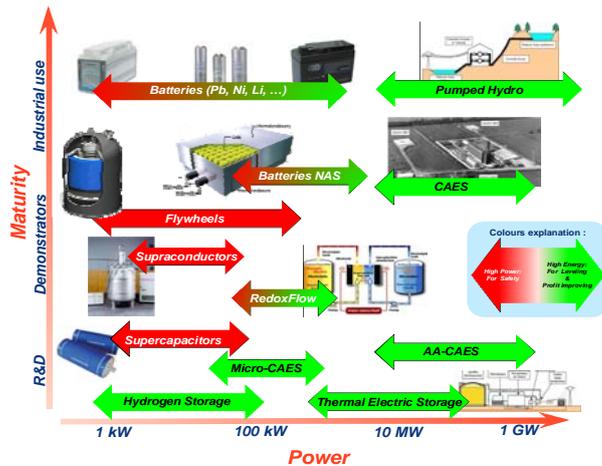
Système de stockage	Caractéristiques principales (densité énergétique, puissance, rendement, durée de vie)	Rendement (AC/AC)	Durée de vie	Part du coût d'investissement proportionnelle à la puissance (€/kW)	Part du coût d'investissement proportionnelle à l'énergie (€/kWh)	Verrous
Stockage hydrogénéomastique	• 1-4 kWh/m ³ d'air • 100 kW à 1 MW / unité • qq heures	0,75	20-30 ans	600 ... 1000	200 ... 500	La technologie est en phase R&D (Prototypage de 15 kW annoncé par ENAYRES). Les verrous principaux sont liés aux problèmes de corrosion des composés mécaniques et à la résistance des matériaux des réservoirs de stockage.
Stockage thermique haute température	• 35 à 20 kWh/m ³ • 1 à 100 MW • 1-30 heures, typiquement < 10	0,7	25-30 ans	450 (coûts 2004, estimation optimiste)	50 (coûts 2004, estimation optimiste)	A l'heure actuelle, la technologie n'est qu'au niveau d'un concept. On suppose que les verrous technologiques se situent au niveau des turbomachines (compresseurs) et au niveau du stockage de chaleur. Un travail assez consistant en matière de R&D sera nécessaire pour valider la technologie au point.
Batteries à circulation (Redox Flow, Vanadium Redox, Zinc, etc.)	• 12 à 18 kWh/kWh • qq kW à qq MW • jusqu'à 10 heures	0,6 - 0,75 (0,75 - 0,85 pour D/C/D/C)	15 ans voire plus	1000-2000	100-400 pour VRF	VRB (Vanadium Redox) : une seule entreprise (Prodent Energy, Chine) possède aujourd'hui l'essentiel des brevets mondiaux pour VRB (le japonais Sumitomo a aussi qq brevets limités au territoire japonais). Actuellement, cette technologie se trouve plutôt au stade R&D/Expé. EPR (Polyvanadium Redox) : la technologie démontre aujourd'hui par une seule entreprise (Prodent Energy, Chine), qui ne la développe pas, car privilégie la technologie VRB (Vanadium Redox). Aucun démonstrateur n'est réalisé (ni planifié) à ce jour. Zinc : technologie développée par Fluoron Systems (Ecosse), mais se trouvant clairement au stade R&D, pas de réalisations à court terme.
Batteries à circulation Li-Ion	• 30 à 40 kWh/kWh • qq kW à qq MW • 2 - 2,5 heures	0,85 - 0,90 (pour D/C/D/C)	10 ans	1000-2000	sans objet, car le coût d'investissement est proportionnel à la puissance de la batterie	La plus importante barrière technologique est la durée maximale de la décharge, qui est limitée à 2000 Pas de solutions réalisées à notre connaissance pour augmenter cette durée.
Batteries Acide/Basse conventionnelles	• 25-35 kWh/kWh • qq kW à qq MW • 1 à 8 heures	0,6-0,7 (0,70 - 0,85 pour D/C/D/C)	3 - 5 ans 200 - 300 cycles profonds	100-500 (indicatif)	sans objet, car le coût d'investissement est proportionnel à la puissance de la batterie	Cette technologie conventionnelle est peu chère mais très peu performante (cyclage très limité, poids et encombrement excessifs, durée de vie faible, ...)
Batteries Acide/Basse avancées	• 90 - 160 kWh/kWh • qq 10 W à 20 MW • 1 à 8 heures	0,6 - 0,7 (0,70 - 0,85 pour D/C/D/C)	10 - 12 ans jusqu'à 2000 de cycles profonds	250 ... 350 (indicatif)	sans objet, car le coût d'investissement est proportionnel à la puissance de la batterie	Les Pb-Acide sont cyclés. Plusieurs Exsida Technologie
Batteries à base de Lithium	• 60-180 kWh/kWh • qq kW à qq 100 kW • (qq MW prochainement) • qq heures	0,7-0,75 (0,85 - 0,90 pour D/C/D/C)	10 ... 15 ans (estimations)	600-1500 (indicatif)	sans objet, car le coût d'investissement est proportionnel à la puissance de la batterie	Les prix de ces Li sont les véhicules moyen et long ter actuellement en applications stationnaires restent toujours en stade de la R&D.

Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

47 

Technologies de stockage d'électricité

▀ Puissance versus Maturité

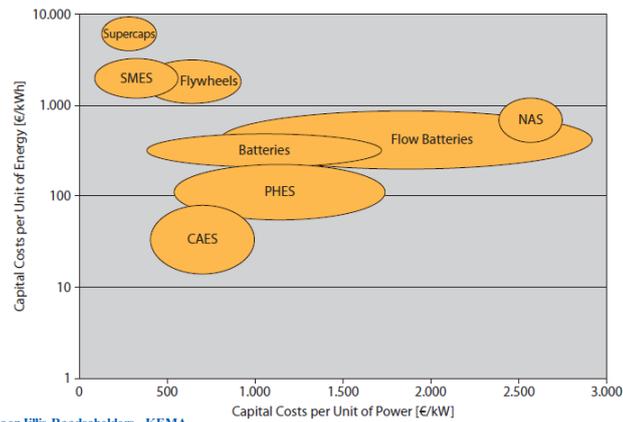


Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

48 

Technologies de stockage d'électricité

- ◆ Comparaison des coûts (par kW et par kWh) des principales technologies du stockage d'électricité stationnaire



Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

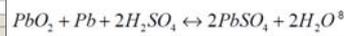
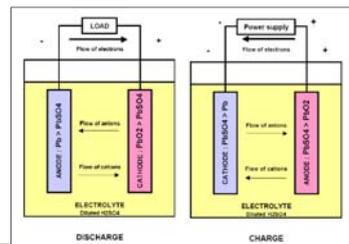
49 EDF

Batteries conventionnelles

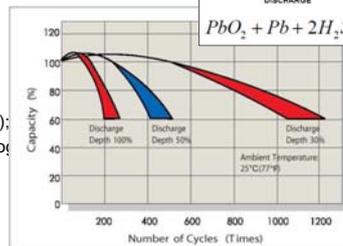
Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certaines technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

- ◆ Batteries Plomb-Acide

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
Qq 100W- Qq 10MW	25-35 Wh/kg	100-500	1 – 8 h	70-75 avec surcharge, 80-85 sans surcharge



- Avantages
 - ✦ Capacité (technologie avancée) ;
 - ✦ Faible volume (technologie avancée);
 - ✦ Bonne densité énergétique (technologie avancée);
 - ✦ Coût d'investissement modéré
- Inconvénients
 - ✦ Faible rendement
 - ✦ Faible durée de vie (cyclage)
 - ✦ Impact environnemental potentiellement non-négligeable



Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

50 EDF

Batteries conventionnelles

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Batteries à base de Lithium

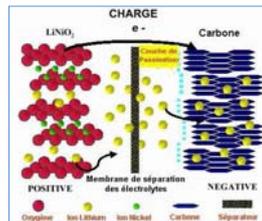
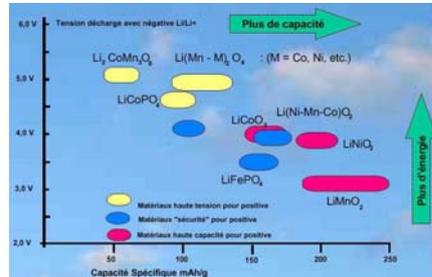
Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
Qq kW - qq 10 de MW	60-90 Wh/kg (HP), 120-180 Wh/kg (HE), 140-180 Wh/kg (LP)	> 1000	Qq min - 1 h	85-90 ou plus

Avantages

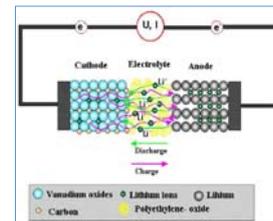
- ⚡ Haute densité énergétique ;
- ⚡ Bon rendement ;
- ⚡ Durée de vie, cyclage ;
- ⚡ Faible impact environnemental.

Inconvénients

- ⚡ Sécurité;
- ⚡ Besoin d'une régulation thermique;
- ⚡ Coût



→ Lithium - Ion



→ Lithium - Polymer

Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

51 EDF

Batteries à haute température

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Batteries Sodium-Soufre

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
50kW-qq 10 MW	100 - 120Wh/kg	1000-1500	6 - 9 h	85 - 90



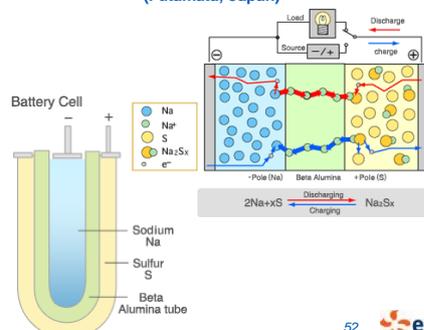
34 MW NAS alongside 51 MW Wind Farm (Futamata, Japan)

Avantages

- ⚡ Mature
- ⚡ Haute densité énergétique ;
- ⚡ Bon rendement ;
- ⚡ Durée de vie, cyclage ;
- ⚡ Faible impact environnemental.

Inconvénients

- ⚡ Haute température (> 300°C) ;
- ⚡ Autodécharge en inactivité (10 - 15% par jour) ;
- ⚡ Temps de réponse élevé (à froid) ;
- ⚡ Le rapport Puissance/Energie n'est pas flexible.



Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

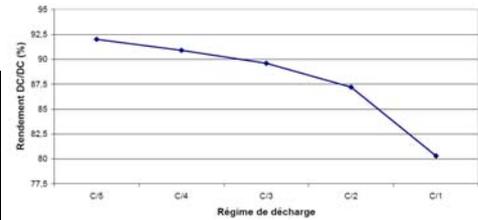
52 EDF

Batteries à haute température

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Batteries Zebra

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
5 kW - 500 kW	95 - 120Wh/kg	400	2 - 10h	85 - 90

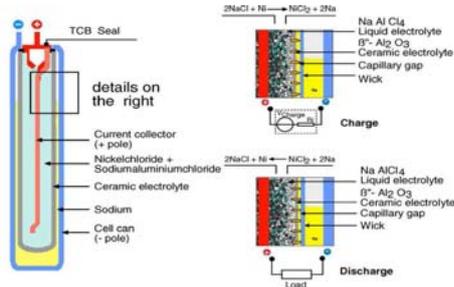


■ Avantages

- ⚡ Haute densité énergétique
- ⚡ Bon rendement ;
- ⚡ Durée de vie, cyclage ;
- ⚡ Large plage des régimes de fonctionnement ;
- ⚡ Faible impact environnemental.

■ Inconvénients

- ⚡ Haute température (> 300°C) ;
- ⚡ Autodécharge en inactivité (7 – 17% par jour) ;
- ⚡ Temps de réponse élevé (à froid) ;
- ⚡ Pas mature pour des application stationnaires.



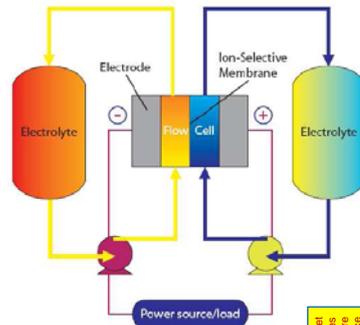
Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

53 EDF

Batteries à circulation

Principe de fonctionnement

Typical Power	Typical Energy	Typical duration discharge	Maturity
100 kW – 10 MW	1 – 100 MWh	10 hours	Developed, stage of demonstration projects



Couple	Negative cell		Positive cell		Total cell Standard Cell potential E ₀ [V]
	Electrolyte	Redox potential [V]	Electrolyte	Redox potential [V]	
U/U	U ⁴⁺ + e ⁻ → U ³⁺	-0.607	UO ₂ ²⁺ + e ⁻ → UO ₂ ⁺	0.06	0.7
Fe/Ti	Ti ³⁺ + e ⁻ → Ti ²⁺	-0.9	Fe ³⁺ + e ⁻ → Fe ²⁺	0.771	1.7
Fe/Cr	Cr ³⁺ + e ⁻ → Cr ²⁺	-0.407	Fe ³⁺ + e ⁻ → Fe ²⁺	0.771	1.2
V/V	V ³⁺ + e ⁻ → V ²⁺	-0.255	V ⁵⁺ + e ⁻ → V ⁴⁺	0.991	1.2
Br/S	S + 2e ⁻ → 2S ²⁻	-0.48	Br ₂ + 2e ⁻ → 2Br ⁻	1.087	1.5
Zn/Br	Zn ²⁺ + 2e ⁻ → Zn	-0.763	Br ₂ + 2e ⁻ → 2Br ⁻	1.087	1.9
V/O	V ³⁺ + e ⁻ → V ²⁺	-0.255	O ₂ + 4H ⁺ + e ⁻ → 2H ₂ O	1.229	1.5
Ti/O	Ti ³⁺ + e ⁻ → Ti ²⁺	-0.9	O ₂ + 4H ⁺ + e ⁻ → 2H ₂ O	1.229	2.1
Cr/O	Cr ³⁺ + e ⁻ → Cr ²⁺	-0.407	O ₂ + 4H ⁺ + e ⁻ → 2H ₂ O	1.229	1.6

Université de Bordeaux, KEMA

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

54 EDF

Batteries à circulation

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

■ Avantages

- ✦ Haute modularité (taille minimale entre 5 and 100 kW) ;
- ✦ Large plage des ratio Puissance/Energie (sauf la technologie ZnBr) ;
- ✦ Durée de vie (jusqu'à 15 ans), cyclage ;
- ✦ Large plage des régimes, y compris décharge profonde, pulsionnelle ;
- ✦ Faible autodécharge.

■ Inconvénients

- ✦ Architecture compliquée (pompes, tuyauterie, système de contrôle, ..) ;
- ✦ Risque de fuite de l'électrolyte ;
- ✦ Coût de maintenance ;
- ✦ Faible densité énergétique.



Artist view of Regenesys installation

Performance	Vanadium	Zinc bromine	PSB
Typical power range (MWe)	< 3	< 1	< 15
Typical size range (MWh)	0.5 – 5	0.01 – 5	0 - 120
Typical discharge duration (h)	4 - 15	Up to 10, even more	2.5
Energy density (Wh/liter)	16 - 33	60 – 90	20 - 30
Cycle efficiency [Whout/Whin] (%)	70 – 85	65 – 75	60 – 75
Cycle life (cycles)	>12,000	>2,000	n/a
Life time (years)	5 – 10	5 – 10	15
Stage of development	Demonstration / commercial units	Demonstration / commercial units	Demonstration
Companies involved	VRB (Prudent Energy), SEI, Pinnacle, Cellenium	ZBB, Premium Power	TVA, Prudent Energy

Source : Petra de Boer, Ellis Raadschelders, KEMA
Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

55

Volants d'inertie

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

◆ Performances

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
some kW - Some MW	1 -10 Wh/kg	150-600 (HP) 400-3000 (LD)	Some min (HP) 1 – 3 h (LD)	85 - 95

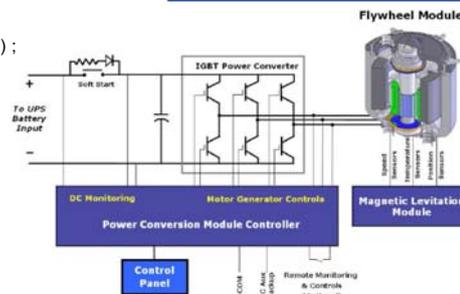


■ Avantages

- ✦ Excellent temps de réponse (qq ms) ;
- ✦ Durée de vie, cyclage ;
- ✦ Large plage des régimes, y compris décharge profonde ;
- ✦ Peu de maintenance ;
- ✦ Grand nombre de constructeurs.

■ Inconvénients

- ✦ Forte autodécharge ;
- ✦ Problèmes de sécurité ;
- ✦ Coût très élevé.



Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

56

Super-capacités

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Performances

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
some kW - Some MW	2 -15 Wh/kg	100 - 500	Some sec - Some 10 sec	85 - 95

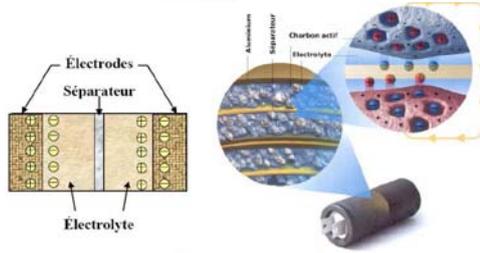
Avantages

- ✦ Excellent temps de réponse (qq ms) ;
- ✦ Haut rendement ;
- ✦ Durée de vie, cyclage (100 000 – 1M)
- ✦ Peu de maintenance ;
- ✦ Monitoring de charge facile.

Inconvénients

- ✦ Forte autodécharge ;
- ✦ Problèmes de sécurité (inflammable / électrolyte toxique) ;
- ✦ Forte baisse de tension en phase de décharge.

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012



57 EDF

Supraconducteurs (SMES)

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Performances

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
some kW - Some MW	0.5 -3 Wh/kg	100 - 500	Some 100 ms - Some 10 sec	85 – 95 (wo cryogenic part)

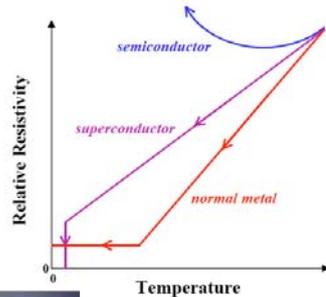
Avantages

- ✦ Excellent temps de réponse (qq ms) ;
- ✦ Haut rendement ;
- ✦ Adapté pour fournir de l'énergie active/reactive ;
- ✦ Durée de vie (20 – 30 y), cyclage ;
- ✦ Charge / décharge rapide ;
- ✦ Monitoring de charge facile.

Inconvénients

- ✦ Faible densité énergétique.
- ✦ Processus Cryogénique nécessaire ;
- ✦ Autodécharge: (refroidissement permanent)
- ✦ Impact sur la santé humaine (ondes électromagnétiques).

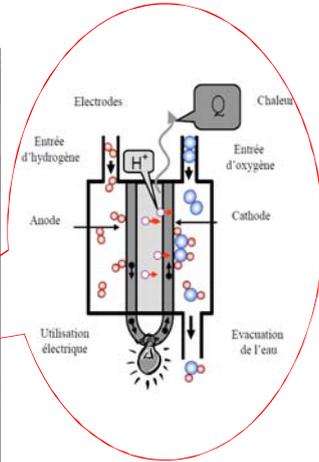
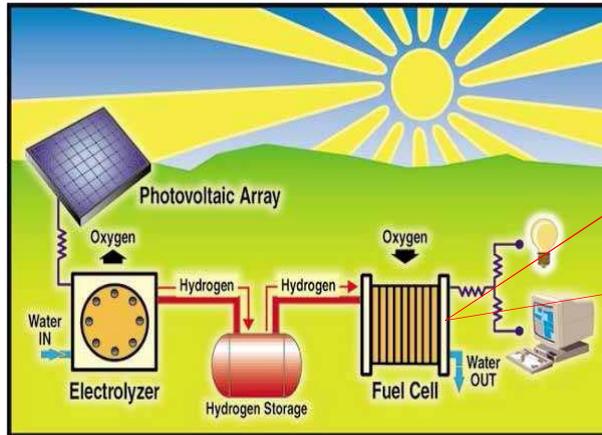
Université d'été – SLC – 8 septembre 2012



58 EDF

Piles à combustible

Structure and functioning

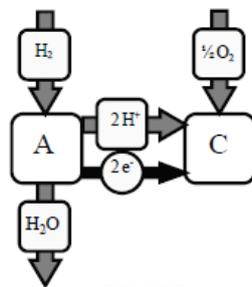


Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

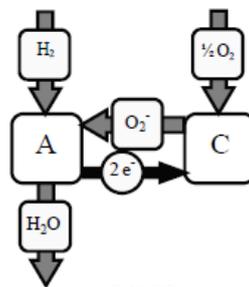
59 EDF

Piles à combustible

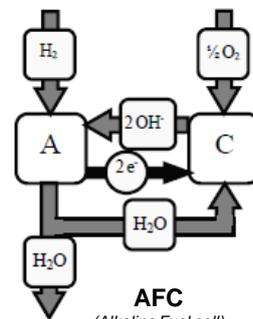
Principaux types des Piles à Combustion



PEMFC
(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)



SOFC
(Solid Oxide Fuel Cell)



AFC
(Alkaline Fuel cell)

Université d'été - SLC - 8 septembre 2012

60 EDF

Piles à combustible

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Fuel Cell typology

Class	Electrolyte	Operating Temperature	Fuel	Oxidizer	Sensitive to ...	Electric efficiency	Application	Advanced of technology
AFC Alcaline Fuel Cell	Potassium hydroxide solution	50-200°C	Industrial grade H2	Oxygen Air	CO ₂ , Hg, Cl, S	66-65 %	Mobile and Stationary	Mature
PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Solid polymer	30-100°C	H ₂ , high content H ₂ syngas such natural gas, coal gas, treated reforming biogas.	Oxygen Air	CO, S, Cl	35-50 %	Portable, mobile and stationary	Under development, soon to be commercialized
DMFC Direct Methanol Fuel Cell	Solid polymer	20-90°C	Methanol	Oxygen Air	S, métaux lourds	20-30 %	Portable and mobile	Under development
PAFC Phosphoric Acid Fuel Cell	Phosphoric acid	180-220°C	H ₂ , high content H ₂ syngas such natural gas, coal gas, treated reforming biogas.	Oxygen Air	CO, S, C	35-40 %	Stationary	Commercially available
MCFC Molten Carbonate Fuel Cell	Molten carbonate	600-700°C	H ₂ , high content H ₂ such natural gas, coal gas, biogas and similar gas, internal reforming and CO shift are in principle possible, methanol after external conversion and pre-treatment.	Oxygen Air	S, Cl	50-60 %	Stationary	Under development
SOFC Solid Oxide Fuel Cell	Solid electrolyte	700-1000°C	H ₂ , high content H ₂ such natural gas, coal gas, biogas and similar gas, internal reforming and CO shift are in principle possible, methanol after external conversion and pre-treatment.	Oxygen Air	S, Cl	50-65 %	Stationary	Under development

SOURCE : 

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

61 

Piles à combustible

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Global round-trip efficiency

Electricité 1	Electrolyse décentralisée $\eta = 50-55\%$	Hydrogène gazeux bouteilles $\eta = 60-65\%$ (350 bars)	Pile PEMFC $\eta = 55-60\%$	$\eta_{\text{global}} : 17-21\%$
Electricité 2	Electrolyse centralisée $\eta = 55-60\%$	Hydrogène liquide $\eta = 65-70\%$	Pile PEMFC $\eta = 55-60\%$	$\eta_{\text{global}} : 20-25\%$

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

62 

Stockage par pompage-turbinage hydraulique

Performances

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
Some MW - Some 1000 MW	0.5 -3 Wh/kg	100 - 500	Some h – some 10 h	65 - 75

Avantages

- ✦ Mature ;
- ✦ Bon rendement ;
- ✦ Durée de vie (plus de 40 ans), cyclage ;
- ✦ Monitoring de charge facile.

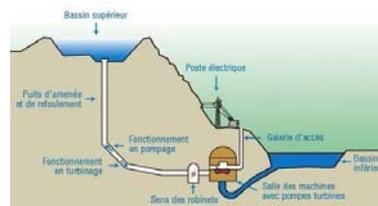
Inconvénients

- ✦ Contraintes d'emplacement ;
- ✦ Impact environnemental / acceptabilité publique.

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.



© La réalisation EDF - Global Energy
Barrage et retenue de la STEP de Grand'Gravelle (Savoie)

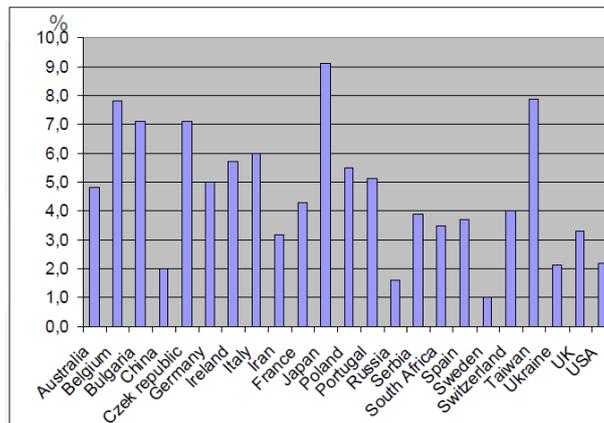


Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

63

Stockage par pompage-turbinage hydraulique

- ✦ Plus de 100 GW de puissance cumulée avec 380 centrales hydrauliques de pompage – turbinage dans le monde



Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certaines technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

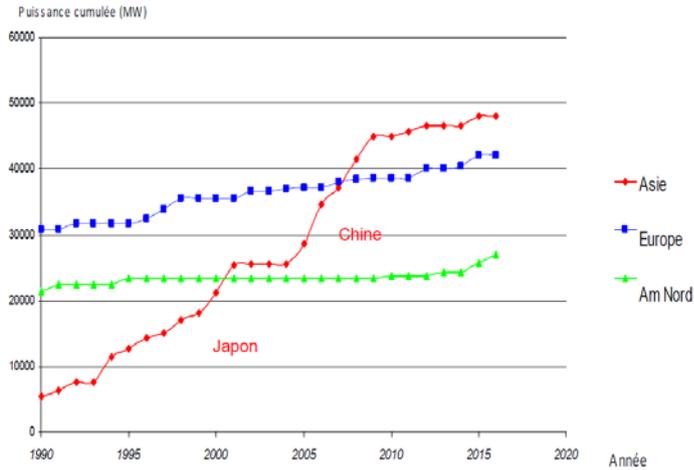
Puissance installée en % par rapport la puissance totale des parcs nationaux

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

64

Stockage par pompage-turbinage hydraulique

◆ Développement du stockage hydraulique par pompage-turbinage

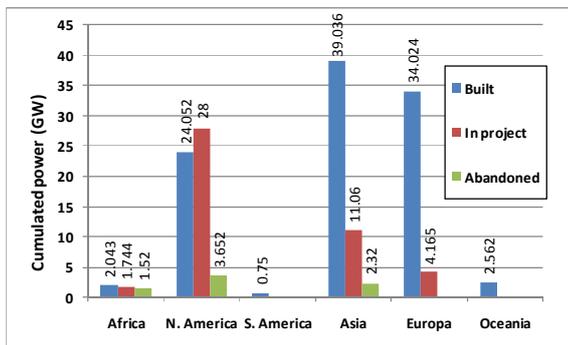


Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

65

Stockage par pompage-turbinage hydraulique

◆ Projets des centrales hydroliques de pompage - turbinage



Projets européens

Suisse	
•Nant de Drance (600 MW)	
•Linth Limmern (1200 MW)	
•Hongrin Leman (240 MW)	
•Fah Sera (50 MW)	
Autriche	
•Kops 2(2008) (450 MW)	
•Limberg (480 MW)	
•Feldsee (70 MW)	
Espagne	
•La Muela 2 (852 MW)	
Portugal	
•Balxo Sabor (171 MW)	
•Alqueva 2 (240 MW)	
•Alto Tamega (600 MW)	
Slovénie	
•Avce (185 MW)	
Royaume uni	
•Great Glen (600 MW)	
•Sloy (60 MW)	

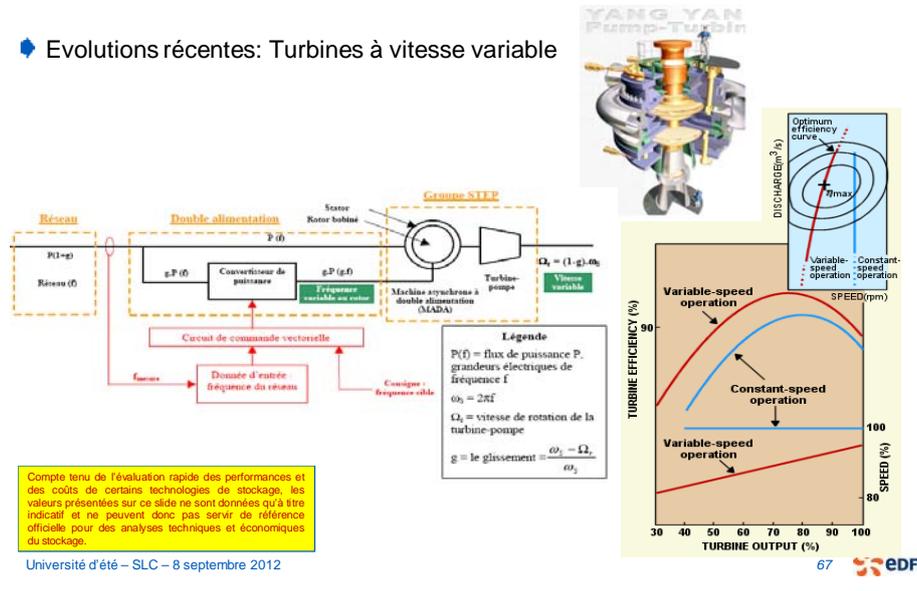
Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

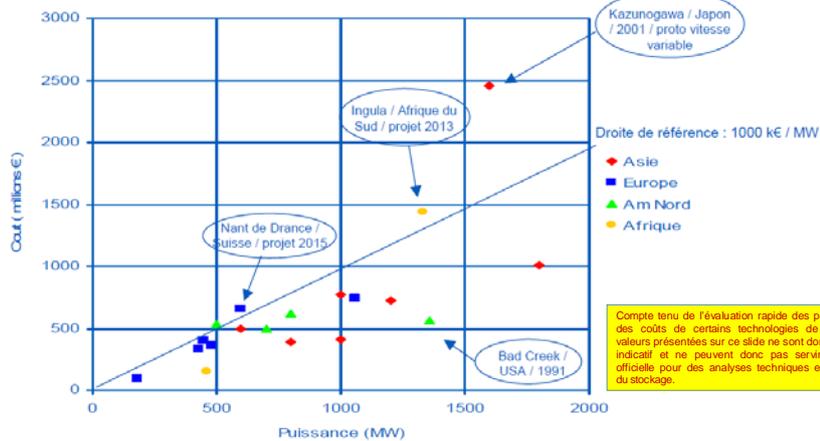
66

Stockage par pompage-turbinage hydraulique

◆ Evolutions récentes: Turbines à vitesse variable



Stockage par pompage-turbinage hydraulique



Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

68 EDF

Les STEP en France

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certaines technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

- ◆ Actuellement, 6 grandes installations STEP
- ◆ Mises en service entre 1976 et 1987
- ◆ Puissance totale en turbinage : env. 5000 MW
- ◆ STEP à utilisation journalière : Revin, Super Bissorte, La Coche, Le Cheylas
- ◆ STEP à utilisation hebdomadaire : Montezic, Grand Maison
- ◆ La plus puissante : Grand Maison, 1800 MW
- ◆ La plus ancienne : Lac Noir, 80 MW, arrêtée en 2002 suite inondation, projet de réhabilitation

	Montezic MSI 1982	Revin MSI 1976	G.Maison MSI 1985	S.Bissorte MSI 1987	La Coche MSI 1977	Le Cheylas MSI 1979	Total
Puissance en turbine	910 MW	720 MW	1790 MW	730 MW	330 MW	460 MW	4940 MW
Puissance en pompage	870 MW	720 MW	1160 MW	630 MW	310 MW	480 MW	4170 MW
Nb de pompes	4	4	8	4	2	2	
Constante de temps	40 h	5 h	30 h	5 h	3h	8 h	
Productible gravitaire	STEP pure	STEP pure	216 GWh	250 GWh	426 GWh	670 GWh	

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

69 

Stockage pneumatique

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certaines technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

◆ Typologie

- Stockage diabatique à air comprimé (CAES);
- Stockage diabatique à air comprimé "avancé" ;
- Stockage adiabatique à air comprimé (CAES-A);
- Stockage hydropneumatique ;
- Stockage à air liquide (cryogénique).

◆ Principales performances

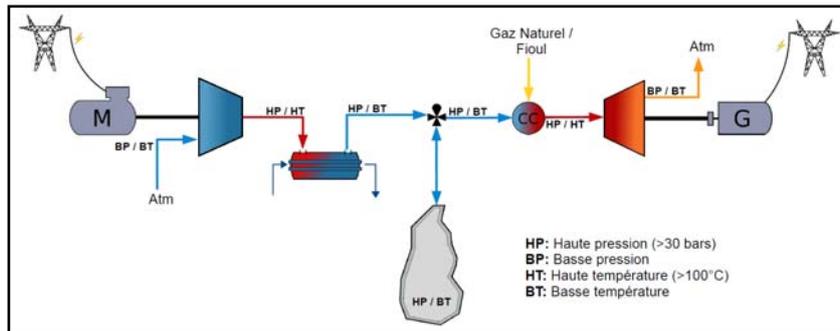
Plage des puissances:	De qq MW (CAES de surface, stockage hydropneumatique) jusqu'à qq GW
Durée maximale de fonctionnement à puissance maximal	plusieurs
Rendement	40 à 60%
Temps de réponse	de 5 à 30 min

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

70 

Stockage pneumatique

Diabatic Compressed Air Energy Storage



Source : R. Chalker, EPRI

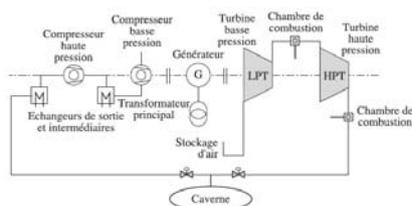
Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

71 EDF

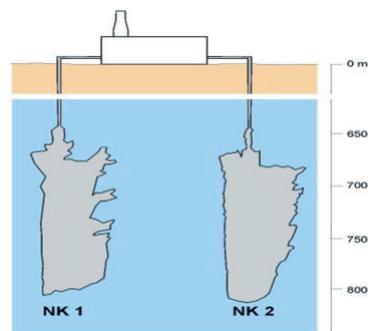
Centrale de stockage à air comprimé de Hundorf (1978)

Caractéristiques

Puissance de détente 290 MW; 3 h de fonctionnement continu à puissance max ;
 Puissance de compression 60 MW, 24 h de stockage à puissance maximale ;
 Plage des pression de 43 – 70 bars



Univ



Source : Fritz CROGINO, Kavernen Bau und Betrieb GmbH

72 EDF

Centrale de stockage à air comprimé de Alabama (1991)

Caractéristiques

Puissance de détente 110 MW; 26 h de fonctionnement continu à puissance max ;
Puissance de compression 51 MW, Coût d'investissement 600\$/kW



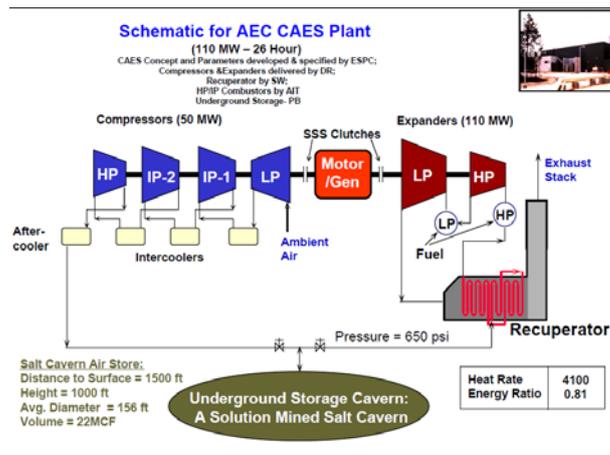
Source : Dr. Michael Nakhamkin, Energy Storage and Power Corporation

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

73 EDF

Centrale de stockage à air comprimé de Alabama

Architecture d'une centrale de stockage CAES



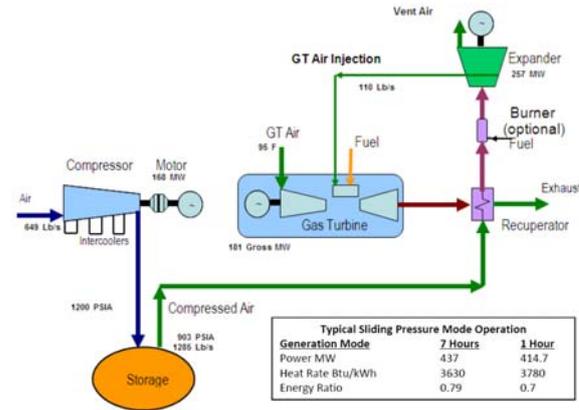
Source : Dr. Michael Nakhamkin, Energy Storage and Power Corporation

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

74 EDF

Stockage pneumatique

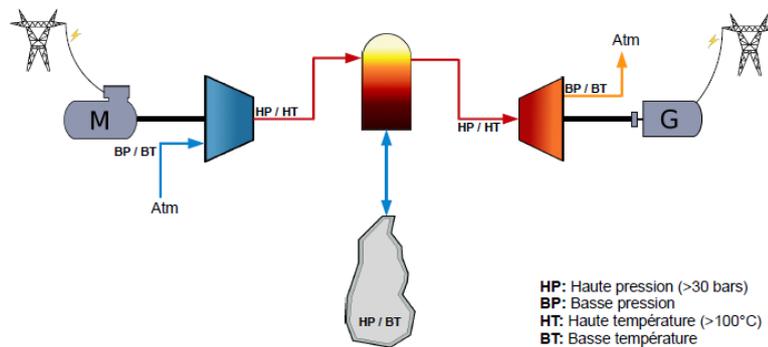
Stockage à Air Comprimé avancé



Source : Dr. Michael Nakhamkin, Energy Storage and Power Corporation

Stockage pneumatique

Stockage à Air Comprimé adiabatique



Source : R. Chainker, EPRI

Stockage à air comprimé

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Tableau de comparaison

	Turbine à combustion	CAES 1ère génération Mc Intosh	CAES 2ème génération (Avancé)	CAES Adiabatique
Energy ratio	0	1.22	1.43	0.7
Heat rate	0.35	0.83	0.9	0
Roundtrip efficiency	35%	49,5%	55%	70%
Compressor (€/kW)	X	250	250	300
Expander (€/kW)	X	350	300	350
Cavity (€/kWh)	X	15	15	19,3
Open Gas Turbine (€/kW)	600	X	500	X
TES (€/kWh)	X	X	X	30
Total (€/KW) pour 3000MWh	400 à 600€/kW	620€/kW	550€/kW	750€/kW

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

77 

Stockage à air comprimé

	Advantages	Disadvantages
Diabatic CAES	+ Large output power control range	- Lower cycle efficiency of up to 0.56
	+ Lower storage related investment cost	- No real storage
	+ No time dependent storage losses	- Subject to fuel price volatility
		- High NOx emissions
Adiabatic CAES	+ Zero emission	- Smaller output power control range
	+ Higher cycle efficiency of up to 0.7	- Higher storage related investment cost
	+ Independent of fuel price volatility	- Time dependent storage losses
		- Development effort necessary

Université d'été – SLC – 8 septembre 2012

78 

Stockage pneumatique

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.

Hydropneumatique

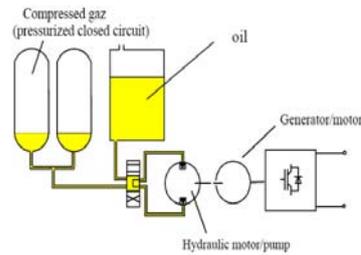
Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
100 kW - qq MW	1 - 4 Wh/kg	500 €/kWh + 1000 €/kW	qq heures	75

Avantages

- ✦ Bon rendement ;
- ✦ Durée de vie, cyclage ;
- ✦ Large plage des regimes ;
- ✦ Possibilité de décharges profondes régulières ;
- ✦ Pas d'autodécharge.

Inconvénients

- ✦ Corrosion / Risque de gel ;
- ✦ Problèmes de sécurité (haute pression) ;
- ✦ Coût élevé.



Source : Philippe Lefèvre, EDF R&D and Alfred Rufer, EPFL

Stockage d'électricité thermique à haute température (SETHR)

Performances

Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
Qq MW - Qq 100 MW	600 kWh/m ³	450 €/kW + 50€/kWh (estimation)	1 to 10 hours	60 - 70 (estimation)



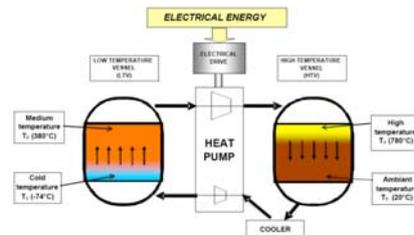
Avantages

- ✦ Bonne densité énergétique ;
- ✦ Bon rendement ;
- ✦ Durée de vie (20 - 30 ans), cyclage ;
- ✦ Matériaux / technologies disponibles ;
- ✦ Pas besoin de sites spécifiques.

Inconvénients

- ✦ Technologie en phase de la R&D.

Compte tenu de l'évaluation rapide des performances et des coûts de certains technologies de stockage, les valeurs présentées sur ce slide ne sont données qu'à titre indicatif et ne peuvent donc pas servir de référence officielle pour des analyses techniques et économiques du stockage.



Source : Jacques Ruer, SAIPEM