

A white lightbulb is floating in a pond, surrounded by tall reeds. The lightbulb is the central focus, with its filament visible. The water is dark blue, and the reeds are green and yellow. The background is a white box containing text.

Stockage stationnaire d'électricité : enjeux et perspectives

Technologies, applications,
valorisation, régulation

Andrei NEKRASSOV

EDF R&D

**Département Economie, Fonctionnement et
Etudes des Systèmes Energétiques**

ESPCI, Paris, le 18 novembre 2010



LEADING THE ENERGY CHANGE

Stockage d'électricité : Contexte

Réseaux
intelligents

Véhicules
électriques &
hybrides

Stockage
d'hydrogène

Réduction des
émissions du
CO₂

Intégration des
Energies
Renouvelables

Rareté des
ressources
fossiles

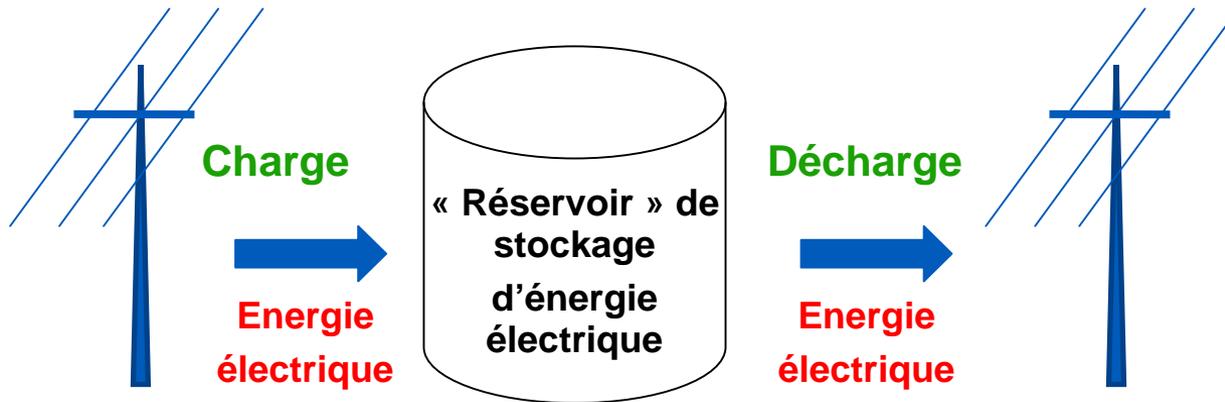


Mais c'est quoi
exactement,

**LE STOCKAGE
D'ELECTRICITE
STATIONNAIRE?**

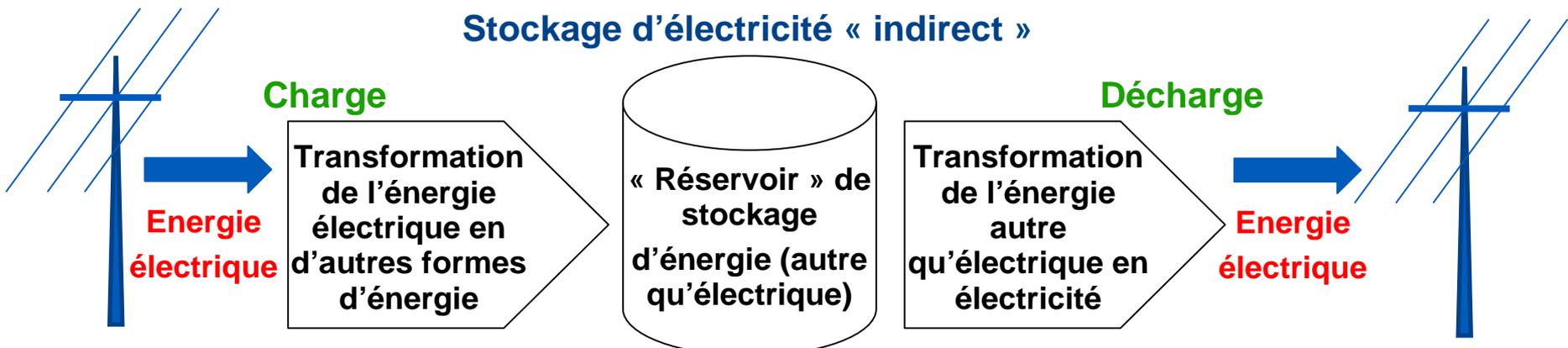
Stockage d'électricité : définition

Stockage d'électricité « direct »



OU

Stockage d'électricité « indirect »



Stockage d'électricité : liste des technologies

Technologies de stockage d'électricité

Stockage d'électricité "Direct"

Electrostatique:

- Supercapacités

Electromagnétique:

- Supraconducteurs

Stockage d'électricité par l'intermédiaire d'un autre type d'énergie (exemples)

Electrochimique:

- Batteries classiques
- Batteries à circulation
- Batteries à haute température
- Technologie métal-air
- Stockage à l'aide de l'hydrogène

Cinétique:

- Volants d'inertie

Gravitaire:

- STEP (hydraulique)

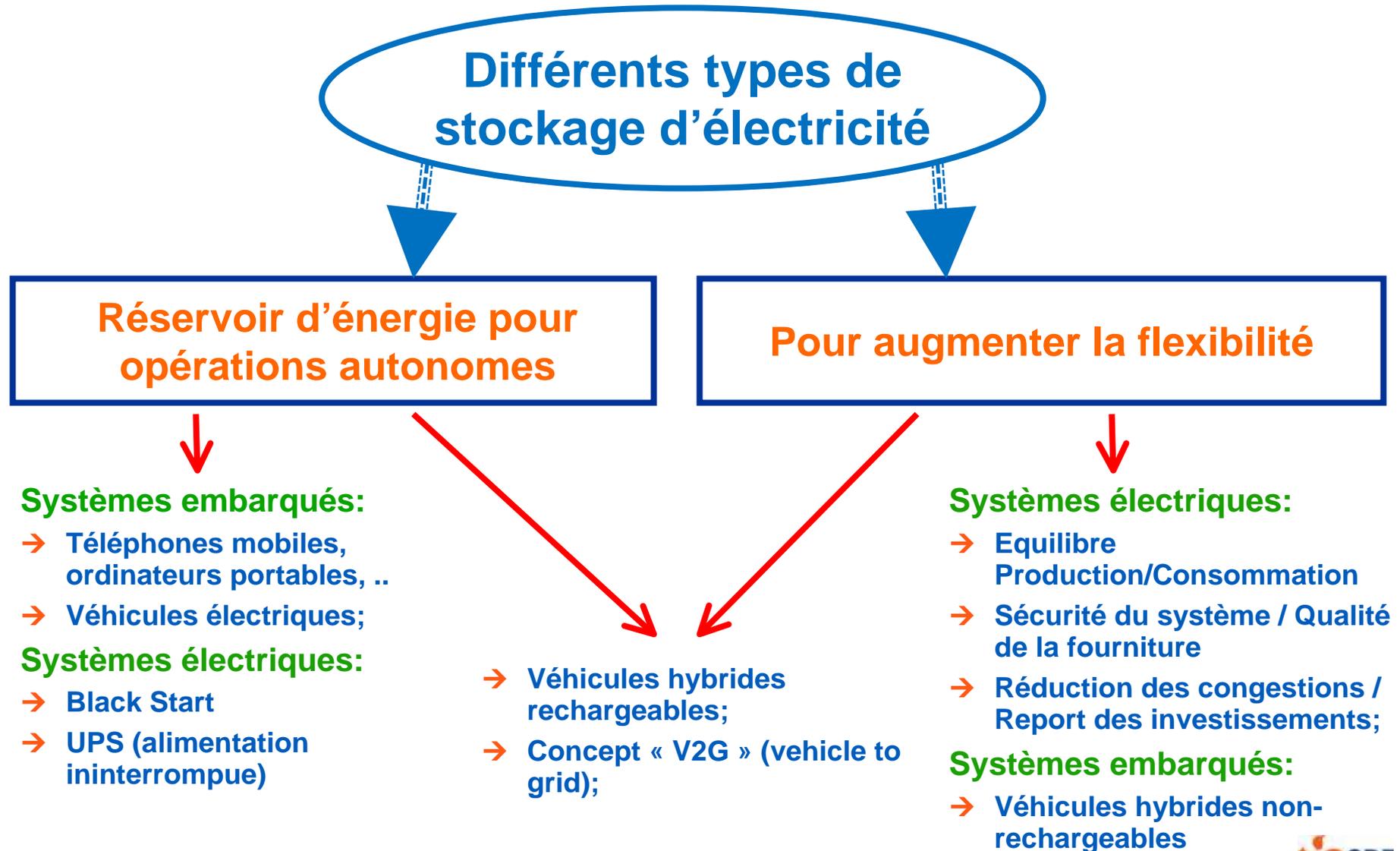
Pneumatique:

- A air comprimé (CAES)
- Hydropneumatique

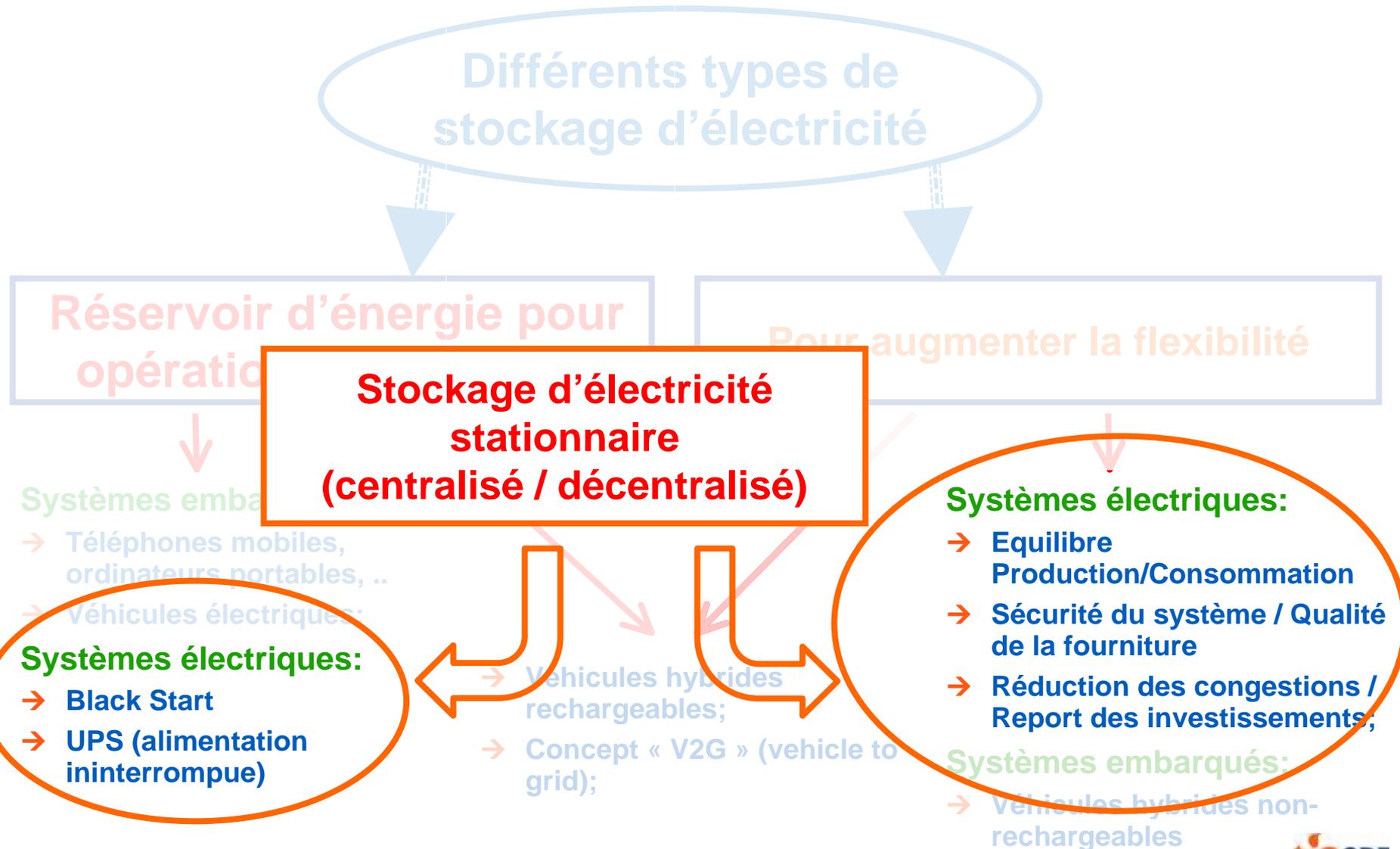
Thermique:

- SETHER (thermique à haute température)

Stockage d'électricité stationnaire: définition



Stockage d'électricité stationnaire: définition



Stockage d'électricité : Deux vertus principales

**Capacité de transfert temporel
d'énergie électrique**

**Temps de réponse extrêmement
faible
(quelques dizaines de millisecondes)**

Gravitaire:

→ STEP (hydraulique)

Pneumatique:

→ A air comprimé (CAES)

→ Hydropneumatique

Electrochimique:

→ Stockage à l'aide d'hydrogène

Thermique:

→ SETHER (thermique à haute température)

Electrochimique:

→ Batteries à circulation

→ Batteries à haute température

Electrochimique:

→ Batteries classiques

→ Technologie métal-air

Cinétique:

→ Volants d'inertie

Electrostatique:

→ Supercapacités

Electromagnétique:

→ Supraconducteurs



ELEMENTS DE CONTEXTE

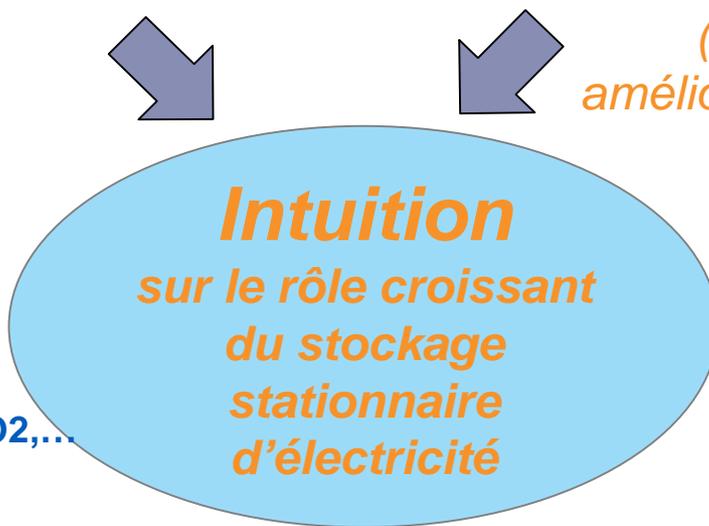
Ce qui nous fait croire en Stockage d'Electricité (stationnaire)

Nouveau contexte
(besoins & contraintes & opportunités)

- Contexte institutionnel
 - Dérégulation / marchés
 - Nouveaux acteurs
 - Cadre transnational
- Contexte économique
 - Prix des combustibles, CO2,...
- Contexte technique
 - EnR intermittentes
 - Evolution des profils de consommation
 - Production décentralisée
 - Réseaux intelligents, ...
- Contexte environnemental

Avancées scientifiques et technologiques
(réduction des coûts, amélioration des performances)

- Nouveaux matériaux
 - Chimie ;
 - Résistance à hautes t°;
 - Nanomatériaux
- Electronique de puissance
- Stockage pour les VE



Mais...

**Où et Quand? Pour qui?
Pour quoi faire?**

Contexte sur le stockage stationnaire d'électricité

- ▶ Des intuitions *a priori* très favorables au stockage, avec deux concepts courants :

Production intermittente = problèmes ; stockage local = solution

CO2 émis par la production de pointe => lisser et reporter des usages via le stockage

- ▶ Un grand nombre d'initiatives en cours au niveau communautaire européen, au niveau des Etats Membres (démonstrateurs notamment)

- ▶ Mais la valorisation économique du stockage n'est pas aussi intuitive...

- Le besoin fondamental est **la flexibilité** des systèmes électriques, pas directement le stockage

- Existence de solutions alternatives de flexibilité : turbines à combustion, production hydraulique, interconnexions, pilotage de la demande,...

- Des technologies de stockage électrique relativement nombreuses, mais chères (voire très chères...)

- Des pertes de cyclage assez importantes (rendements typiques 60-80%)

- Une sensibilité importante de la valeur du stockage à ses paramètres de dimensionnement

- Un potentiel de nouveaux usages assez large, mais pas encore stabilisé, ni très connu

- Un contexte réglementaire européen pas spécialement favorable au développement du stockage, sauf quelques récentes évolutions (ALL,...)

- Des méthodes de valorisation et de nouveaux *modèles d'affaire* à inventer / développer

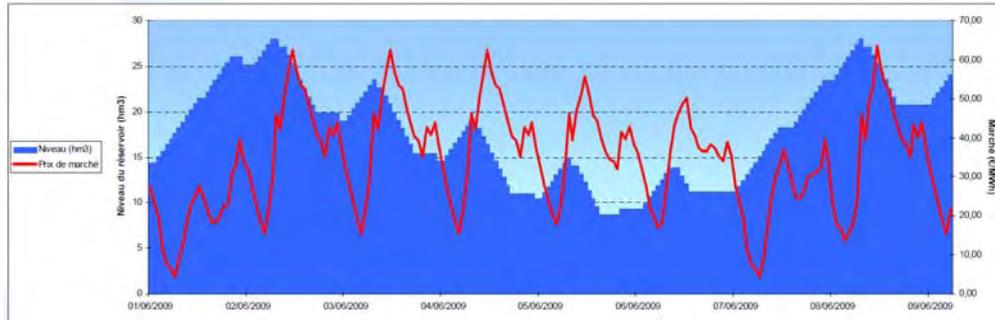
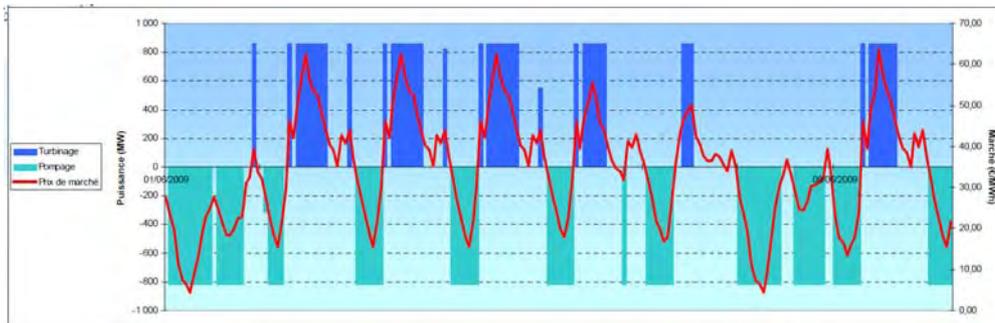


Usages potentiels du stockage stationnaire d'électricité

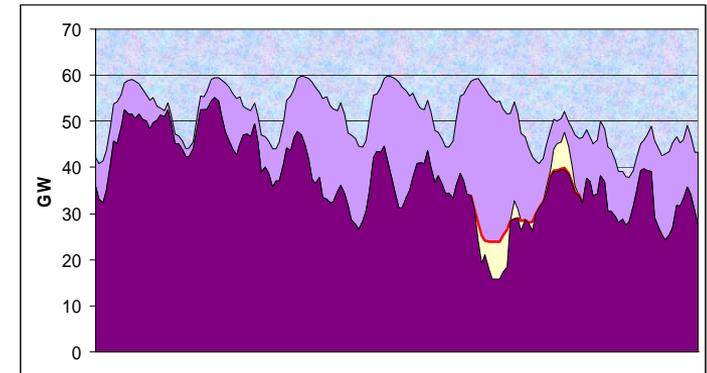
Usages du stockage stationnaire d'électricité

▶ Qu'en savons nous?

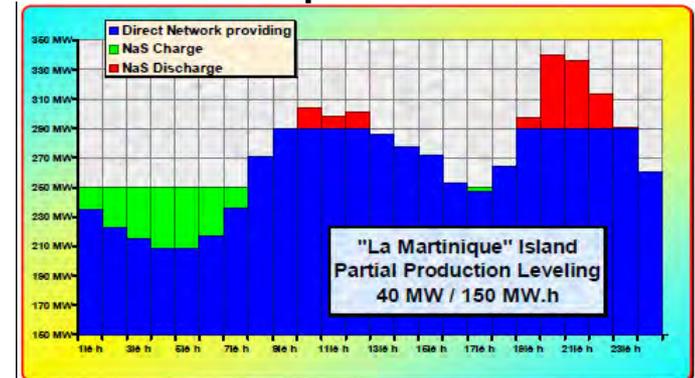
Arbitrage entre les prix du marché aux différents moments de la journée



Optimisation de la courbe de charge des EnR



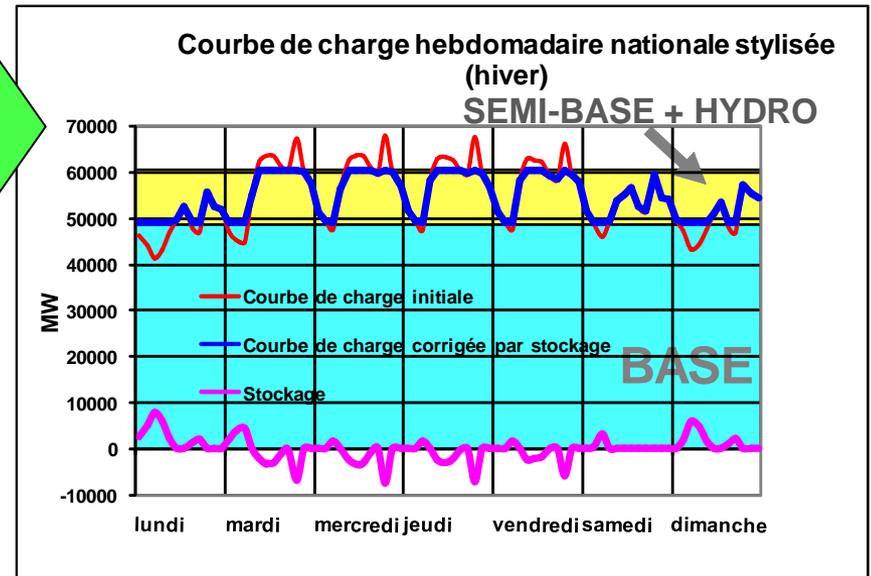
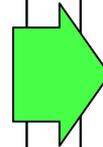
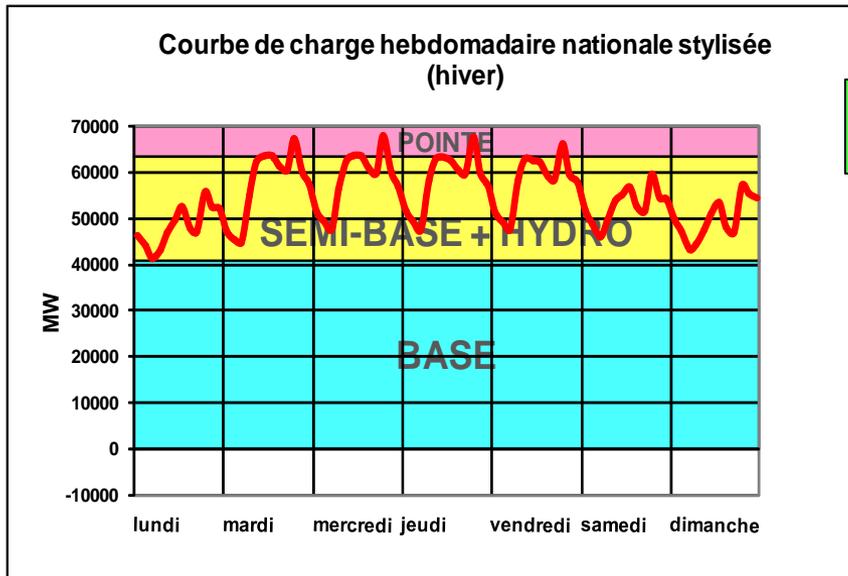
Réduction des pointes



EDF R&D simulation of load levelling

Usages du stockage stationnaire d'électricité

► Optimisation de l'opération d'un parc de production



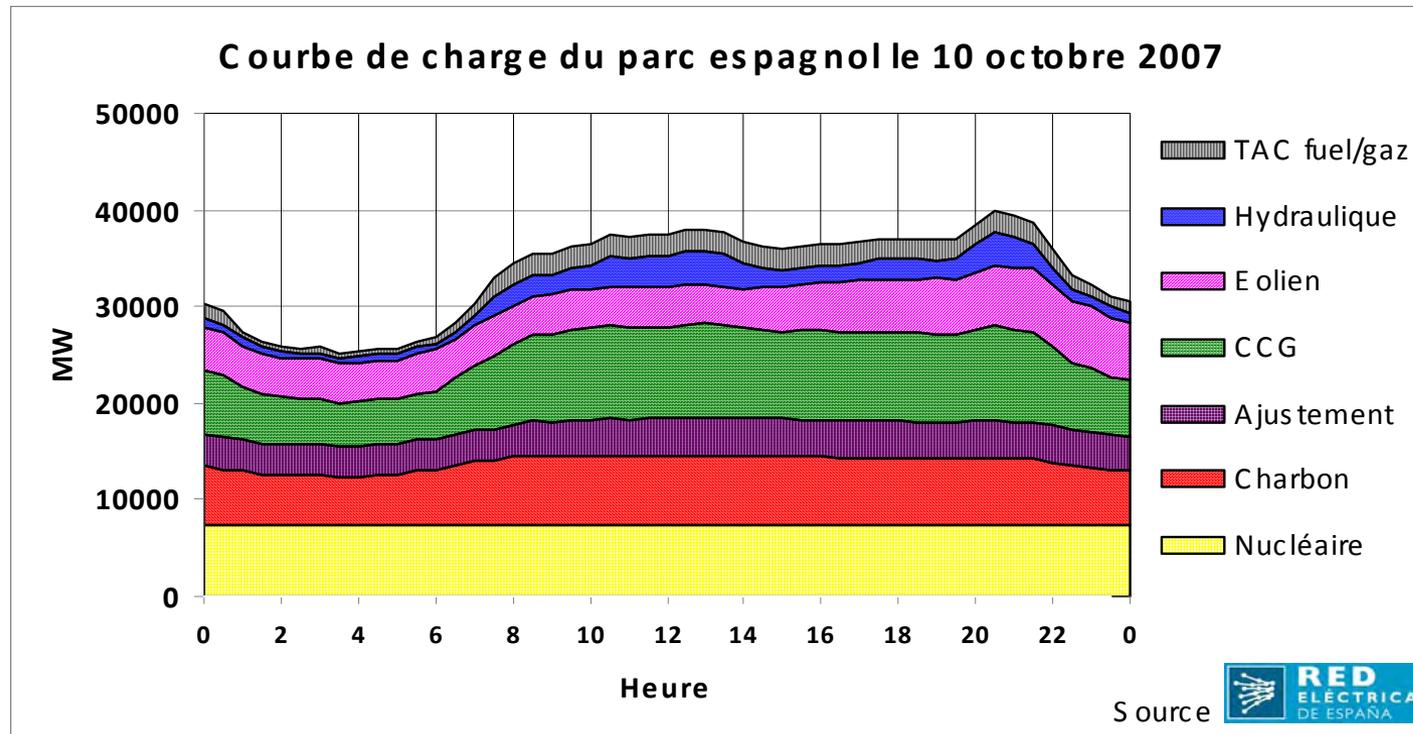
► Démarrage des centrales en semi-base à la place de celle de pointe;

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

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

Usages du stockage stationnaire d'électricité

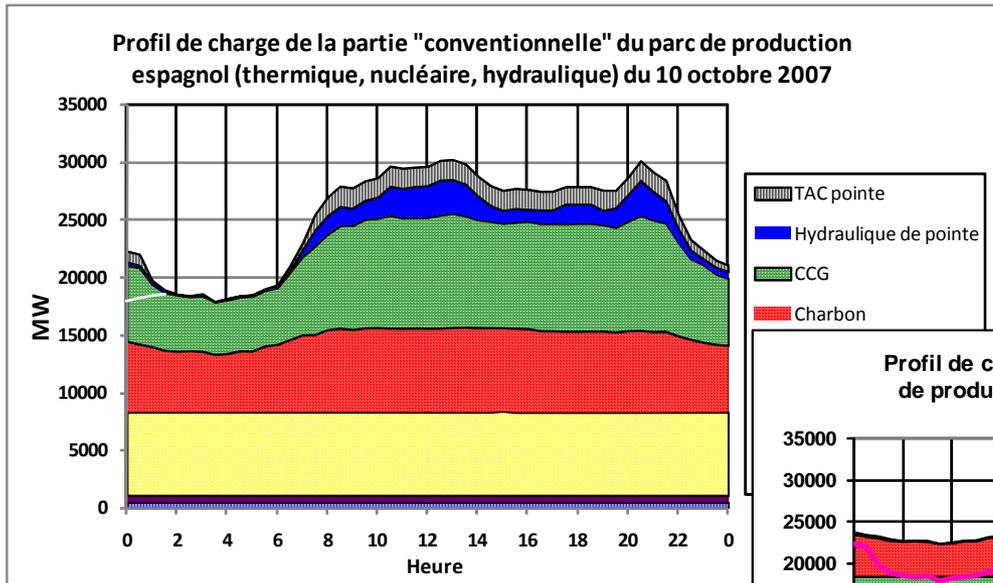
► Optimisation de l'opération d'un parc de production : exemple



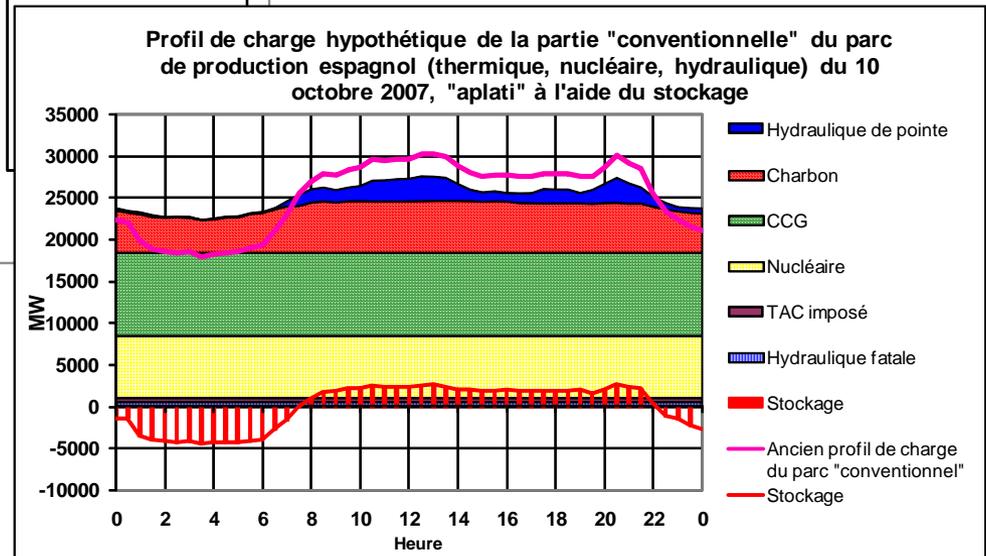
Usages du stockage stationnaire d'électricité

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

Sans stockage



Avec stockage

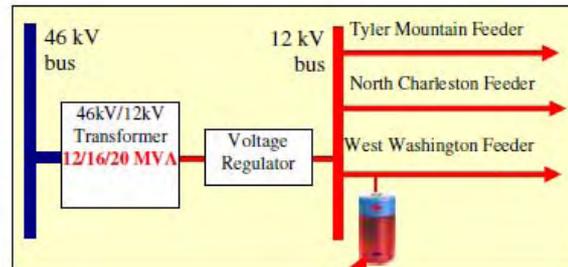


Usages du stockage stationnaire d'électricité

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

AEP 2006 Project – Battery in an Existing Substation

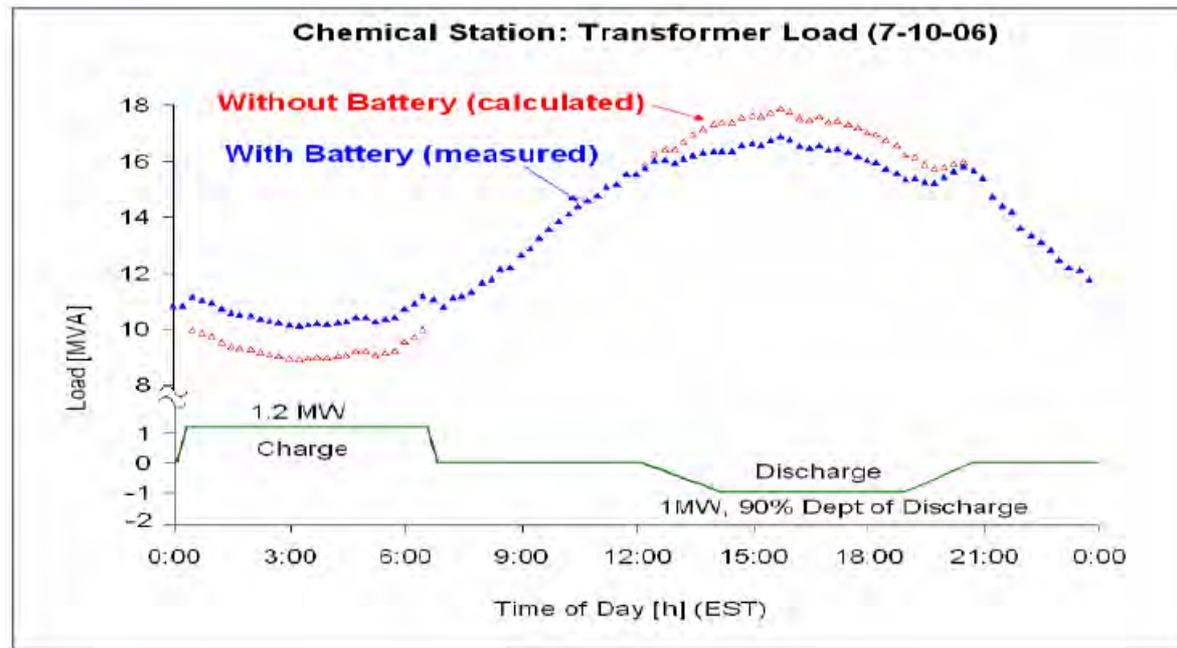
- Installed **1MW, 7.2 MWh** of NAS battery on a feeder to defer building a new substation for three years
- Daily Peak Shaving –summer
- Three years of successful operation
- Battery is being moved to a different site



Usages du stockage stationnaire d'électricité

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

Peak shaving (load leveling).

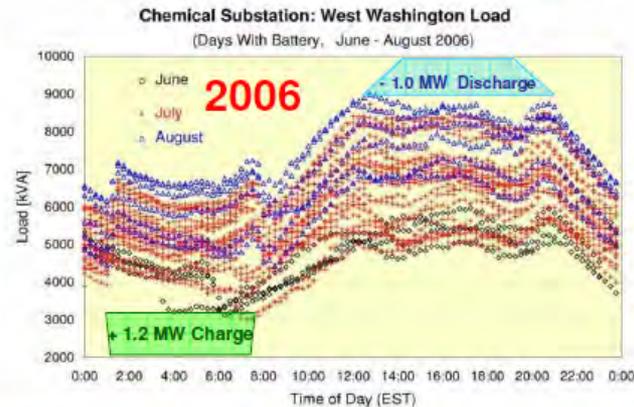


Usages du stockage stationnaire d'électricité

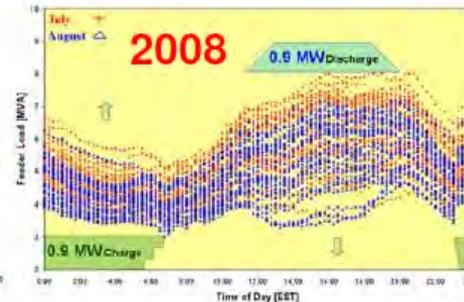
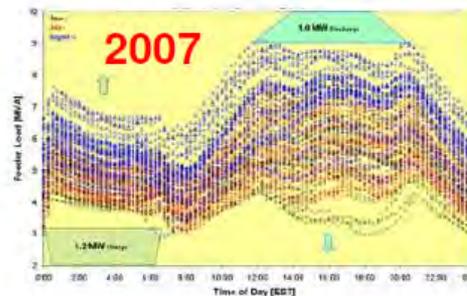
- ▶ American Electric Power (USA) : report d'investissement dans les transformateurs

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

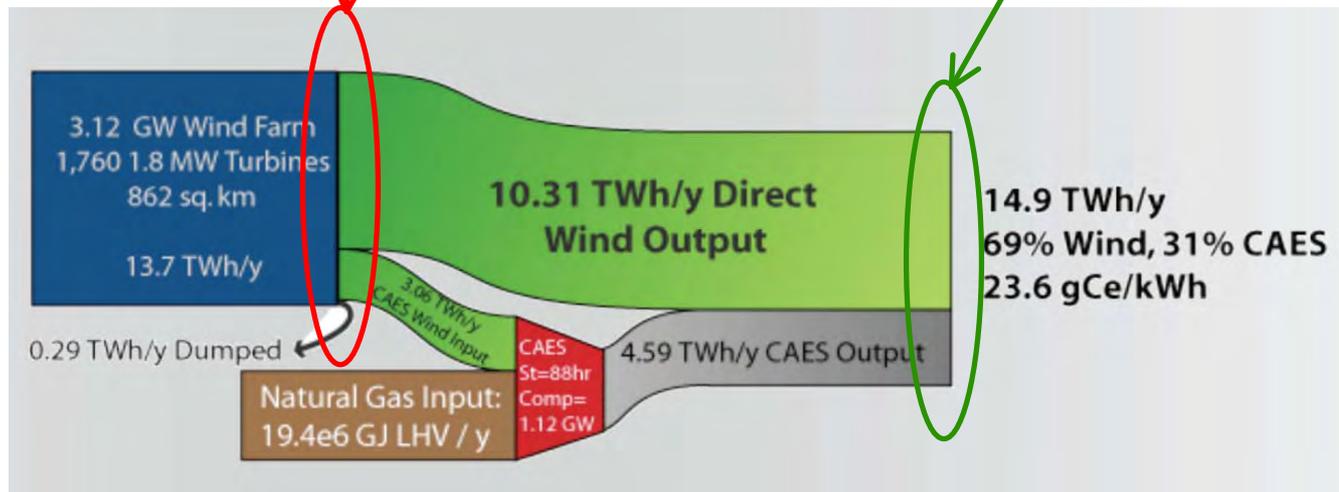


Usages du stockage stationnaire d'électricité

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

Aucune flexibilité pour suivre la courbe de charge

Flexibilité suffisante pour suivre la courbe de charge



**I WANT YOU
TO DEMAND
WIND POWER
IN KANSAS**

Q: Should new coal plants in Kansas be part of our plan to stop Global Warming?
A: NO

Q: Will Wind Power create jobs and be part of a sustainable future?
A: YES

Q: Is Kansas at a Crossroads... hell, is mankind at a crossroads?
A: YES

Tell Gov. Sebelius to stop future coal plants and to create a future we can live with.

Capitol Bldg, 2nd Floor
Topeka, KS 66612
1-877-579-6757
governor@state.ks.us

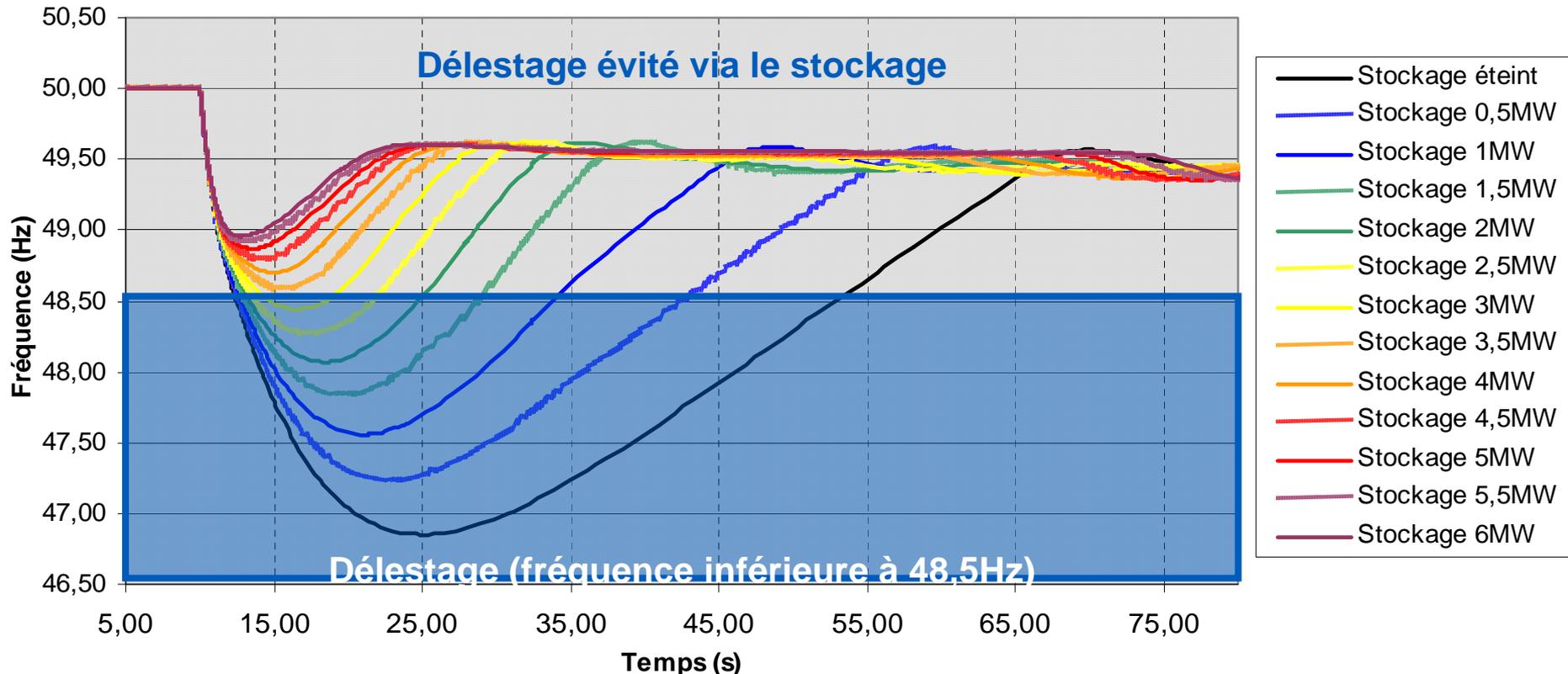


Source : "Wind Coupled To Compressed Air Energy Storage (CAES) For Baseload Power Generation An Integrated Optimization of Wind with Storage", Samir Succar and Robert Williams, Princeton Environmental Institute, Princeton University

Usages du stockage stationnaire d'électricité

► Apport du stockage à la dynamique des systèmes insulaires

Comportement en fréquence du réseau de Guadeloupe sur perte de groupe



► 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

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...

- Réglage de fréquence
- Réglage de tension
- Réduction des pertes
- Congestions
- Stabilité angulaire

Transporteur



- Lissage de charge
- Réglage de tension
- Soutien régime dégradé
- Compensation réactif
- Réduction des pertes
- Qualité/continuité
- Elimination des perturbations
- Renvoi de tension

Distributeur



- Contribution aux services système
- Lissage court-terme
- Valorisation effacements
- Report d'injection
- Production garantie
- Systèmes isolés

Production décentralisée



- Report de consommation
- Effacement transparent
- Lissage de pointe
- Qualité de l'électricité
- Continuité d'alimentation
- Elimination des perturbations amont
- Compensation réactif

Consommateur



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



Valorisation du stockage d'électricité

Méthodes classiques de valorisation du stockage

► Deux grandes méthodes classiques de valorisation

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

SUR LA BASE DU SIGNAL DE MARCHE :

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

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\$) :**

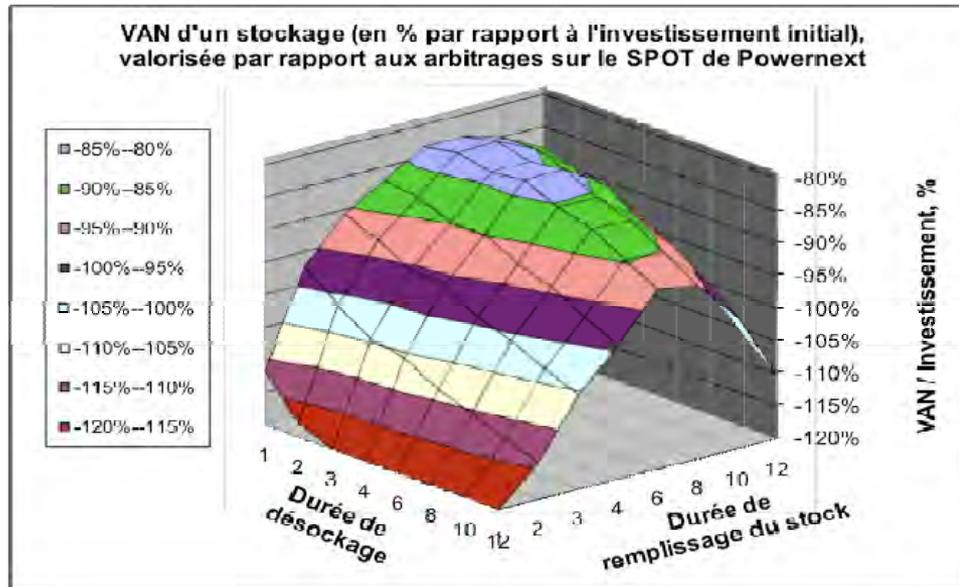
→ Pas de rentabilité économique pour le stockage

▶ **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

Valorisation sur la base du signal de marché

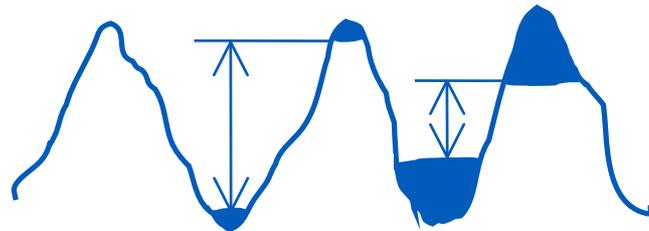
- ◆ Arbitrages de stockage / destockage en fonction du prix du marché spot
- ◆ Exemple de valorisation d'un stockage sur des prix spot Powernext



- ◆ 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 / désstockage)
- ◆ 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 sur la base du signal de marché

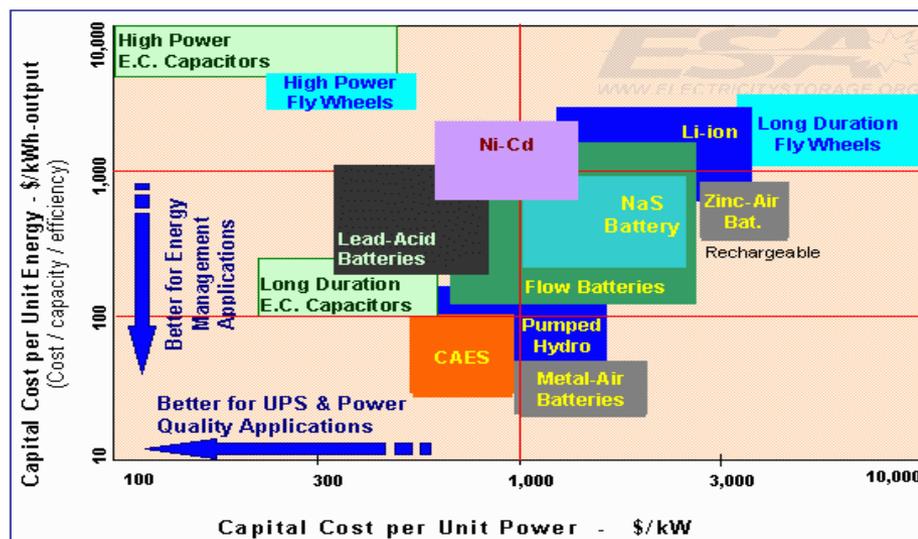
- ◆ Des valorisations similaires ont été faites par EDP (Electricité du Portugal) et ont conclu à la non-rentabilité du stockage utilisé en arbitrage sur des prix spot sur le marché portugais
- ◆ Pour EDP, le spread de prix constaté est trop faible pour rentabiliser le stockage, et ce spread aurait tendance à diminuer
- ◆ Une réduction importante des coûts du stockage permettrait de le rentabiliser (coûts divisés par deux)
- ◆ Le coût élevé des installations de stockage (nécessitant un haut niveau annuel de gain pour rémunérer l'investissement) ainsi que le niveau de pertes de cyclage (15-30%) nécessitent d'avoir des conditions de spreads de prix assez particulières (forte amplitude entre les extrêmes)
- ◆ Problème de la valorisation marginale : le premier MW aura plus de valeur que les suivants



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* ?

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

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?**

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 bénéfiques potentiels sur la chaîne de valeur)
- Peu de régulations 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

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



Mécanismes d'incitation au stockage d'électricité :

Leurs objectifs et efficacité

Problématique de l'incitation aux investissements dans le stockage d'électricité

► Questions fondamentales :

- Quels outils réglementaires incitatifs pourraient éventuellement être appliqués au stockage ?
- Dans quel cadre législatif ?
- Quels critères d'analyse pour juger de l'efficacité des mécanismes incitatifs proposés ?

Mécanismes potentiels d'incitation aux investissements dans le stockage d'électricité

► Incitations directes:

- Les crédits d'impôt à l'investissement / amortissement accéléré du coût en capital pour les nouvelles installations de stockage de l'énergie ;
- Les cibles imposées pour la mise en œuvre de stockage d'énergie au prorata des prévisions de charge de pointe (par exemple la Californie) ou à la puissance installée des EnR intermittentes (éolien / solaire) ;

► Incitations indirectes:

- Introduction des tarifs d'accès au réseau adaptés à la spécificité du stockage de l'électricité (horosaisonnalité, ...) ;
- Introduction des primes à l'autoconsommation des énergies renouvelables pour des autoproducteurs résidentiels et tertiaires ;
- des contraintes techniques spécifiques appliquées aux producteurs des EnR intermittent (limitation de la vitesse de variation de la puissance des EnR injectée sur le réseau);
- Autoriser des prix de marché négatifs ;
- Obligations de la capacité de réserve / Mécanismes des crédits de capacité;
- Les tarifs spécifiques pour les services système et l'ajustement fourni par le stockage d'électricité.

Problématique de l'incitation aux investissements dans le stockage d'électricité

Cadre législatif d'incitations potentielles aux investissements dans le stockage d'électricité:

▶ **Politique environnementale :**

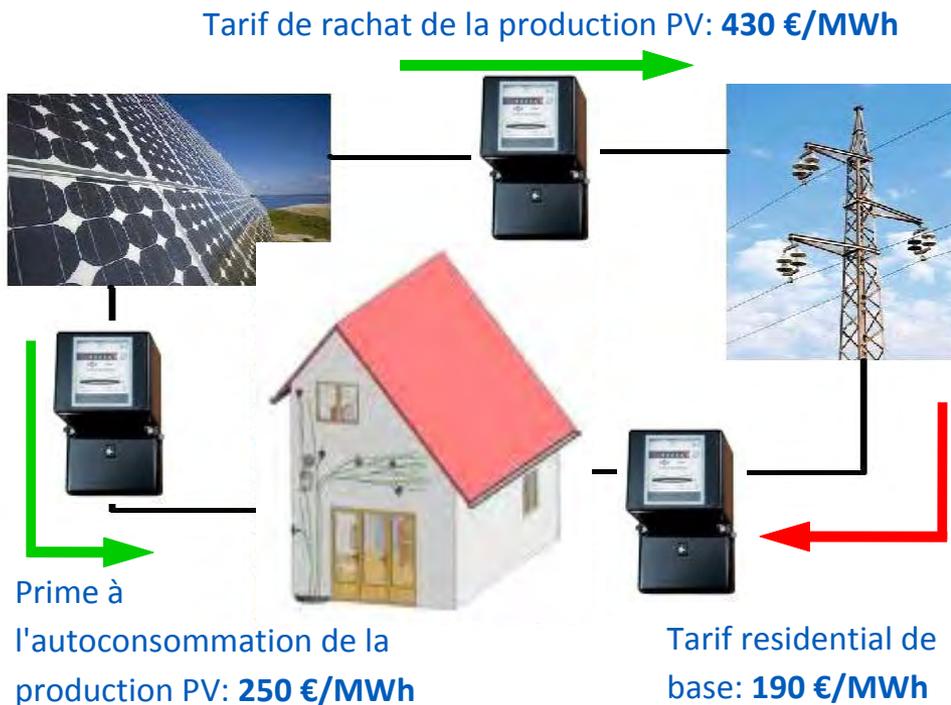
- réduction des émissions de CO₂ ;
- Promotion des EnR ;

▶ **Efficacité énergétique :**

- Réduction des coûts d'électricité ;
- Maîtrise de la consommation d'électricité ;
- Réduction / report des investissements dans le système électrique.

Efficacité des mécanismes d'incitation aux investissements dans le stockage d'électricité

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



3 compteurs :

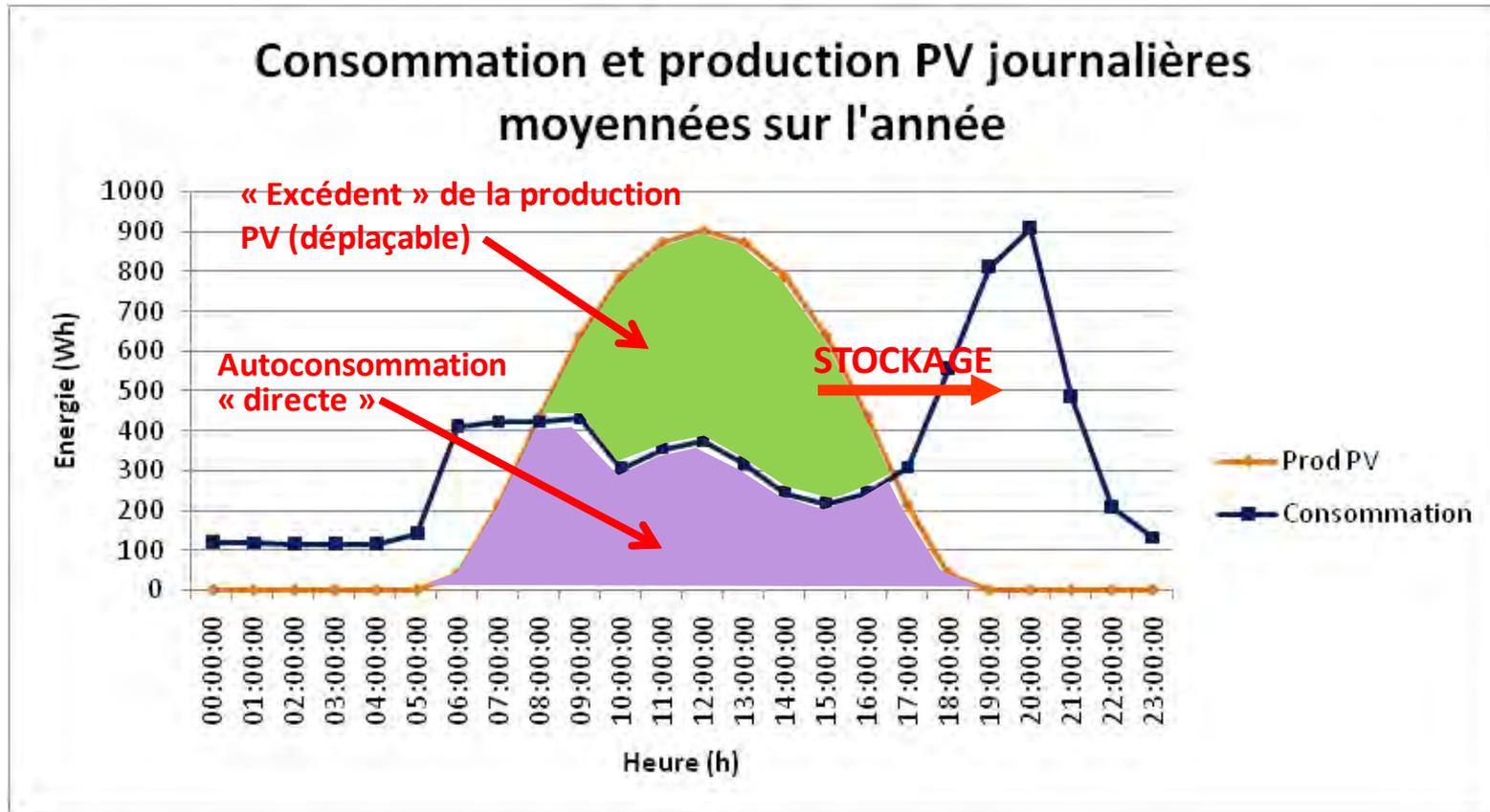
- Injection PV vers réseau
- Compteur énergie réseau
- Autoconsommation

Contrat sur 20 ans
Conditions du tarif 2009

Incitation à autoconsommer :

$$\begin{aligned} & [\text{Revenu avec autoconsommation à 100\%}] - [\text{Revenus sans autoconsommation}] \\ & = 250 - (430 - 190) = +10 \text{ €/MWh} \end{aligned}$$

Efficacité des mécanismes d'incitation aux investissements dans le stockage d'électricité



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

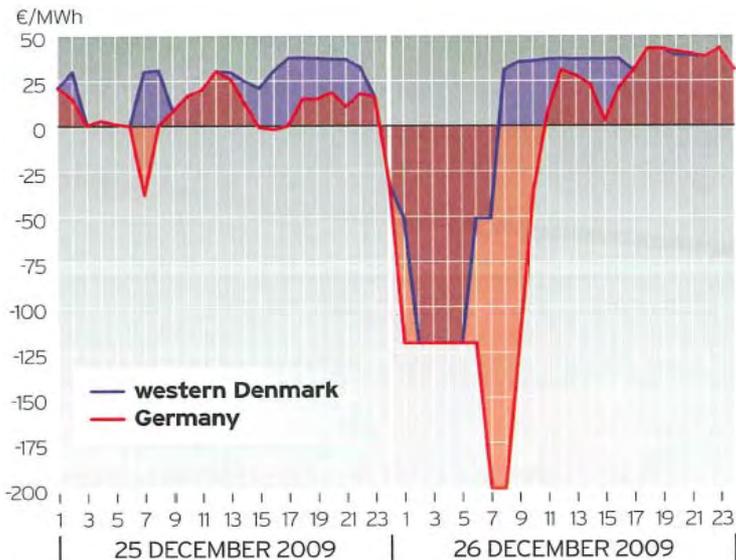
Efficacité des mécanismes d'incitation aux investissements dans le stockage d'électricité

Conclusions préliminaires de l'analyse :

- ▶ Le stockage permettrait théoriquement de déplacer de l'énergie pour la rendre plus efficace pour l'ensemble du système électrique (à la pointe) ;
- ▶ Cependant, le tarif étudié n'encourage pas l'installation du stockage domestique utilisé pour ce seul usage (pas de rentabilité économique avérée) :
 - Même avec un coût du stockage nul et un rendement égal à 90%, la rentabilité économique de cet usage pour un client domestique n'est pas avérée !
- ▶ La raison principale de l'inefficacité du mécanisme d'incitation étudié réside dans l'inadéquation entre la valorisation des pertes du stockage et celle de l'énergie transférée entre les heures creuses et les heures de pointe :
 - ✦ Les pertes dans le stockage sont valorisées sur la base du tarif résidentiel (190 €/MWh) ou sur la base du tarif de rachat de l'énergie PV (430 €/MWh) ;
 - ✦ L'incitation à transférer l'énergie entre les heures creuses et la pointe est seulement de 10 €/MWh (!!!)
- ▶ En outre, aucune prise en compte de la différence entre la vraie valeur de l'électricité aux heures de pointe et celle aux heures creuses n'est possible dans le cadre du tarif étudié.

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 1/2

- ◆ 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
- ◆ Besoin de travaux sur l'identification des services rendus, les valeurs associées, et les méthodes d'intégration de ces valeurs
- ◆ L'agrégation de valeurs pose le problème des intérêts des acteurs : interactions régulé / dérégulé, interactions dérégulé / dérégulé

Synthèse 2/2

- ◆ La valorisation du stockage est bouclée avec ses usages, ses acteurs, son contexte économique et réglementaire (par où rentrer dans la boucle ?)
- ◆ 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
- ◆ Le stockage peut souvent jouer sur plusieurs éléments de valeurs qu'il convient d'agrèger
- ◆ Les méthodes de valorisation classiques ne suffisent plus dans ce cadre
- ◆ Dans la perspective d'un besoin accru en stockage, il est nécessaire d'inventer de nouvelles régulations adaptées



Technologies du stockage d'électricité

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

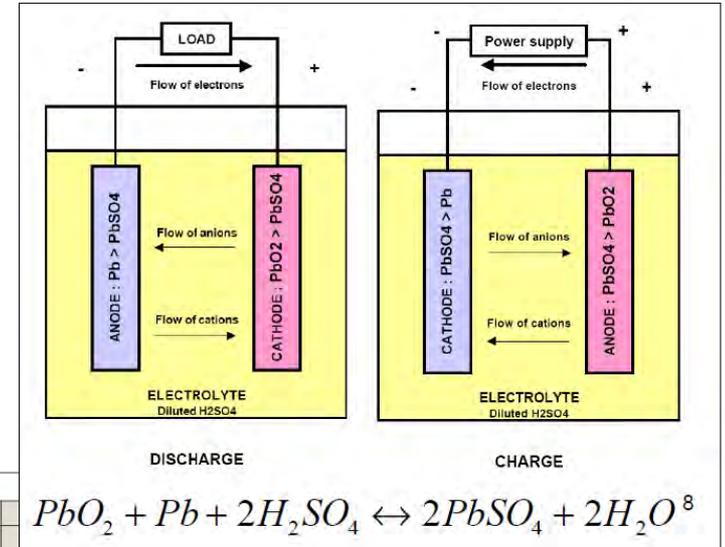
■ Autres caractéristiques

- ⊕ Impact environnemental
- ⊕ Maturité
- ⊕ Acceptabilité publique

Batteries conventionnelles

▶ 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

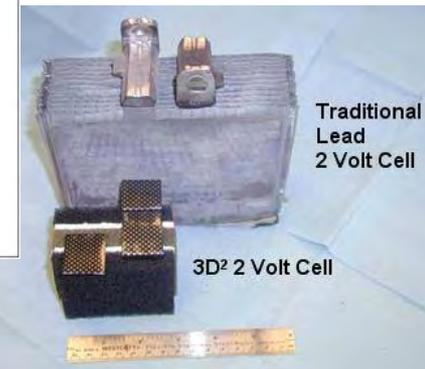
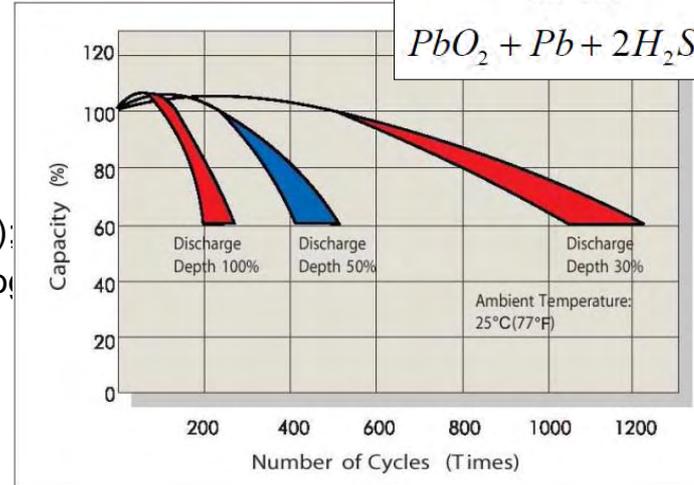


■ Avantages

- ⊕ Capacité (technologie avancée) ;
- ⊕ Faible volume (technologie avancée) ;
- ⊕ Bonne densité énergétique (technologie avancée) ;
- ⊕ Coût d'investissement modéré

■ Inconvénients

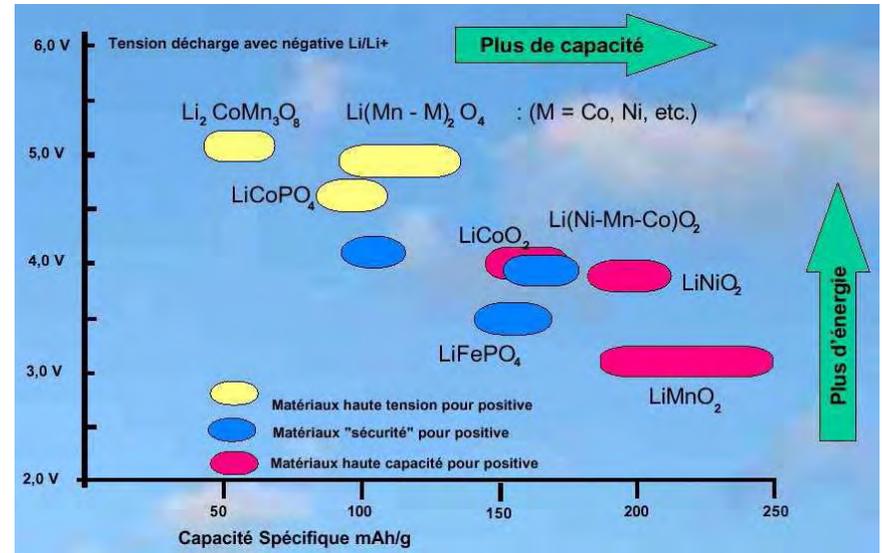
- ⊕ Faible rendement
- ⊕ Faible durée de vie (cyclage)
- ⊕ Impact environnemental potentiellement non-négligeable



Batteries conventionnelles

▶ 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), 140-180Wh/kg (LP)	> 1000	Qq min - 1 h	85-90 ou plus

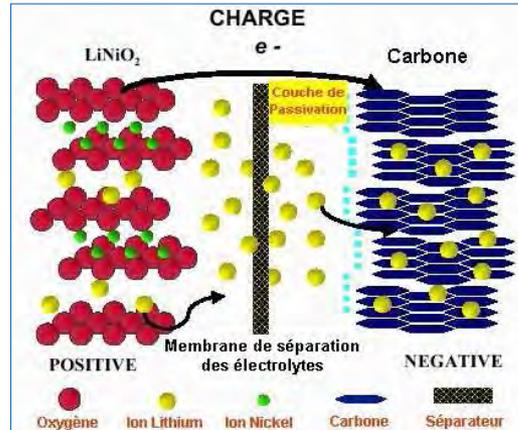


■ Avantages

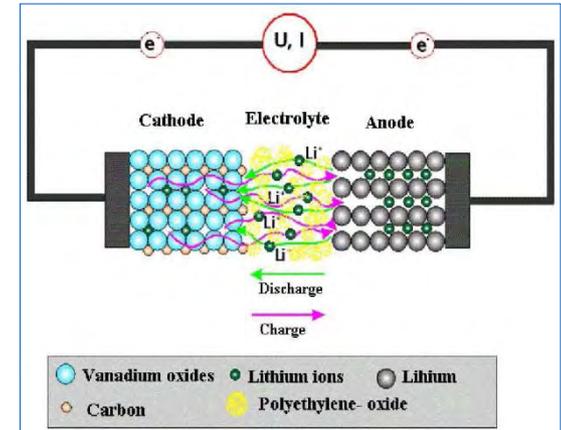
- ⊕ Haute densité énergétique ;
- ⊕ Bon rendement ;
- ⊕ Durée de vie, cyclage ;
- ⊕ Faible impact environnemental.

■ Inconvénients

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



→ Lithium - Ion



→ Lithium - Polymer

Batteries à haute température

▶ 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



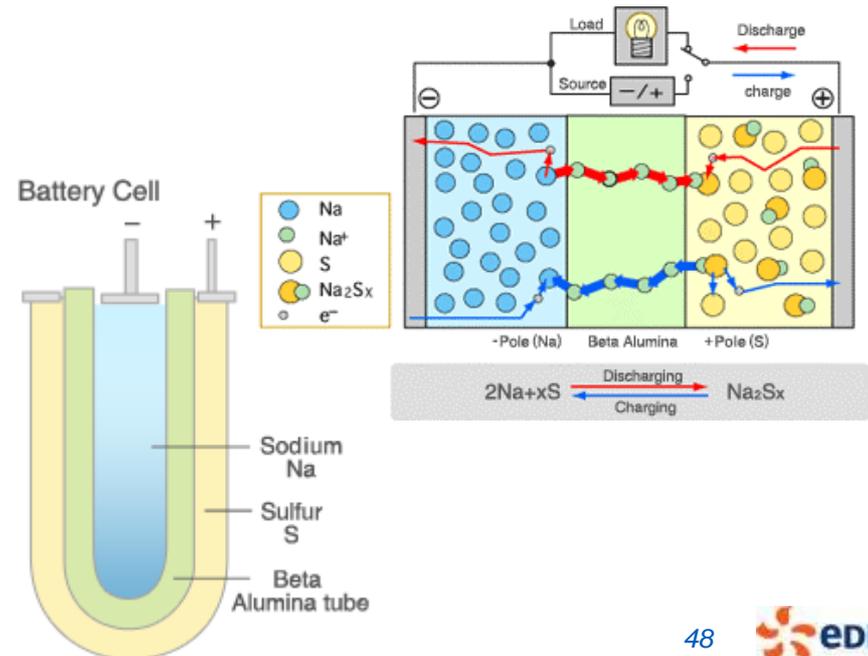
34 MW NAS alongside 51 MW Wind Farm (Futamata, Japan)

■ 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.



Batteries à haute température

► Batteries Zebra

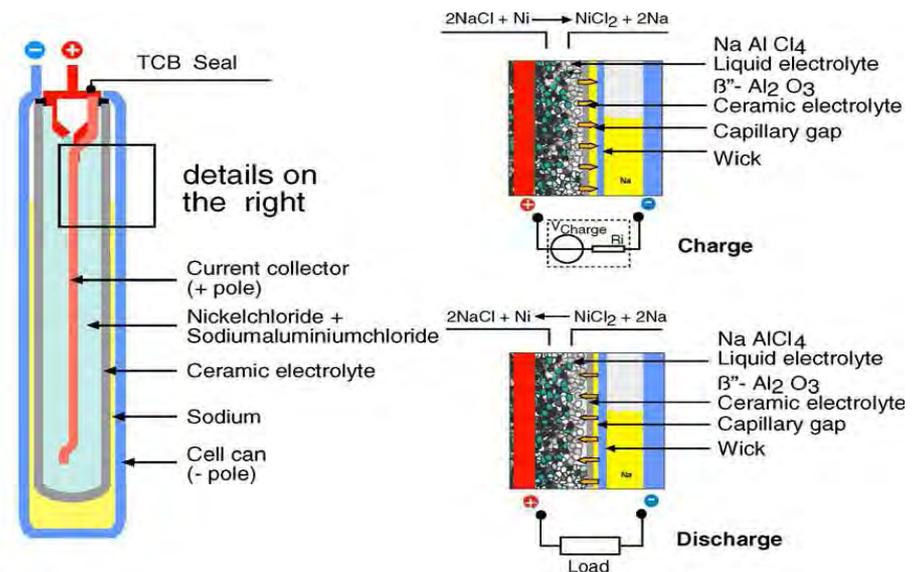
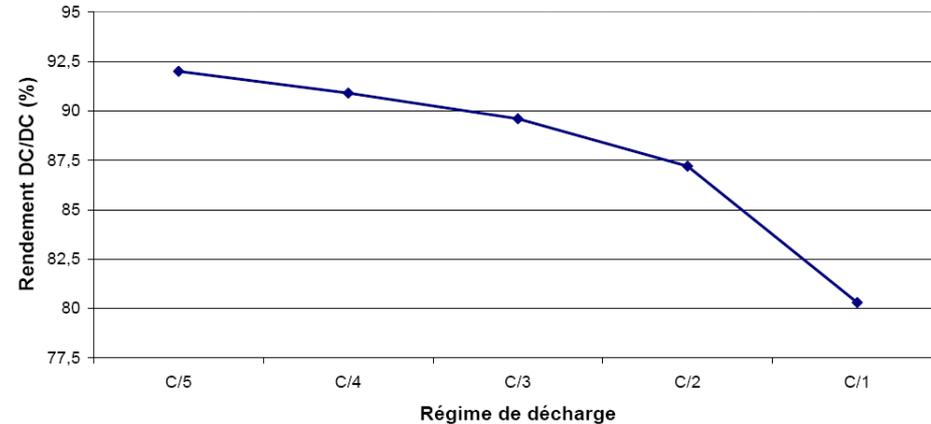
Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
5 kW - 500 kW	95 - 120Wh/kg	400	2 - 10h	85 - 90

■ Avantages

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

■ Inconvénients

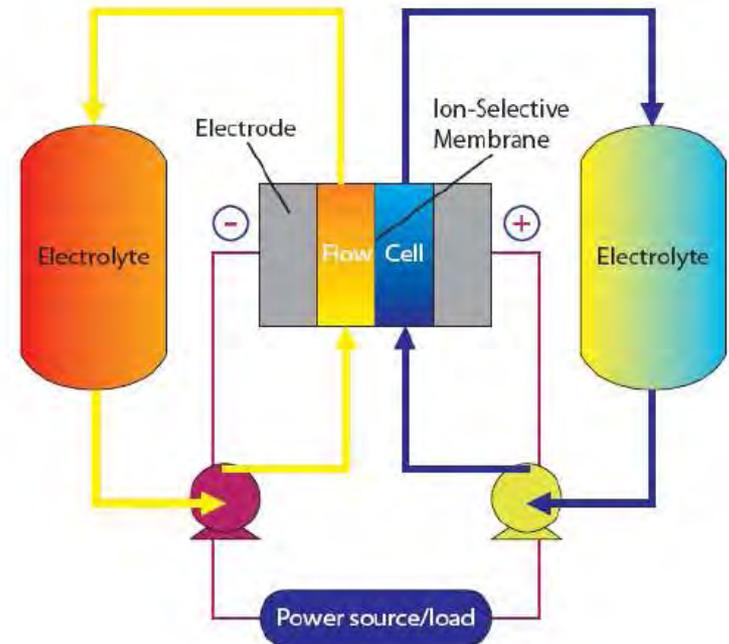
- ⊕ Haute température (> 300°C) ;
- ⊕ Autodécharge en inactivité (7 – 17% par jour) ;
- ⊕ Temps de réponse élevé (à froid) ;
- ⊕ Pas mature pour des application stationnaires.



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	$U^{4+} + e^- \rightarrow U^{3+}$	-0.607	$UO_2^{2+} + e^- \rightarrow UO_2^+$	0.06	0.7
Fe/Ti	$Ti^{3+} + e^- \rightarrow Ti^{2+}$	-0.9	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771	1.7
Fe/Cr	$Cr^{3+} + e^- \rightarrow Cr^{2+}$	-0.407	$Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$	0.771	1.2
V/V	$V^{3+} + e^- \rightarrow V^{2+}$	-0.255	$V^{5+} + e^- \rightarrow V^{4+}$	0.991	1.2
Br/S	$S + 2e^- \rightarrow 2S^{2-}$	-0.48	$Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	1.087	1.5
Zn/Br	$Zn^{2+} + 2e^- \rightarrow Zn$	-0.763	$Br_2 + 2e^- \rightarrow 2Br^-$	1.087	1.9
V/O	$V^{3+} + e^- \rightarrow V^{2+}$	-0.255	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	1.5
Ti/O	$Ti^{3+} + e^- \rightarrow Ti^{2+}$	-0.9	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	2.1
Cr/O	$Cr^{3+} + e^- \rightarrow Cr^{2+}$	-0.407	$O_2 + 4H^+ + e^- \rightarrow 2H_2O$	1.229	1.6

Source : Petra de Boer Jillis Raadschelders, KEMA

Batteries à circulation

■ 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

Volants d'inertie

▶ Performances

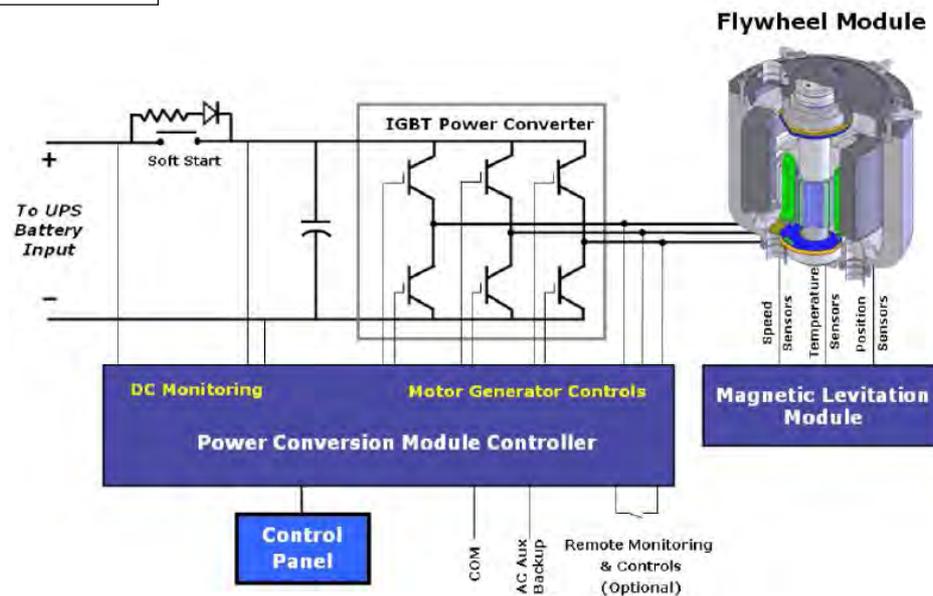
Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
some kW - Some MW	1 -10 Wh/kg	150-600 (HP) 400-3000 (LD)	Some min (HP) 1 – 3 h (LD)	85 - 95

■ 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.



Super-capacités

► 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

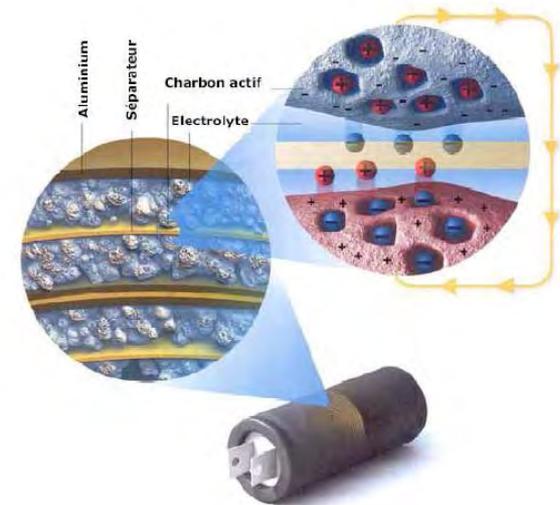
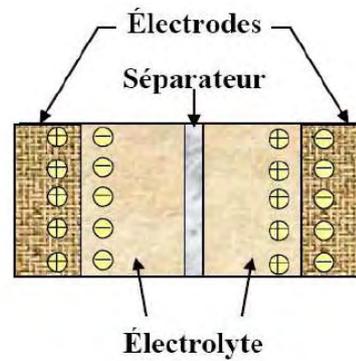


■ Avantages

- ⊕ 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.



Supraconducteurs (SMES)

Performances

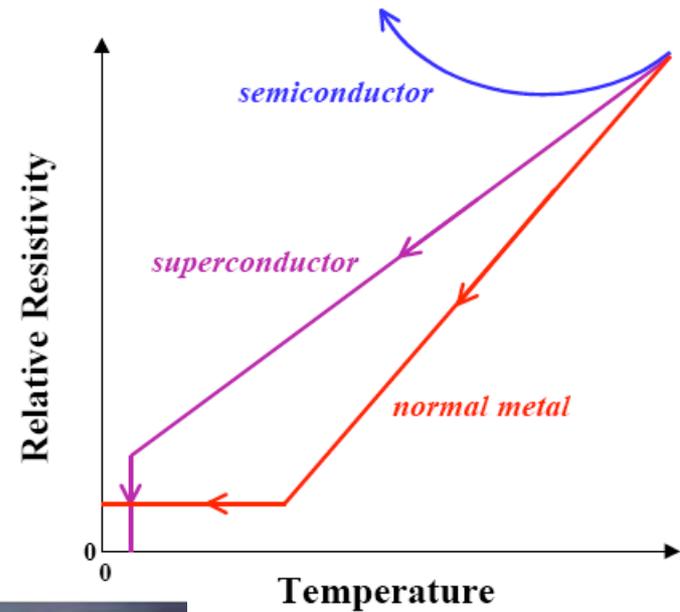
Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
some kW - Some MW	0.5 -3 Wh/kg	100 - 500	Some 100 ms – Some 10 sec	85 – 95 (wo cryogenic part)

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.

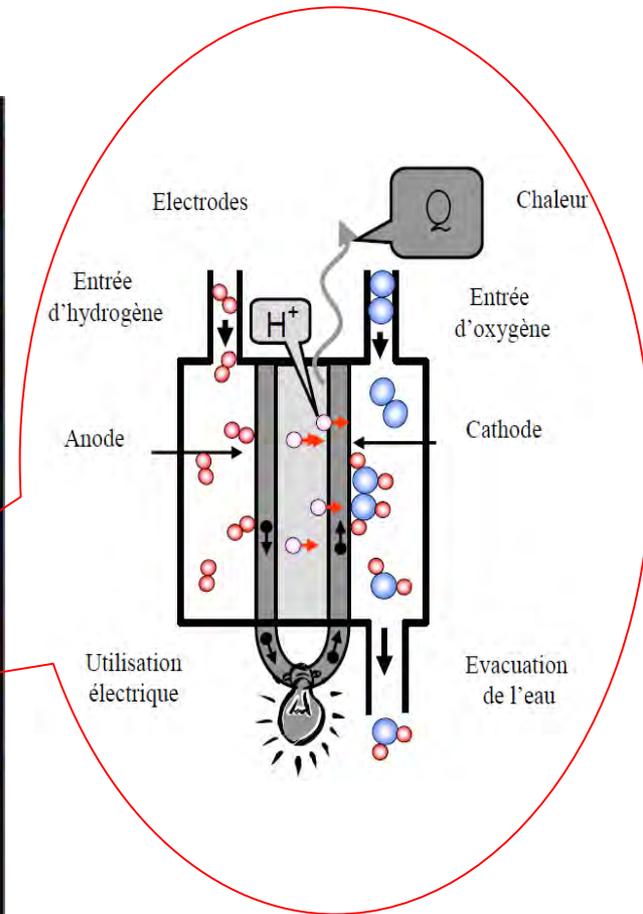
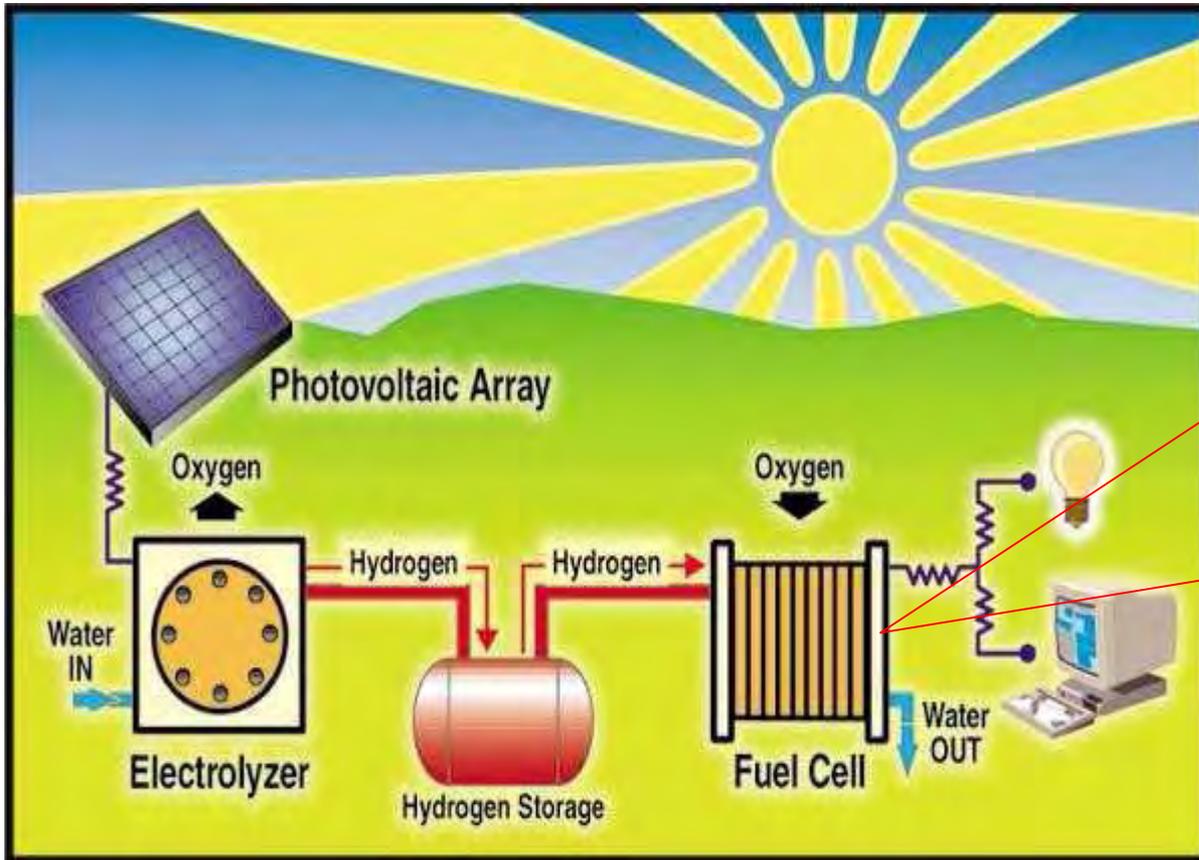
Inconvénients

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



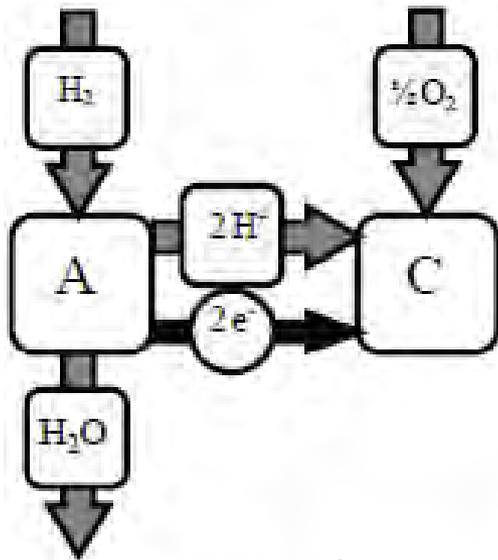
Piles à combustible

► Structure and functioning

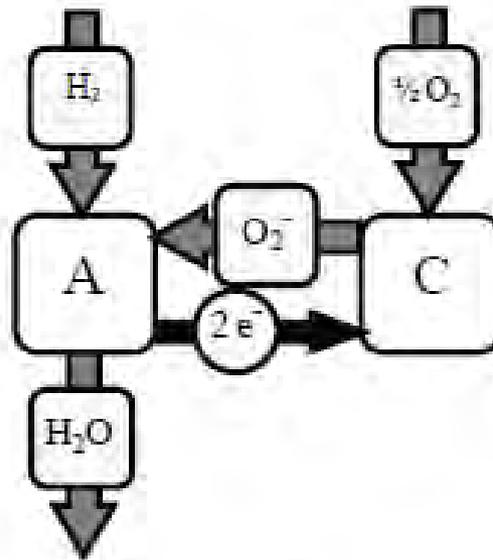


Piles à combustible

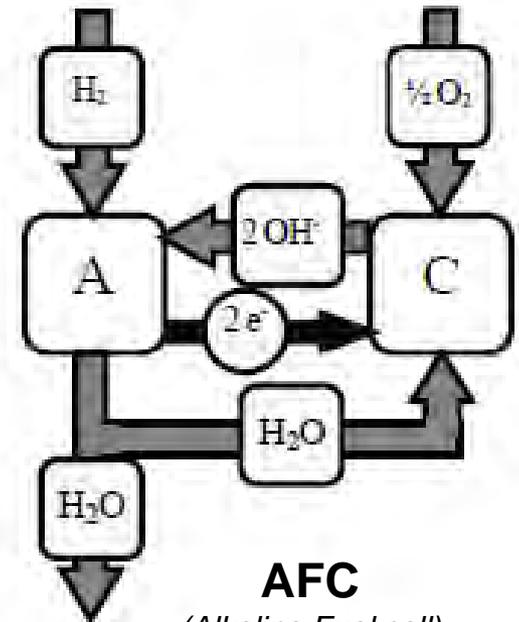
► Principaux types des Piles à Combustion



PEMFC
(Proton Exchange
Membrane Fuel Cell)



SOFC
(Solid Oxide Fuel Cell)



AFC
(Alkaline Fuel cell)

Piles à combustible

► 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	CO2, Hg, Cl, S	66-65 %	Mobile and Stationary	Mature
PEMFC Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Solid polymer	30-100°C	H2, high content H2 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	H2, high content H2 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	H2, high content H2 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	H2, high content H2 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

Piles à combustible

► 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%

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

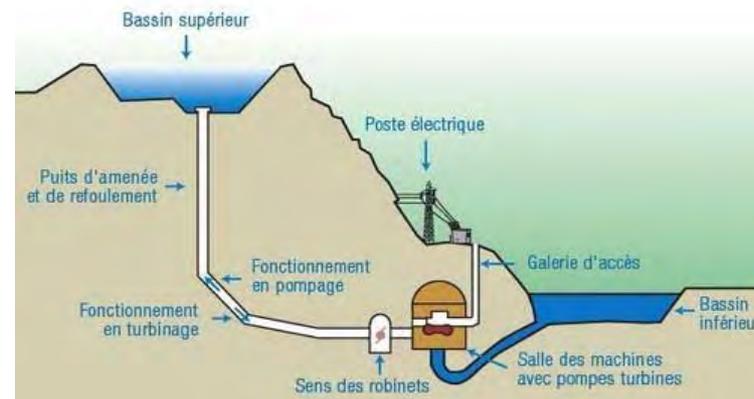
- ⊕ Mature ;
- ⊕ Bon rendement ;
- ⊕ Durée de vie (plus de 40 ans), cyclage ;
- ⊕ Monitoring de charge facile.

■ Inconvénients

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

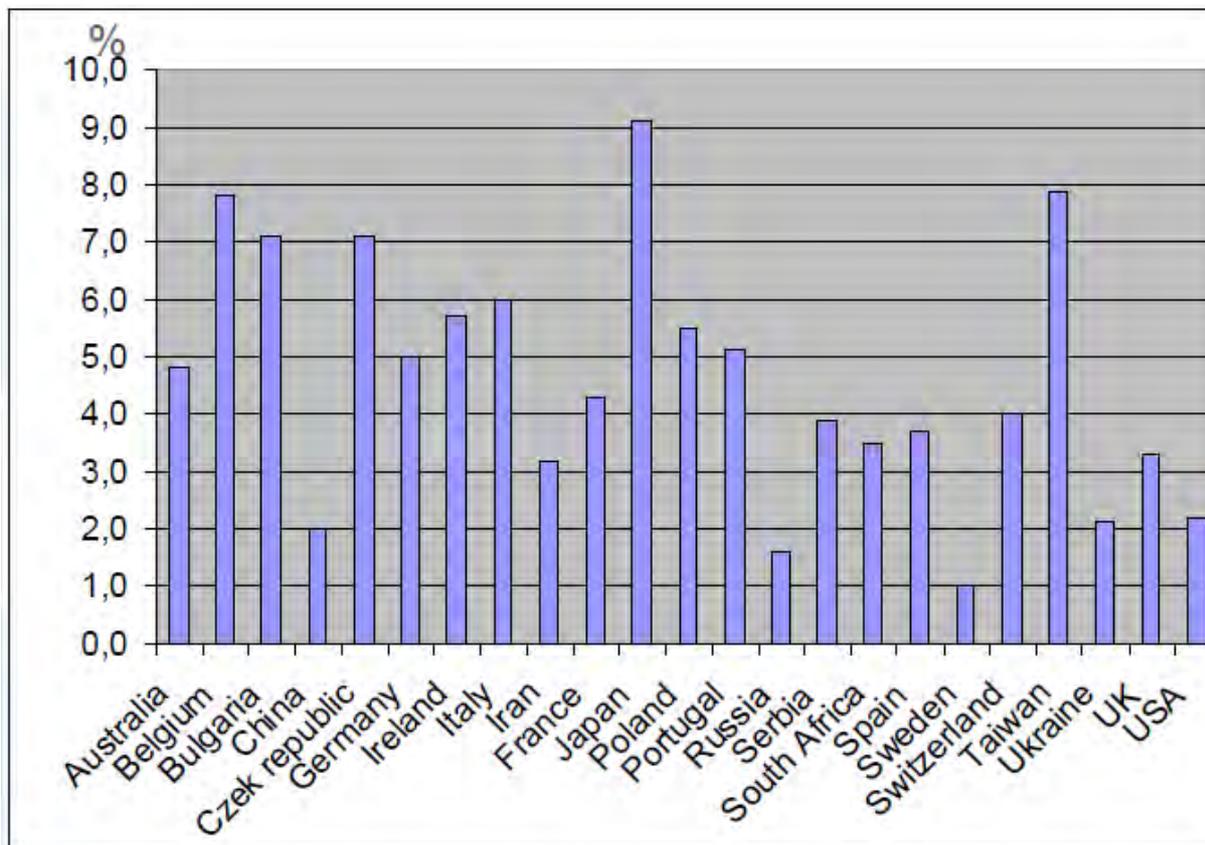


© La médiathèque EDF / Michel Brigeud
Barrage et retenue de la STEP de Grand'Maison (Isère)



Stockage par pompage-turbinage hydraulique

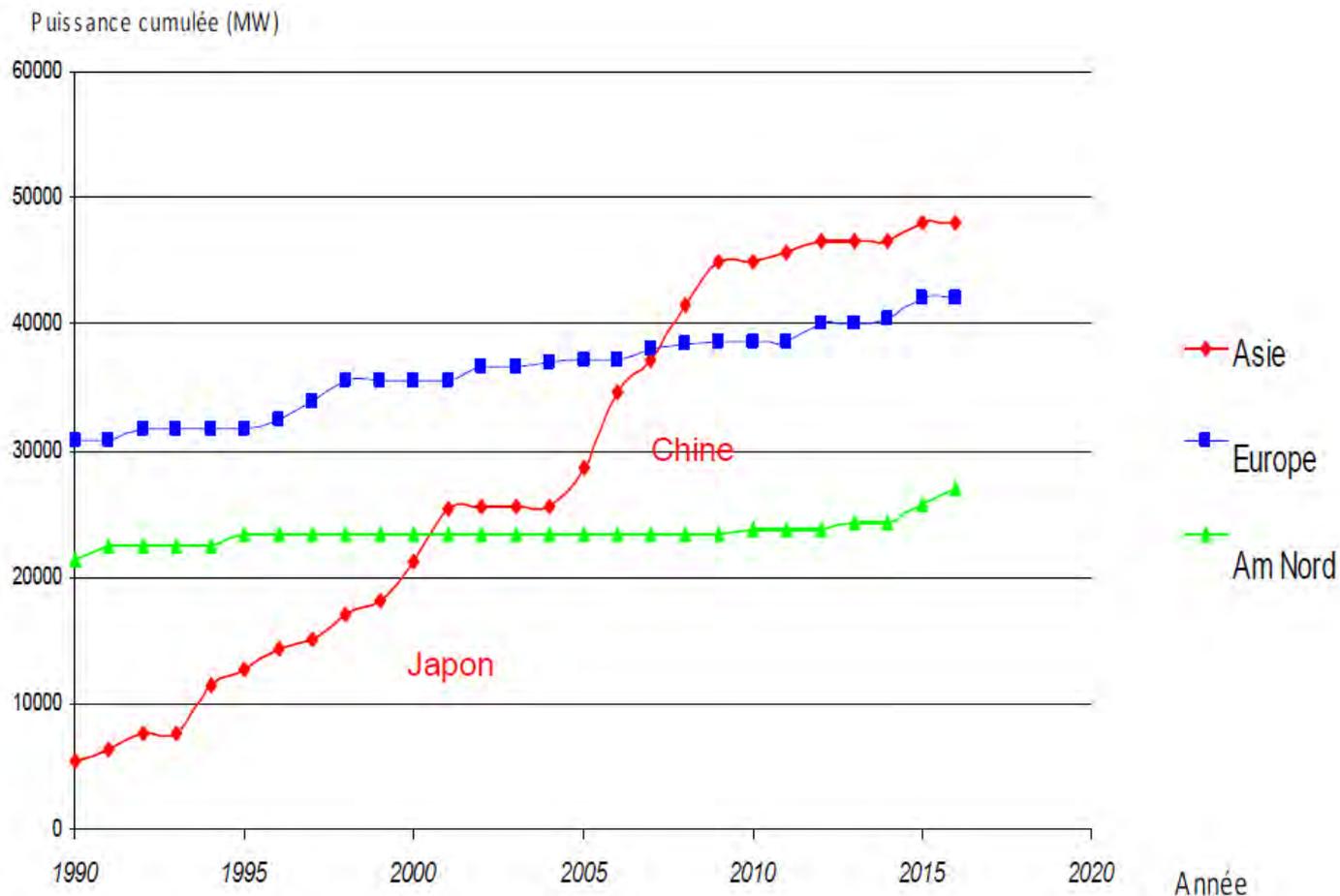
- ▶ Plus de 100 GW de puissance cumulée avec 380 centrales hydrauliques de pompage – turbinage dans le monde



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

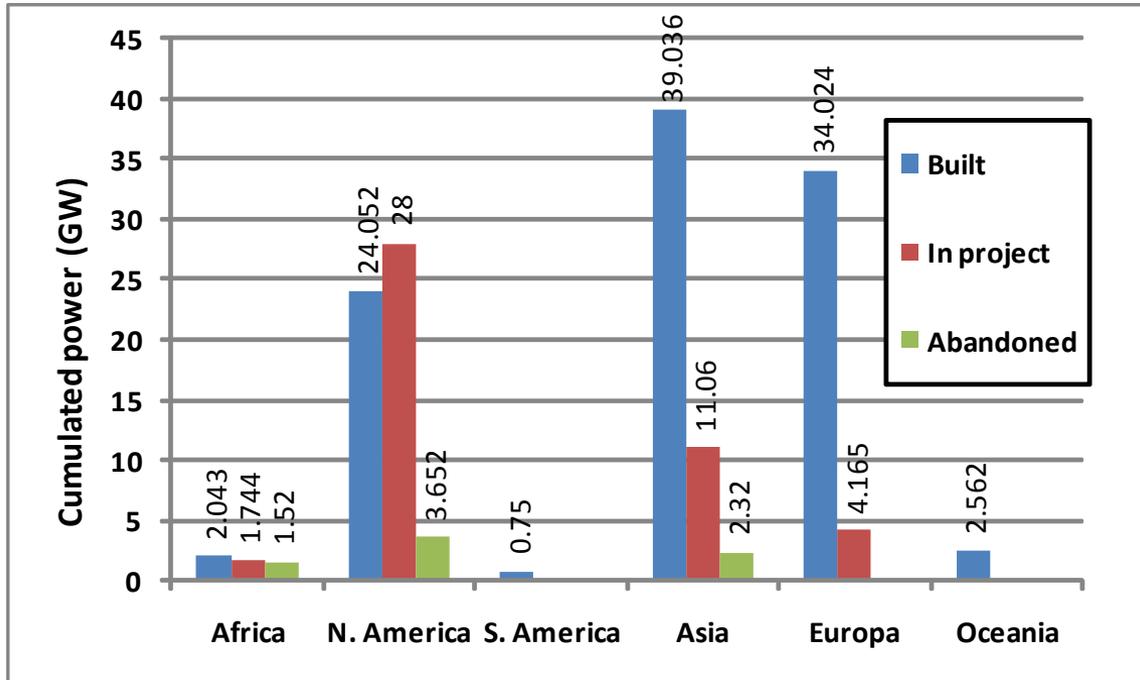
Stockage par pompage-turbinage hydraulique

► Développement du stockage hydraulique par pompage-turbinage



Stockage par pompage-turbinage hydraulique

Projets des centrales hydroliques de pompage - turbinaje

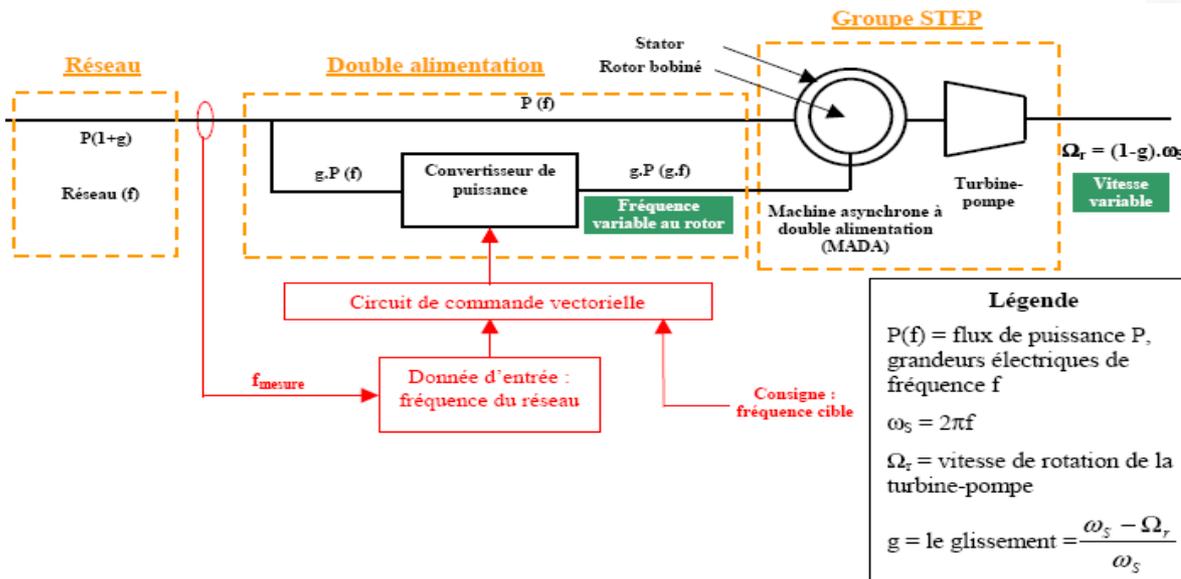
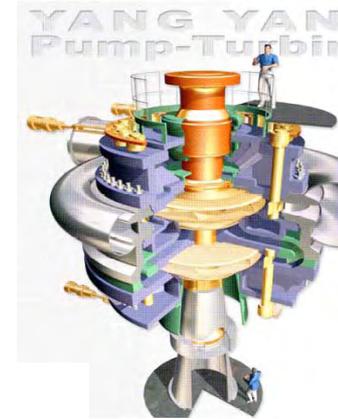


Projets européens

Suisse	
•Nant de Drance (600 MW)	
•Linth Limmern (1200 MW)	
•Hongrin Léman (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	
•Baixo Sabor (171 MW)	
•Alqueva 2 (240 MW)	
•Alto Tamega (600 MW)	
Slovénie	
•Avce (185 MW)	
Royaume uni	
•Great Glen (600 MW)	
•Sloy (60 MW)	

Stockage par pompage-turbinage hydraulique

► Evolutions récentes: Turbines à vitesse variable



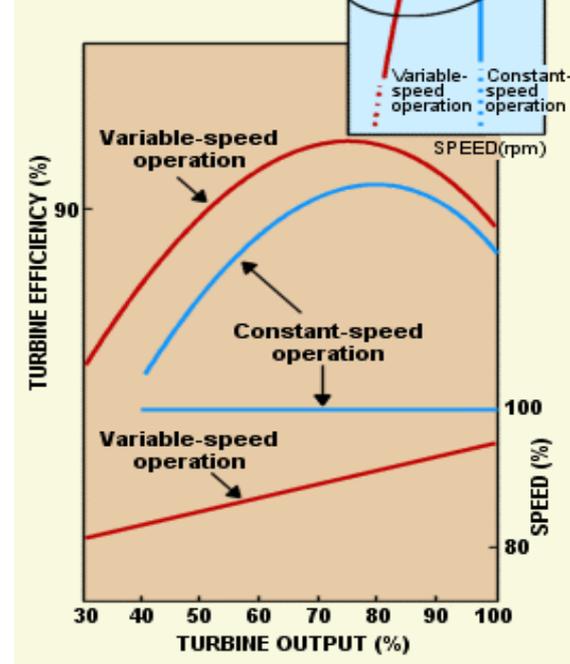
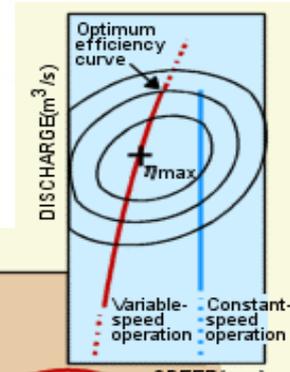
Légende

$P(f)$ = flux de puissance P , grandeurs électriques de fréquence f

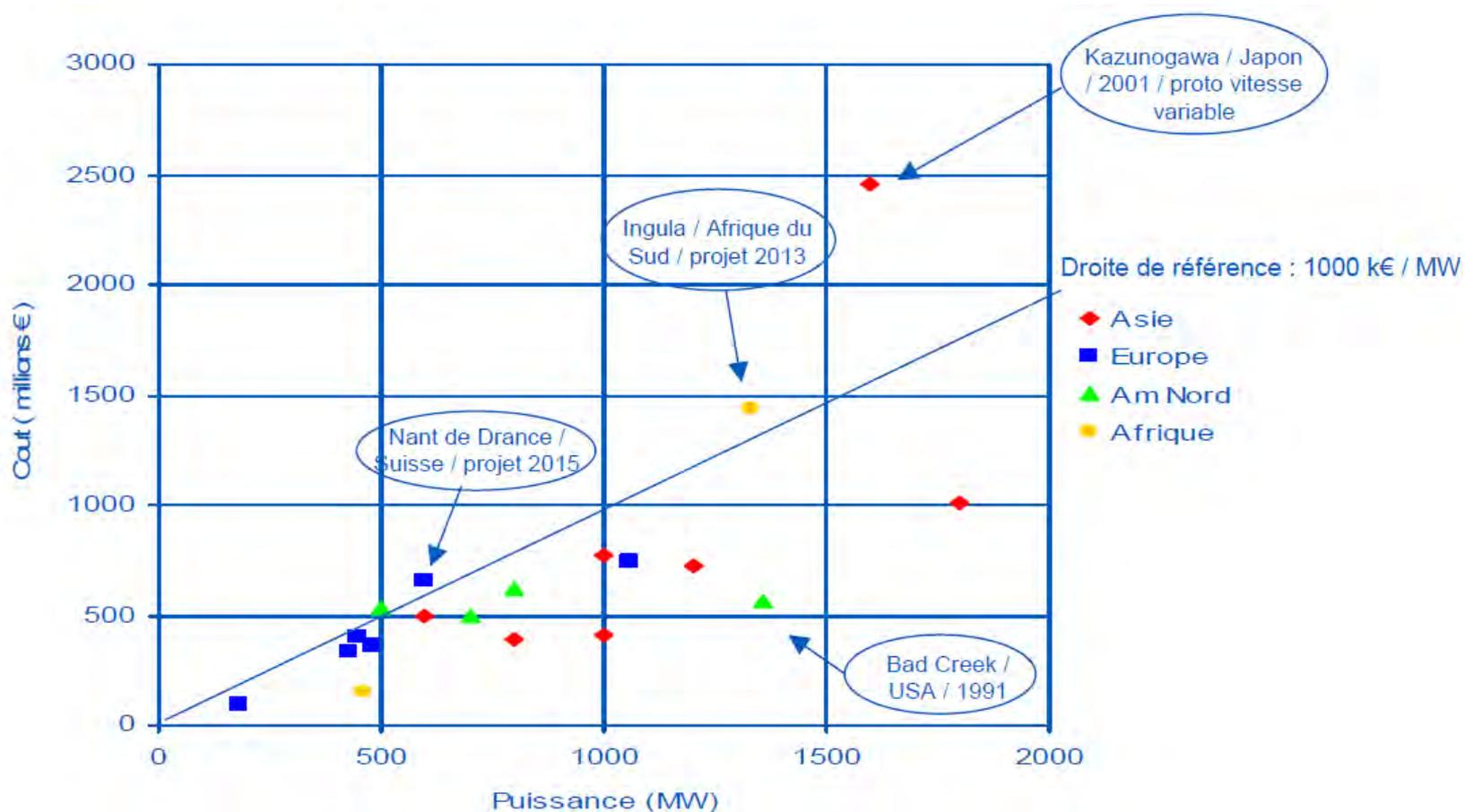
$\omega_s = 2\pi f$

Ω_r = vitesse de rotation de la turbine-pompe

g = le glissement = $\frac{\omega_s - \Omega_r}{\omega_s}$



Stockage par pompage-turbinage hydraulique



Stockage pneumatique

► Typologie

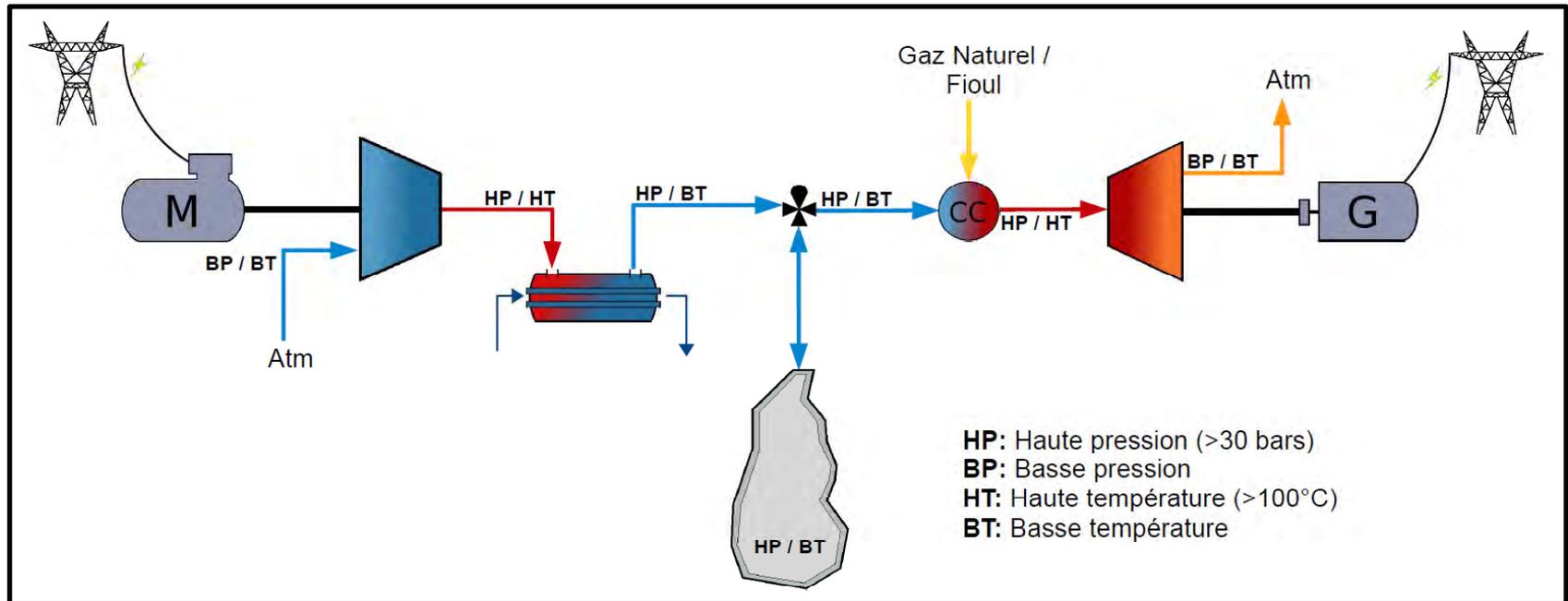
- Stockage diabatique à air comprimé (CAES);
- Stockage diabatique à air comprimé “avancé” ;
- Stockage adiabatique à air comprimé (CAES-A);
- Stockage hydropneumatique ;
- Stockage à air liquide (cryogénique).

► 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

Stockage pneumatique

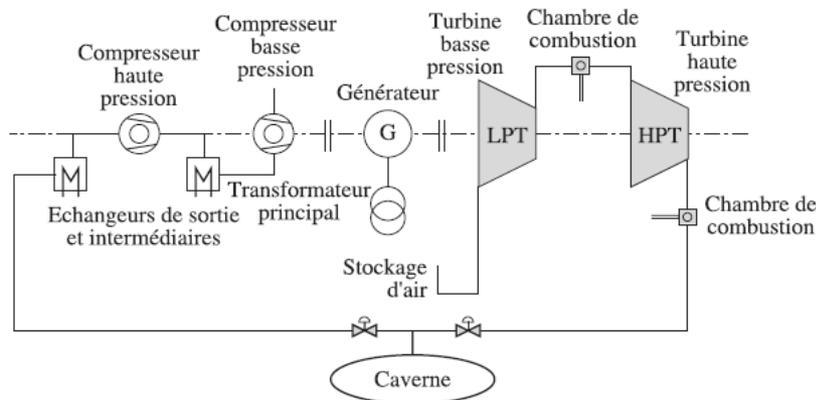
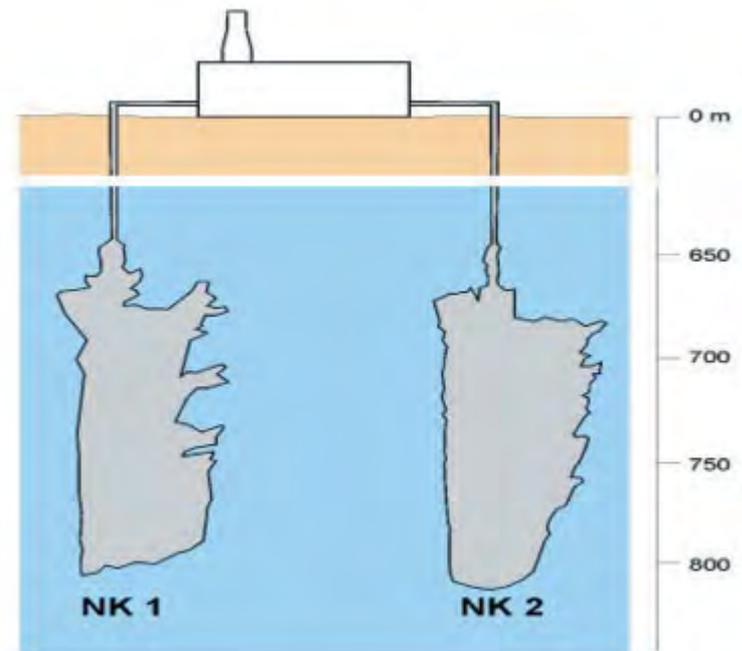
► Diabatic Compressed Air Energy Storage



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



Source : Fritz CROTOGINO, *Kavernen Bau und Betrieb GmbH*

Centrale de stockage à air comprimé de Alabama (1991)

Caractéristiques

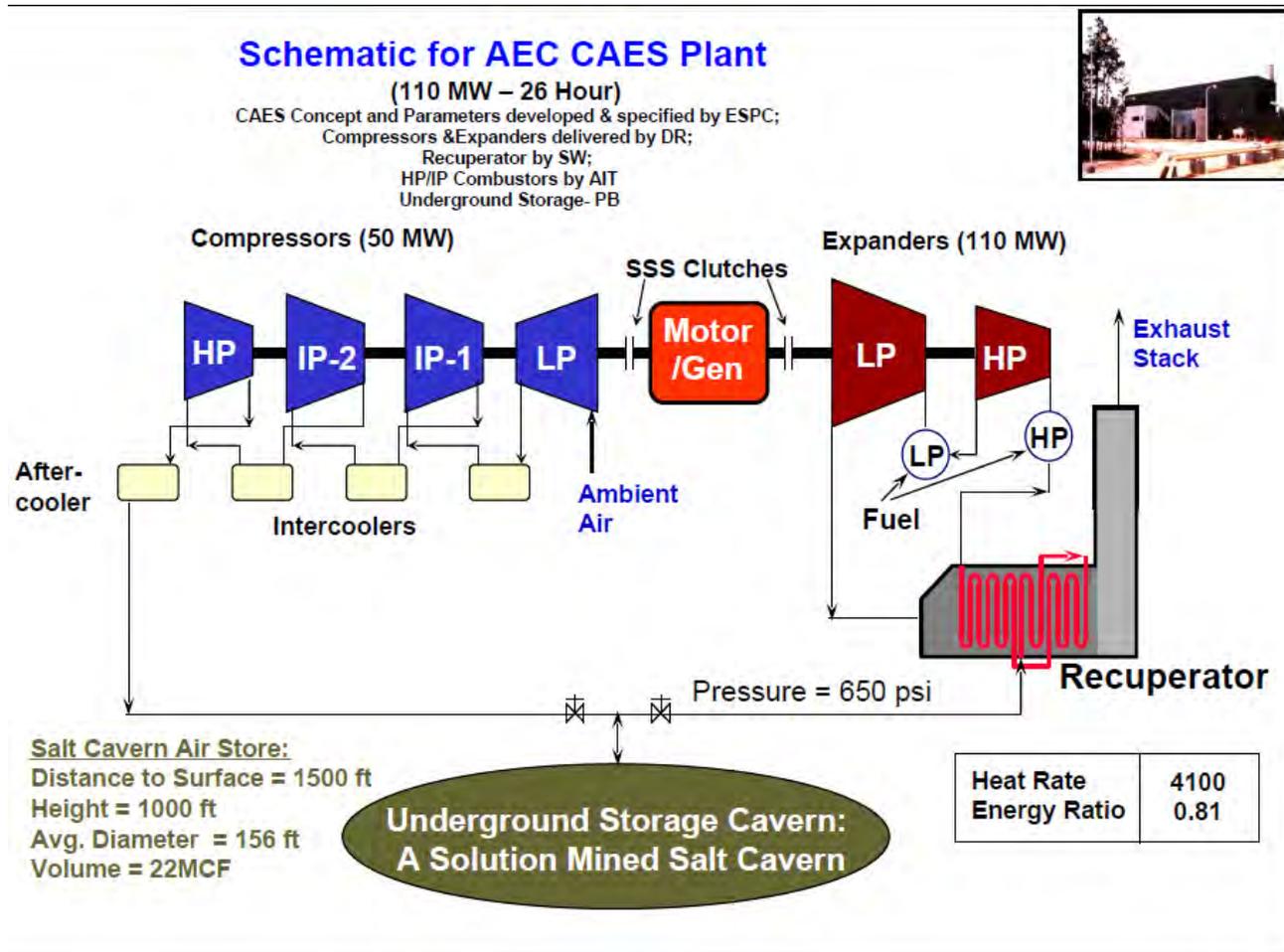
Puissance de détente 110 MW; 26 h de fonctionnement continu à puissance max ;
Puissance de compression 51 MW, Coût d'investissement 600\$/kW



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

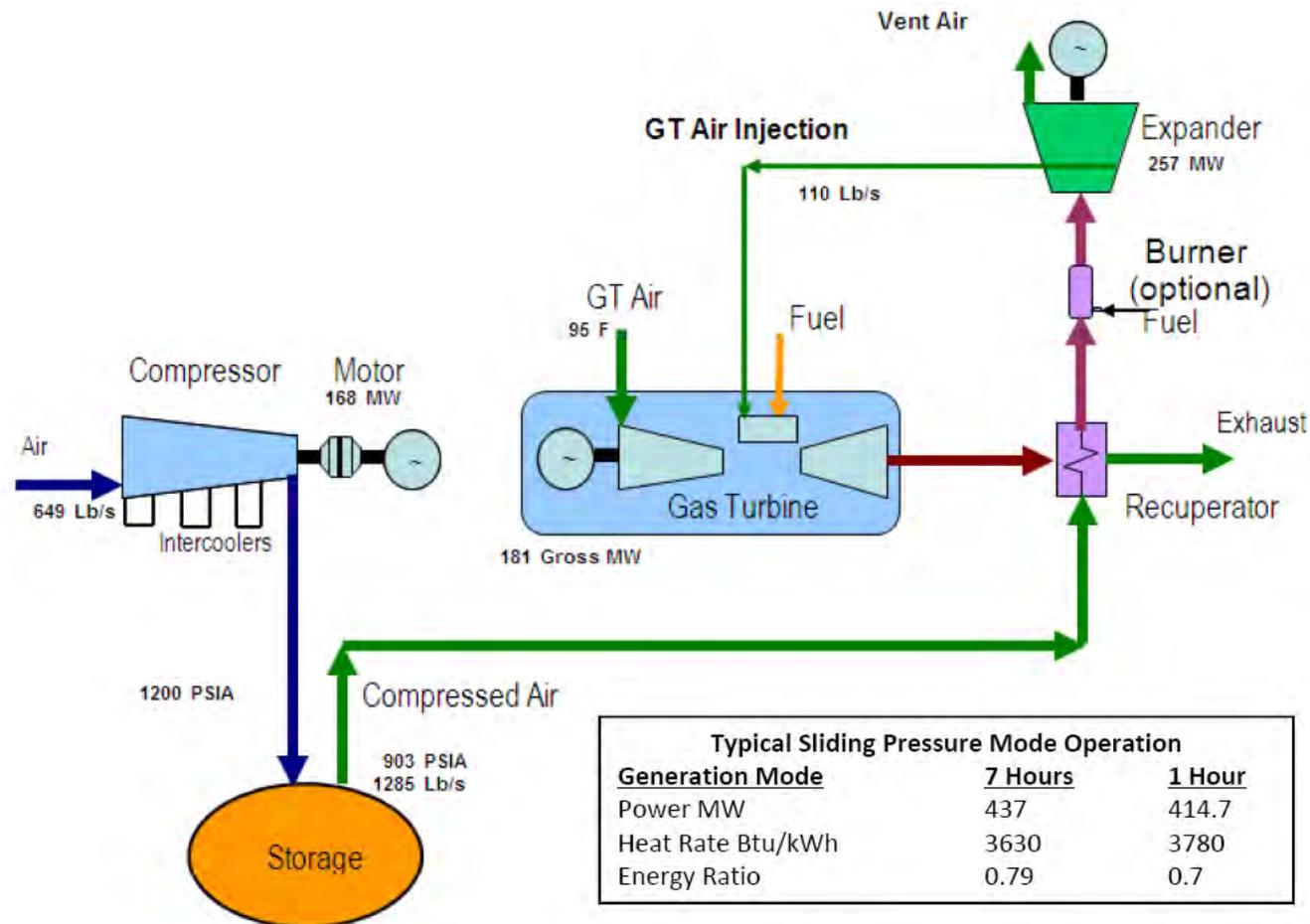
Centrale de stockage à air comprimé de Alabama

Architecture d'une centrale de stockage CAES



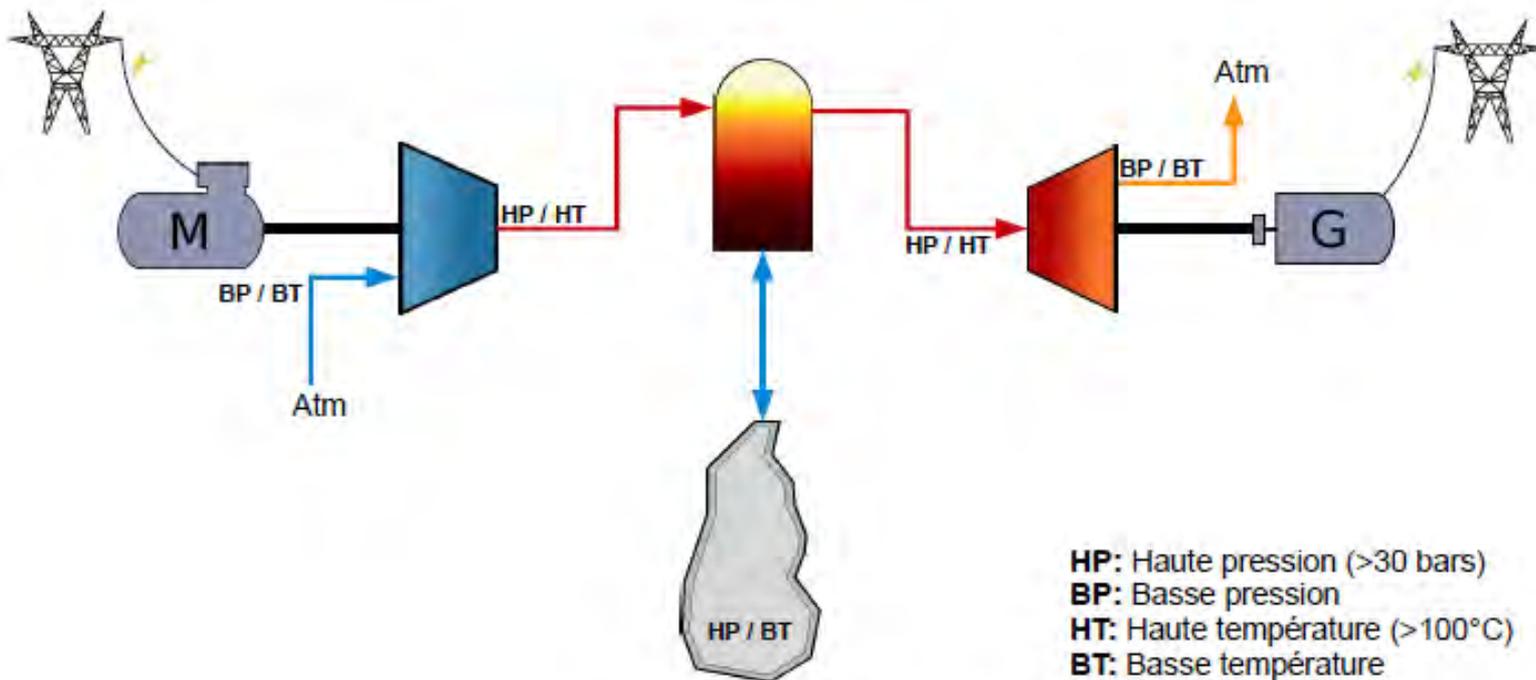
Stockage pneumatique

► Stockage à Air Comprimé avancé



Stockage pneumatique

► Stockage à Air Comprimé adiabatique



Stockage à air comprimé

► 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

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

Stockage pneumatique

► Hydropneumatique

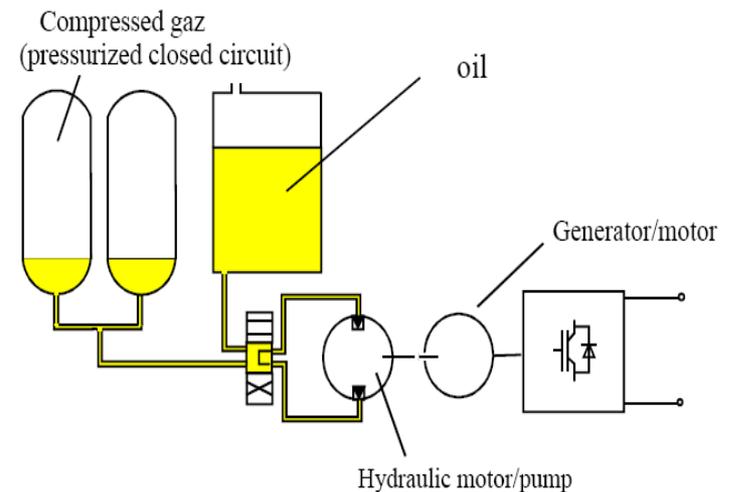
Plage des puissances	Energie spécifique	Coût(€/kW)	Durée maximale	Rendement global (en %)
100 kW - qq MW	1 - 4 Wh/kg	500 €/kWh + 1000 €/kW	qq heures	75

■ 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.



Stockage d'électricité thermique à haute température (SETher)

▶ 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)

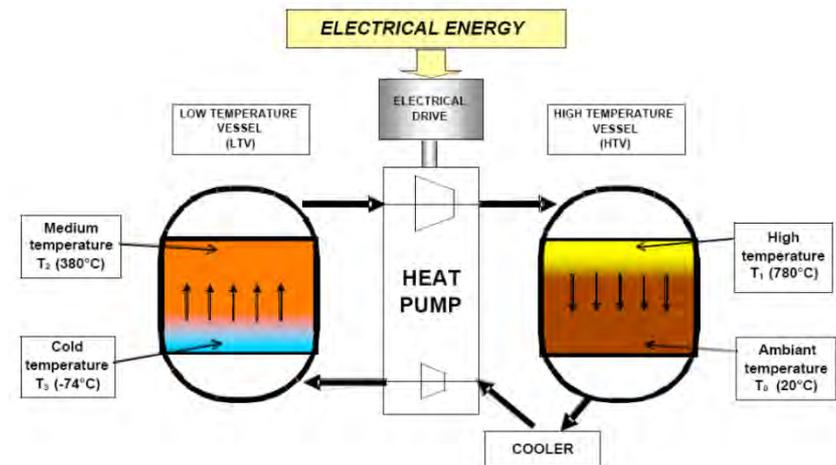


■ Avantages

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

■ Inconvénients

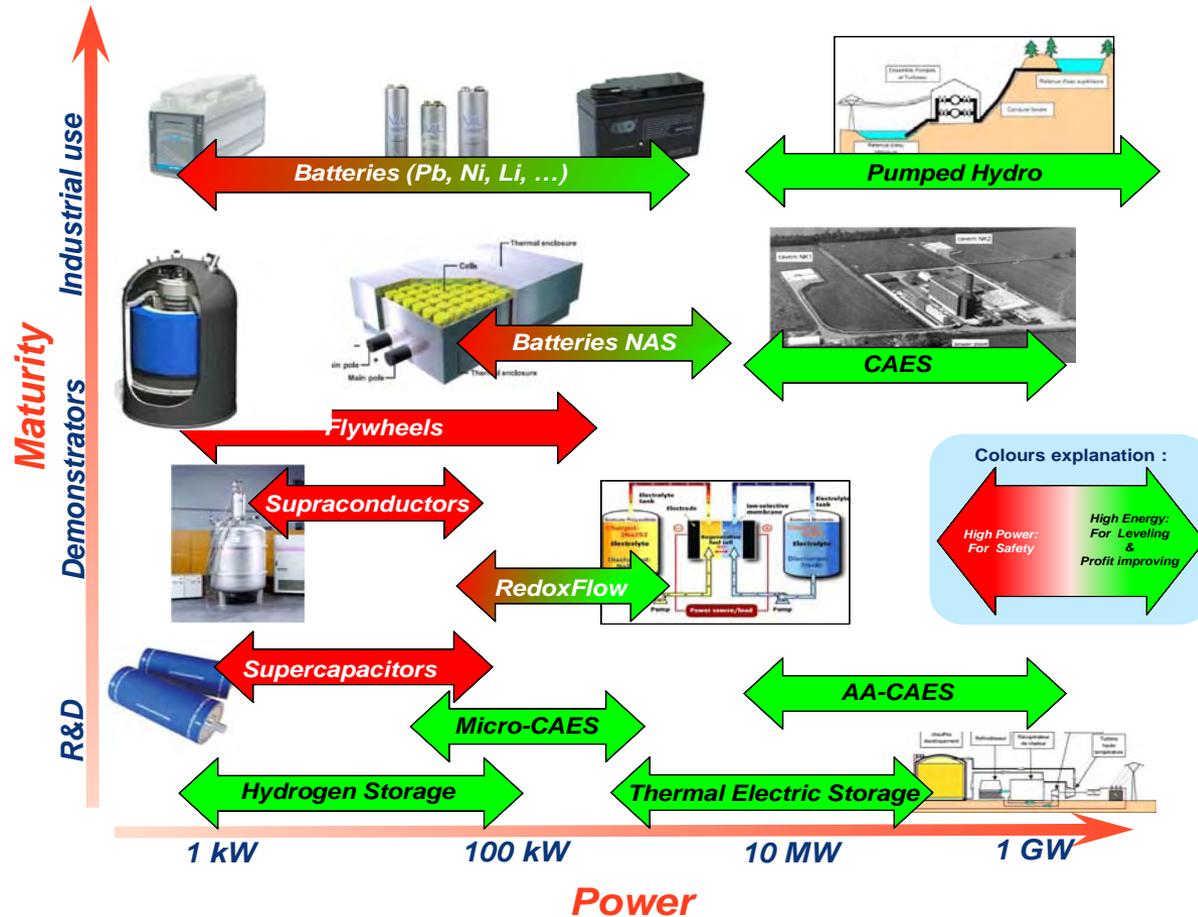
- ⊕ Technologie en phase de la R&D.



Source : Jacques Ruer, SAIPEM

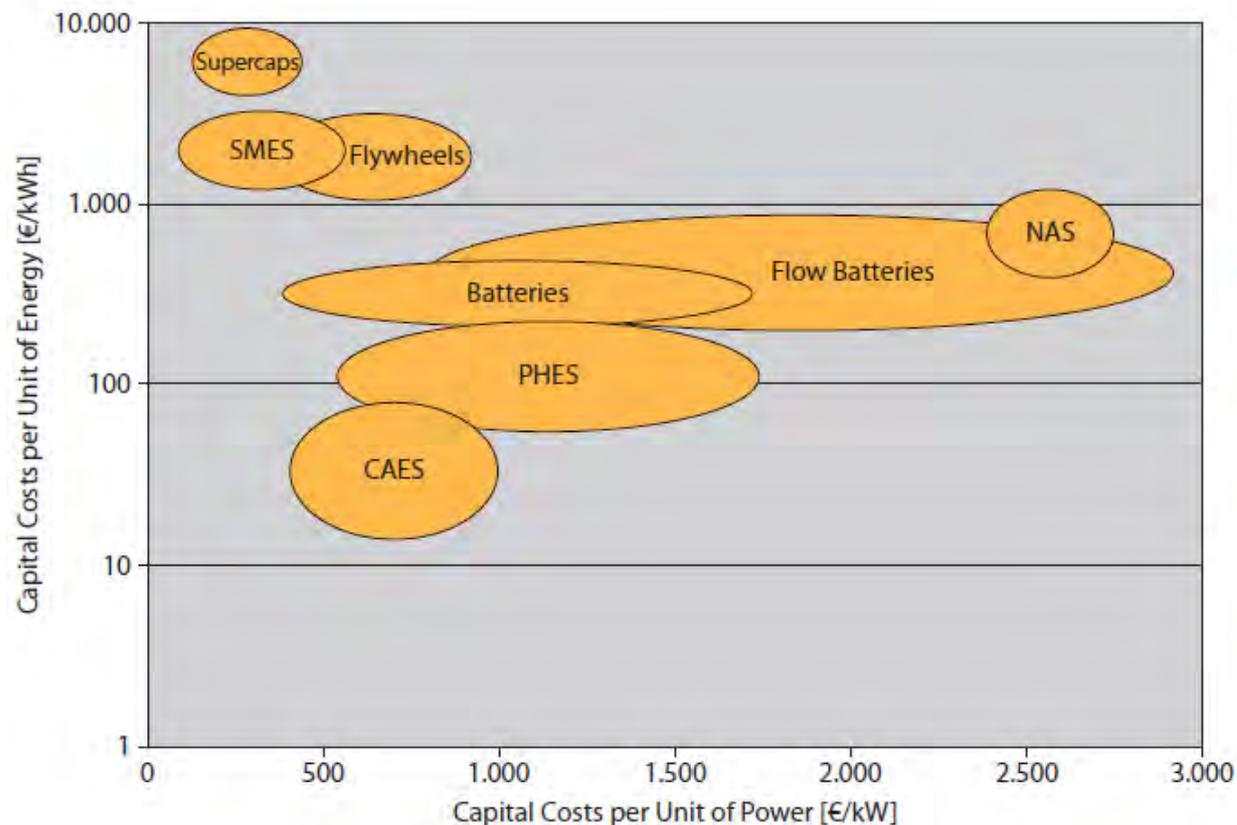
Technologies de stockage d'électricité

► Puissance versus Maturité



Technologies de stockage d'électricité

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



Source : Petra de Boer Jillis Raadschelders, KEMA