



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Collège de France.
Chaire du développement durable
Environnement, énergie et société
Chaire annuelle, année académique 2010-2011

Accumulateurs/piles à combustibles, applications réseaux



Stéphane LASCAUD EDF R&D. 02 Mars 2011

stephane.lascaud@edf.fr



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE

Sommaire

Stockage d'énergie et réseaux électriques

Facteurs de développement du stockage par batteries pour les réseaux électriques

Inventaires des technologies électrochimiques

Inventaire des applications du stockage d'énergie par batteries

Éléments économiques

Sommaire

Stockage d'énergie et réseaux électriques

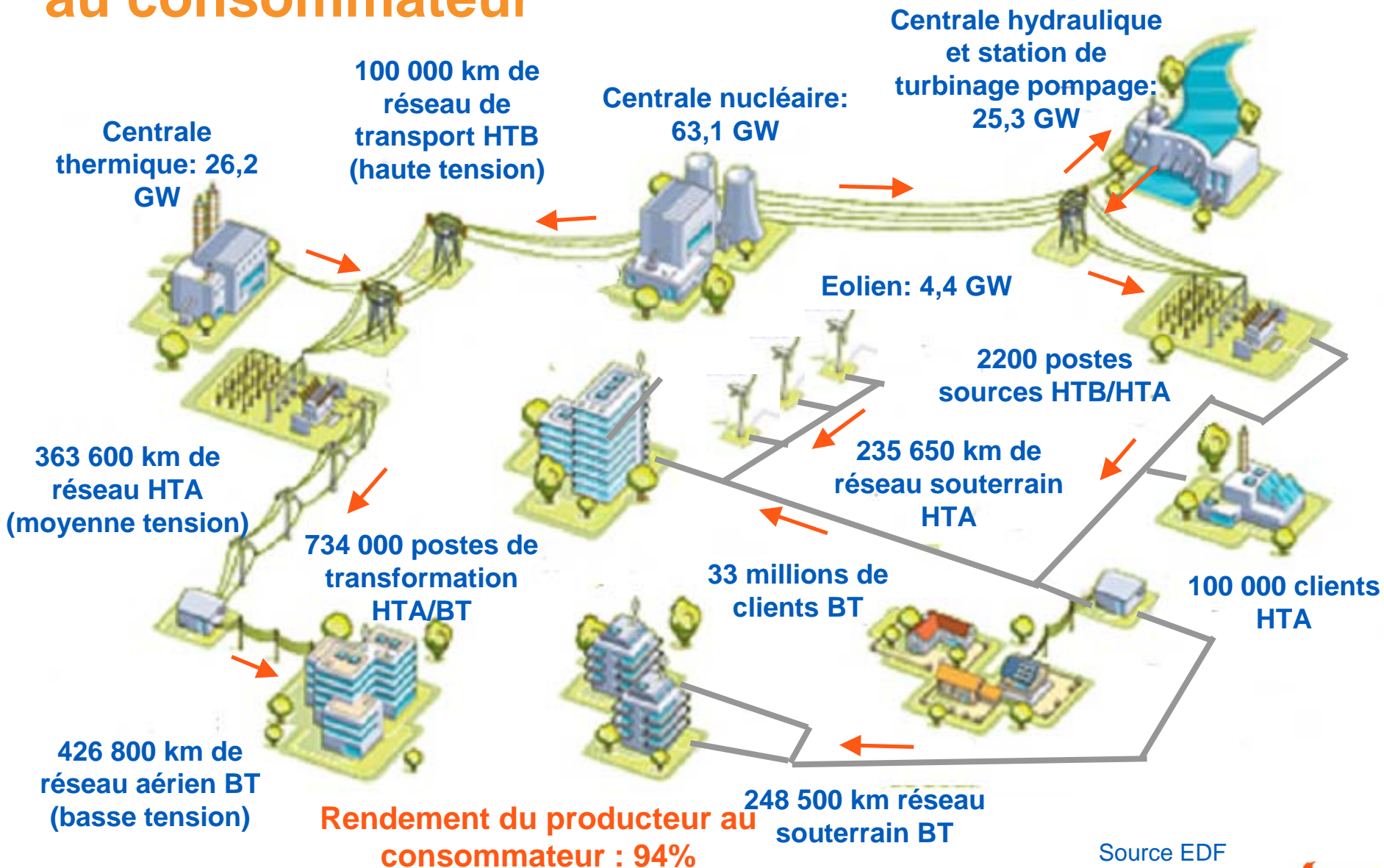
Facteurs de développement du stockage par batteries pour les réseaux électriques

Inventaires des technologies électrochimiques

Inventaire des applications du stockage d'énergie par batteries

Éléments économiques

Structure du système électrique. Du producteur au consommateur

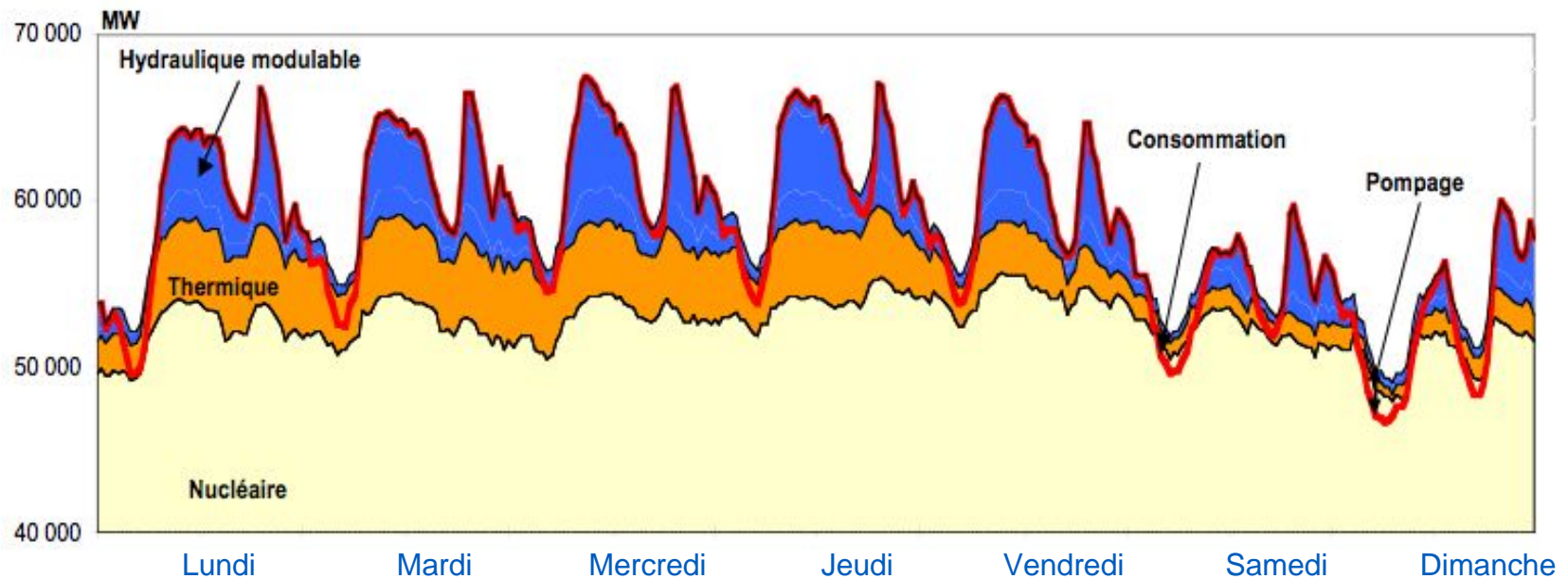


Source EDF

L'équation de l'équilibre offre demande

production centralisée \pm stockage centralisé =
consommation \pm échanges commerciaux transfrontaliers

– production décentralisée \pm gestion de la charge

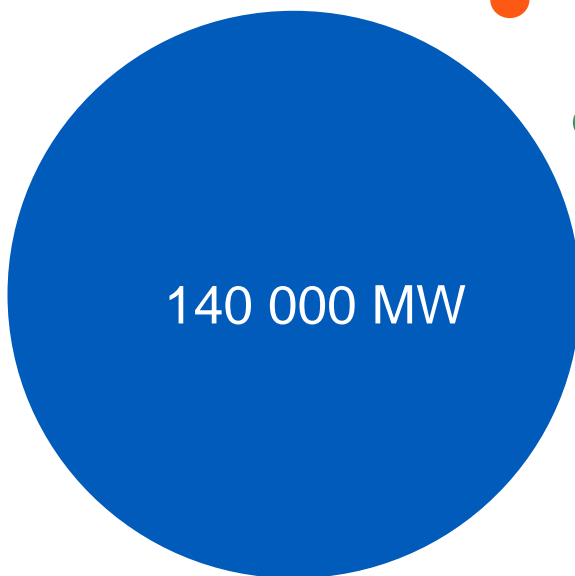


Structure de la courbe de charge en France pendant 1 semaine

Le stockage d'énergie sur les réseaux électriques dans le monde.



Station de transfert d'énergie par pompage de Grand-Maison 1680 MW



Salle des machines d'un barrage
Stéphane LASCAUD. EDF R&D

- Stockage d'air comprimé et turbine à gaz: 477 MW
- Batteries Sodium Soufre: 400 MW
- Batteries Plomb acide: 45 MW
- Batteries Nickel Cadmium: 40 MW
- Batteries Lithium ion: 45 MW
- Batteries redox flow 3 MW

Stockage centralisé = Station d'énergie par pompage (STEP). Environ 3 fois moins cher au MW installé qu'un système de stockage par batterie.

Source Fraunhofer Institute, EPRI, EDF R&D

Sommaire

Stockage d'énergie et réseaux électriques

Facteurs de développement du stockage par batteries pour les réseaux électriques

Inventaires des technologies électrochimiques

Inventaire des applications du stockage d'énergie par batteries

Éléments économiques

Un contexte qui évolue

Contexte énergétique et climatique

- ⇒ Tensions sur le prix des combustibles fossiles. Indépendance énergétique
- ⇒ Lutte contre l'effet de serre

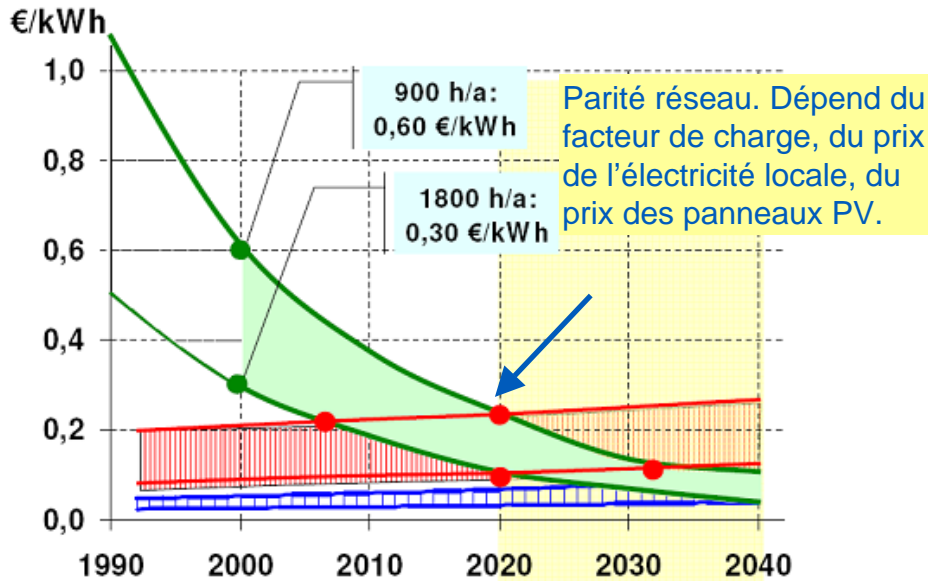
Politique européenne sur les énergies renouvelables

- ⇒ Porter à 20% en 2020 la part des EnR dans la production d'électricité.

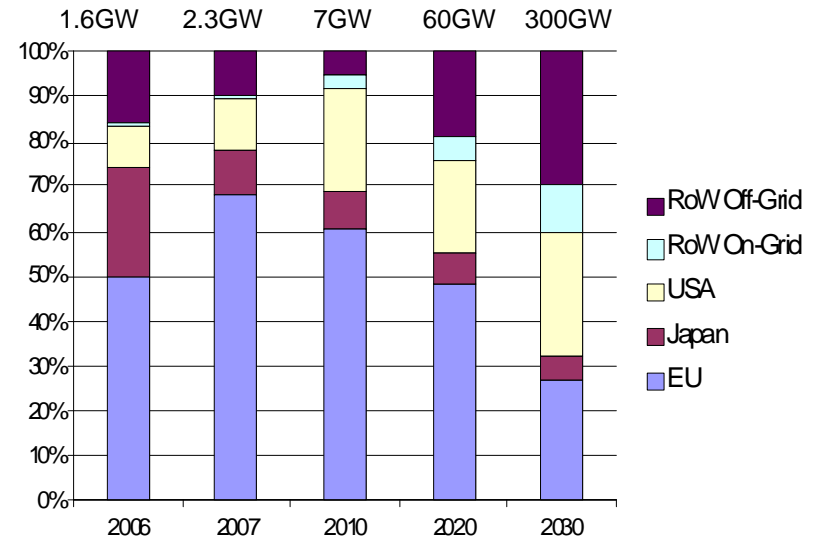
Propositions du Grenelle de l'Environnement,

- ⇒ Passer de 9 % à 20 % la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie en 2020 et viser, si possible, 25 %.
- ⇒ Faire des DOM une vitrine de l'excellence climatique, notamment en visant une part de 50 % d'énergies renouvelables en 2020
- ⇒ Arrêté du 24/12/2009 pour la constitution d'un GIP « GERRI » à la Réunion pour expérimenter des solutions d'économies d'énergie et de son stockage.
- ⇒ AMI Ademe du 30/11/2009 pour le développement de réseaux électriques intelligents
- ⇒ Appel d'offre du 16/04/2009 de la CRE pour 40 MW de fermes PV avec stockage dans les DOM et la Corse
- ⇒ Appel d'offre du 10/11/2010 de la CRE pour 220 MW de fermes éoliennes avec stockage dans les DOM et la Corse

Une croissance de l'énergie photovoltaïque dans le monde



Evolution du coût de l'électricité photovoltaïque. Source: RWE Energie, Schott Solar



Prospective des puissances annuelle photovoltaïque installée dans le monde, en GWc. Source: Epia

Mais dont l'intermittence pose des difficultés

Exemple d'intermittence photovoltaïque. 50% du temps dans les Antilles. Source: Université Antilles-Guyane. Système électrique Réunionnais

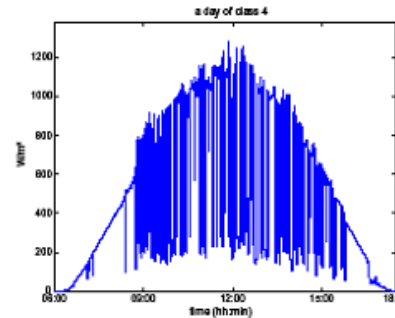


Fig. 9. A day of solar radiation in class 4.

Variabilité en puissance



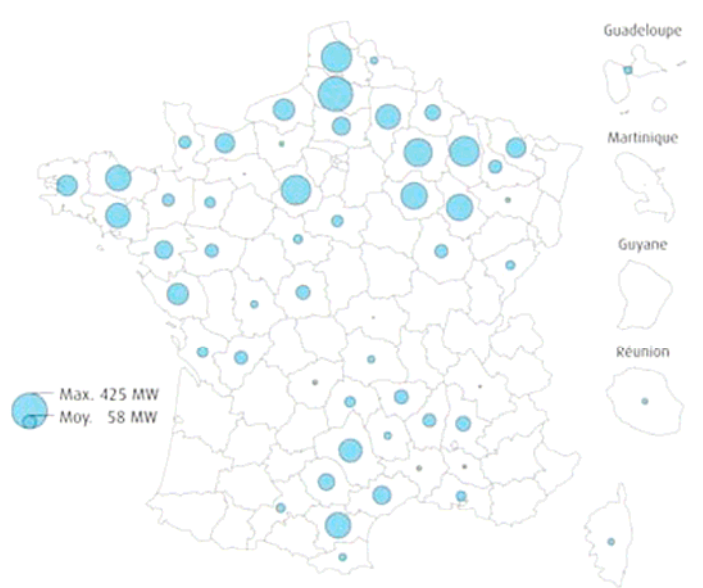
- P installée mesurée : 46 MW (75% P totale installée)

D'où une évolution de l'équation équilibre offre demande.

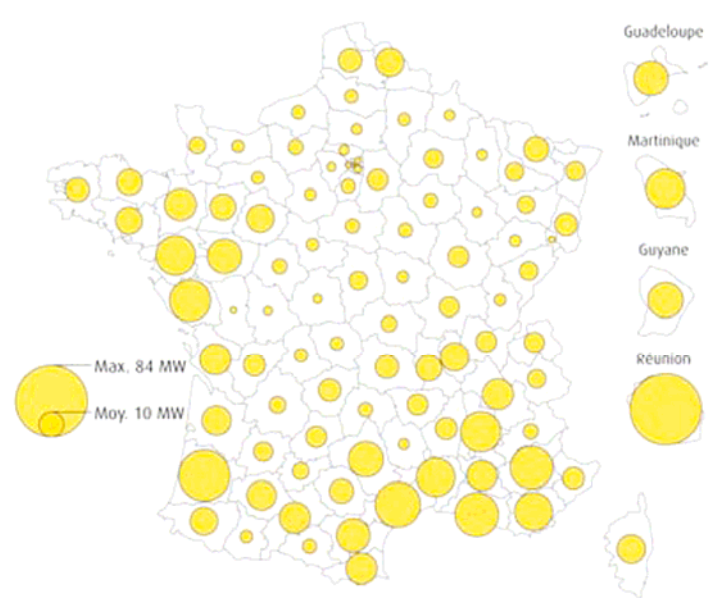
Production centralisée + EnR intermittentes centralisées ± stockage centralisé

= consommation ± échanges commerciaux transfrontaliers

– production décentralisée ± gestion de la charge - EnR intermittentes réparties
± stockage décentralisé

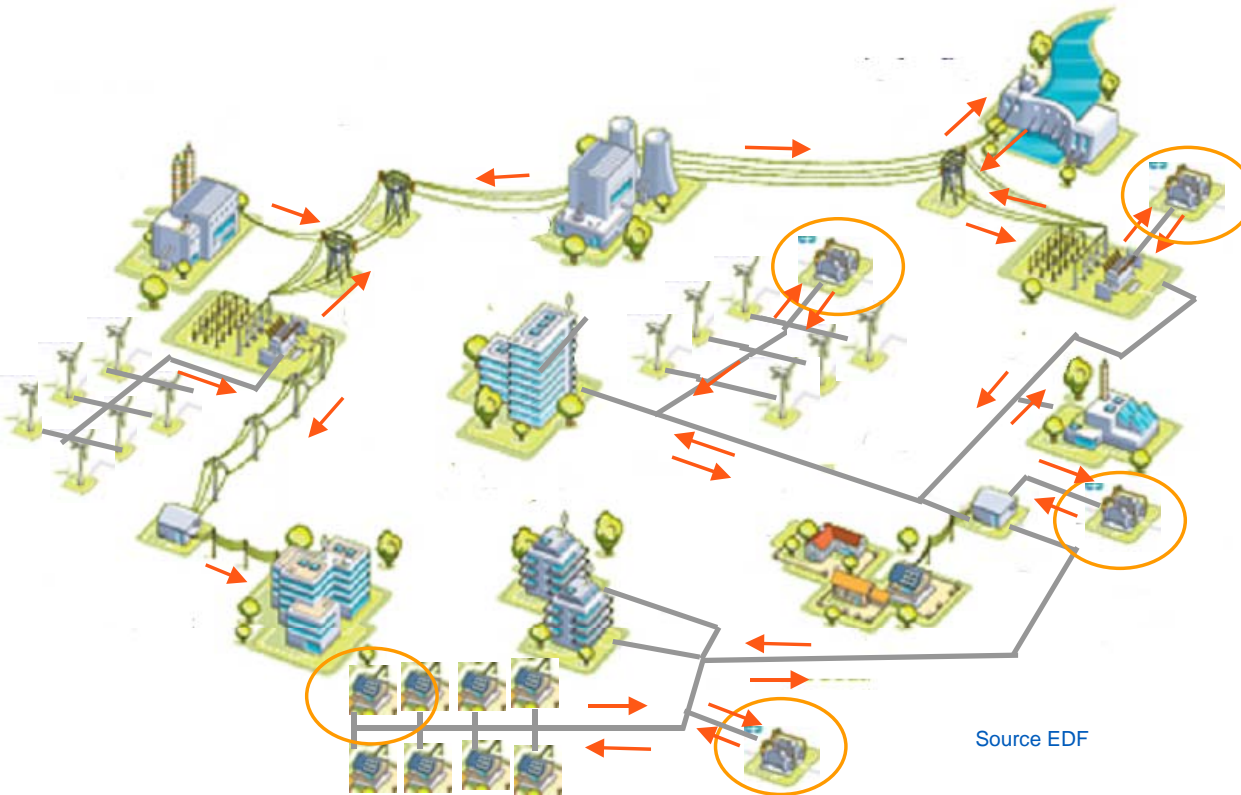


Eolien. Fin 2010: 5729 MW d'éolien raccordés. Source: ERDF, RTE



Photovoltaïque. Fin 2010: 1025 MW de photovoltaïque raccordés. Source: ERDF, RTE

Du réseau électrique de distribution au réseau de circulation avec stockage ?



Le stockage déplace la fourniture d'électricité dans le temps comme le réseau la déplace dans l'espace.

Le stockage permet de gérer l'intermittence des énergies renouvelables.

Le stockage peut apporter des services au système électrique.

Sommaire

Stockage d'énergie et réseaux électriques

Facteurs de développement du stockage par batteries pour les réseaux électriques

Inventaires des technologies électrochimiques

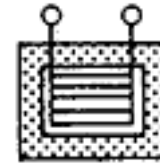
Inventaire des applications du stockage d'énergie par batteries

Éléments économiques

Les grandes filières technologiques

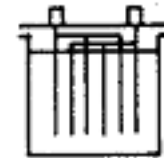
Conversion réversible énergie électrique \Leftrightarrow énergie chimique

- Les batteries
- Les batteries à circulation
- Les supercapacités



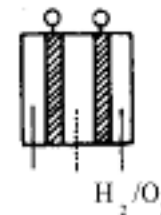
Conversion énergie électrique \Rightarrow énergie chimique

- Electrolyseur



Conversion énergie chimique \Rightarrow énergie électrique

- Pile à combustible



Principe d'une batterie

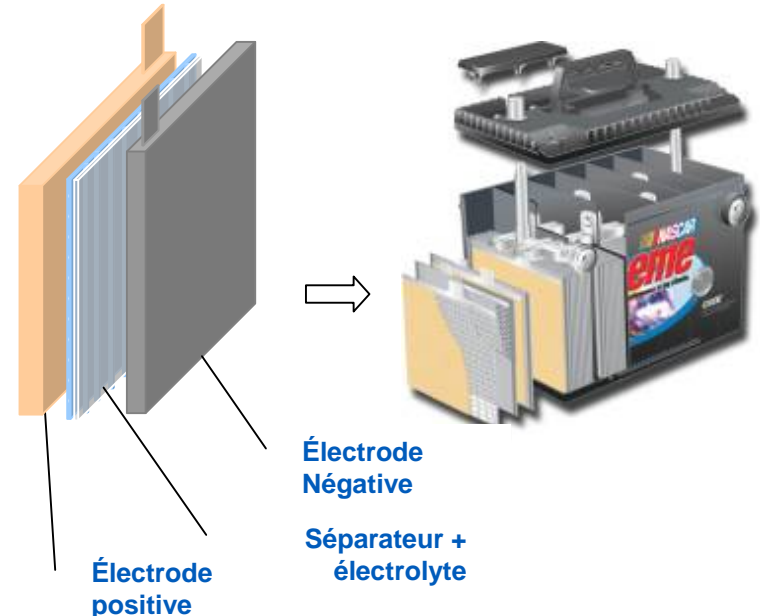
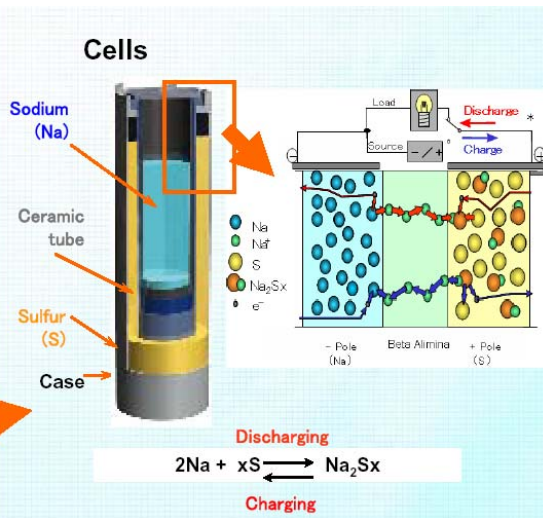
► Un accumulateur accumule de l'énergie sous forme chimique. Il est constitué de 4 composants

- Une source d'électrons qui est l'électrode négative
- Un puits d'électrons qui est l'électrode positive
- Un séparateur qui assure l'isolation électrique entre les deux électrodes mais permet le passage des ions entre les deux électrodes
- Un électrolyte qui assure la conductivité ionique entre les deux électrodes

1MW system (10mX3mX5mH)



Modules (50kW)



Batteries Plomb-acide

● Avantages

Maturité élevée

Adaptée à toutes les applications

Faible coût

Recyclable à 95%. Plomb 100%

Sure

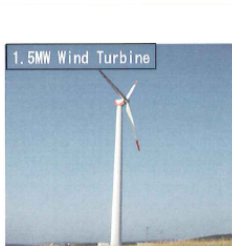
Rendement moyen à élevé

● Inconvénients

Durée sensible aux conditions de fonctionnement

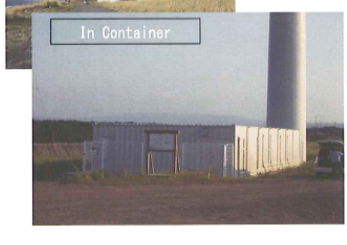
Mauvaise maîtrise de la prédiction de l'état de charge, de santé

Plomb classé comme substance CMR




1.5MW Wind Turbine

Nishime Demonstration (Akita, Japan)	
• Battery Type	: LL-1500 × 96 units 1500Ah/10HR-192V)
• Rated Capacity	: 288kWh
• Size (mm)	: 4,054 (W) × 600 (D) × 2 × 1,519 (h)
• Footprint	: 4.74m ²
• Weight	: 12,100kg

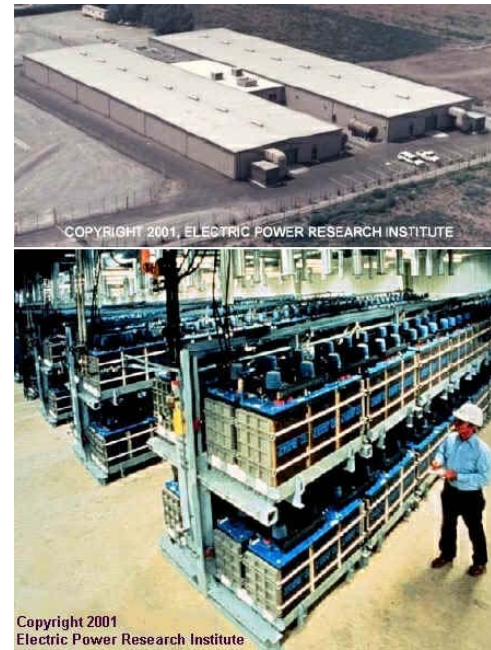


In Container



288kWh Batteries

Source Shin Kobe



Stockage par batterie plomb. 10 MW-40 MWh.
Source EPRI

Batteries Nickel-cadmium

- **Avantages**

- Longue durée de vie
- Robuste à des conditions d'exploitations difficiles
- Maturité industrielle
- Forte densité de puissance
- Pas de maintenance

- **Inconvénients**

- Coût

- Impact Environnemental du Cadmium

- « Effet Mémoire » du Ni/Cd

- Auto décharge



40 MW – 15 min. Battery NiCd

Source GVEA/SAFT

Batteries NaS

- **Avantages**

Longue durée de vie en cyclage

Faible Coût

Mature industriellement

Faible emprise au sol

Fort rendement énergétique

Estimation aisée du SOC

- **Inconvénients**

Consommation des auxiliaires

Classement ICPE en France

Pas de flexibilité du ratio
puissance/énergie



34MW NAS Battery



Source Japan Wind
Development

Batteries Lithium-ion

- **Avantages**

- Durée de vie élevée
- Forte flexibilité du ratio puissance énergie
- Rendement élevé
- Adaptées à toutes les applications



Stockage Li-ion nanophosphate

2MW – 500 kWh

Source A123

- **Inconvénients**

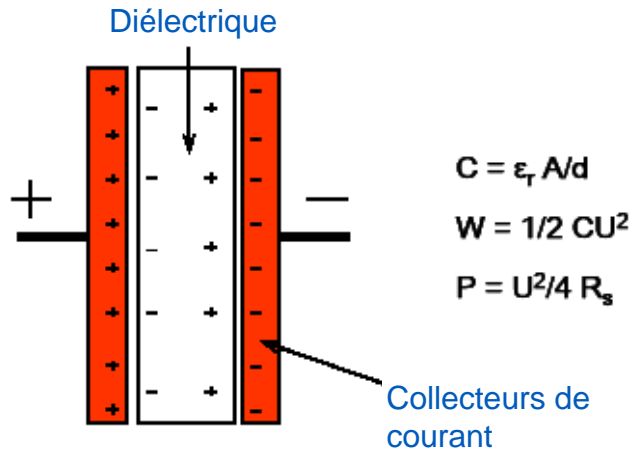
- Sécurité
- Coût mais fortement en baisse
- Nécessité de monitoring des cellules



Stockage Li-ion nanophosphate. 16 MW –4 MWh en poste source. Limitation d'appel de puissance sur ligne HTB. Source A123/AES

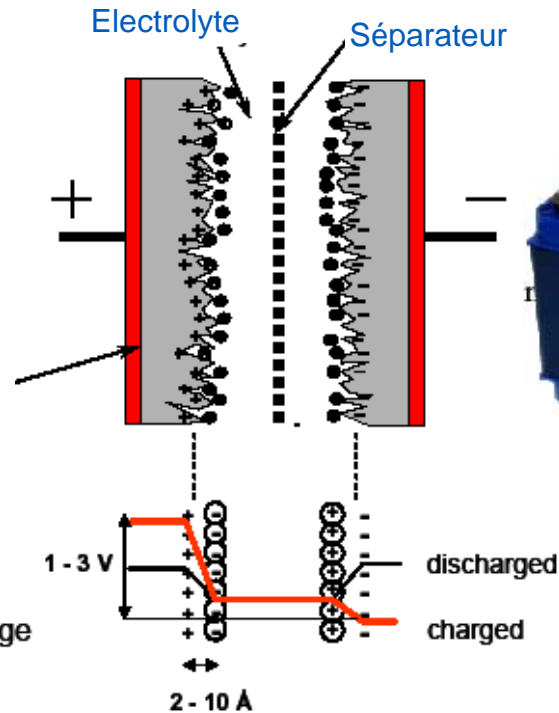
Supercapacité. Principe

Condensateur conventionnel



A	up to 1'000 m ² (porous film)
d	fix, ~10 Å
ϵ_r	fix, ~10
U	1 - 3 V, electrolyte decomposition voltage
R	low, electrolyte

Supercapacité



Accumulation de charges. Pas de réactions électrochimique.

Plusieurs centaine de Farads accessibles avec une supercapacité au lieu d'une fraction de Farad avec un condensateur conventionnel.

Supercapacité

- **Avantages**

Très forte puissance massique (>10kW/kg)

Très grande durée de vie (Million de cycles)

Pas de maintenance



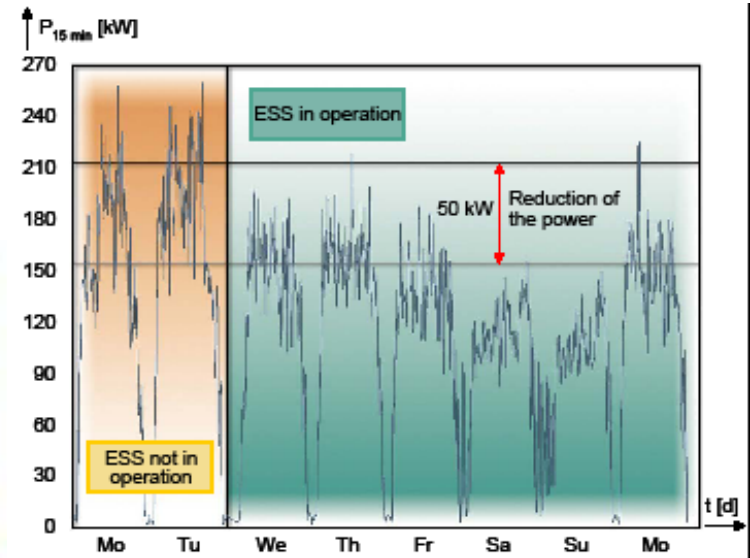
Stockage par supercapacité en poste. Limitation d'appels de puissance de Tramway et récupération de l'énergie du freinage.

- **Inconvénients**

Temps de décharge court (quelques secondes)

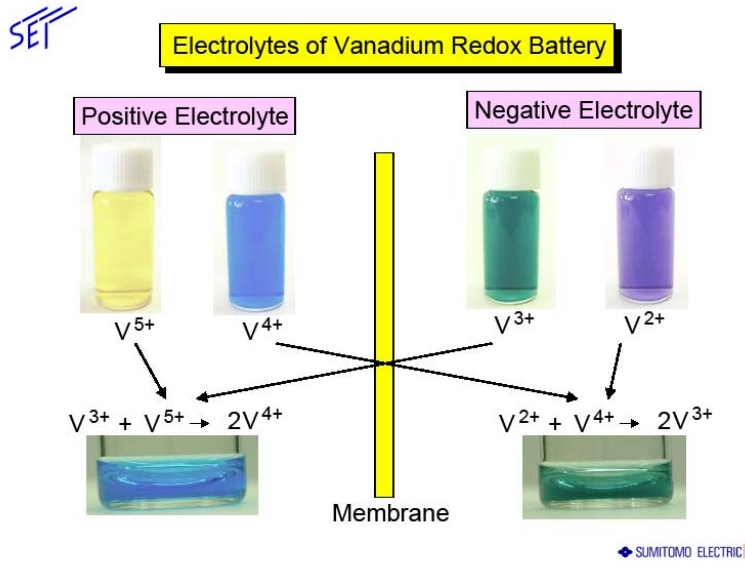
Coût important au kWh installé

Variation de tension linéaire avec la capacité échangée

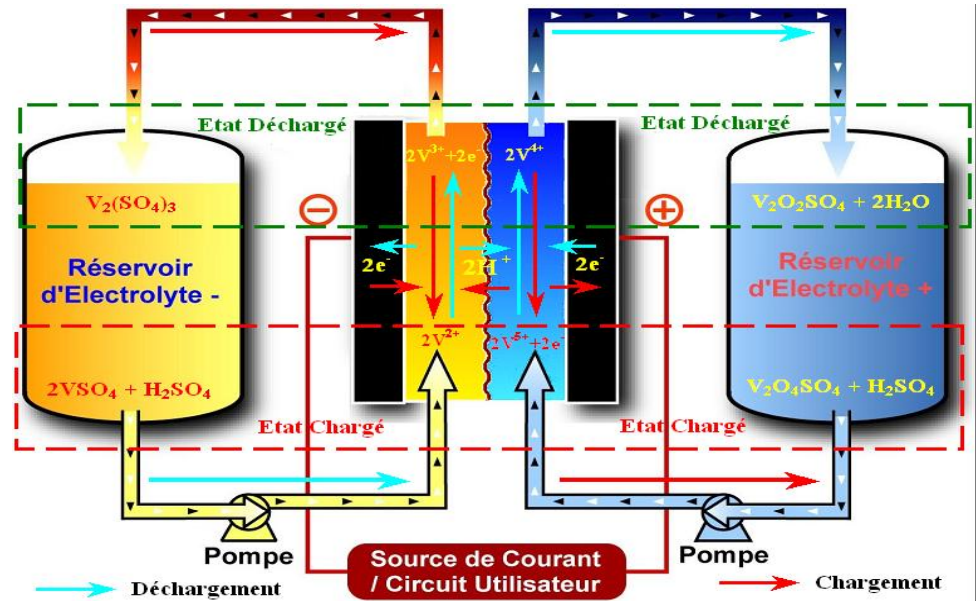


Source Maxwell

Batterie Redox flow. Principe



Source Sumitomo Electric



Batterie à circulation d'anolyte et de catholyte.

Batterie Redox flow

- **Avantages**

Longue durée de vie

Découplage puissance et énergie

Stockage saisonnier possible

- **Inconvénients**

Masse et encombrement important

Coût élevé

Fort taux d'auto-décharge en stand-by

Rendement



1.5MW-1Hrs/3.0MW-1.5sec VRB System



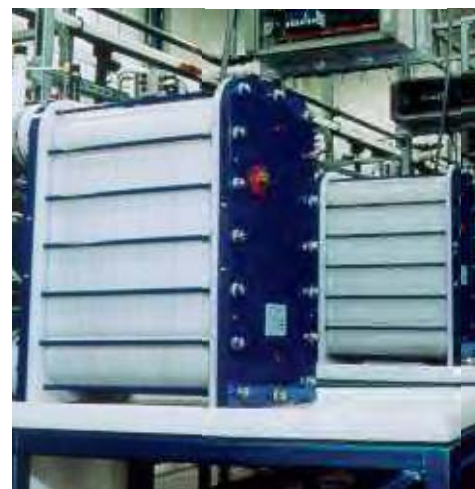
Battery boxes



Electrolyte Tanks

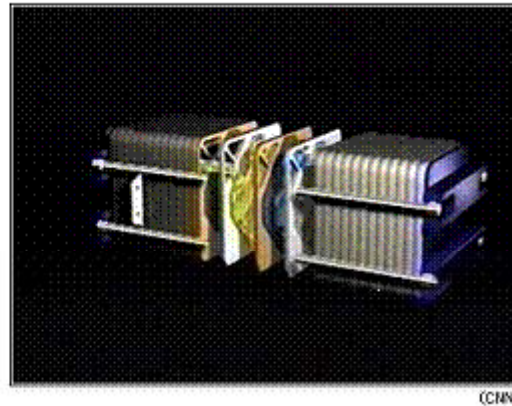
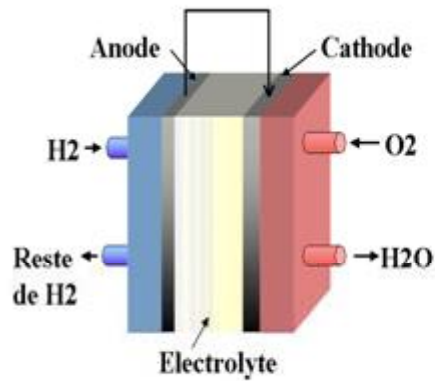
Stack 1MW. Source

Sumitomo 



Stack 5 kW. Source
Regenesys

Piles à combustible. Principe



H₂ provenant soit d'un stockage d'H₂, soit un réformage de gaz naturel

Rendement: 50 %



Piles à combustible

- **Avantages**

Rendement énergétique élevé

Puissance et énergie indépendantes

Procédé « propre » si H₂ issu de ENR



Pile à combustible (PEMFC) pour secours électrique.
250 kVA. Source Helion Areva PEM 250 kW

- **Inconvénients**

Coût très élevé

Faible durée de vie

Gestion de la chaleur

Reformage CH₄

Sécurité H₂

Type de pile	Electrolyte	T (°C)
Protonique (PEMFC)	Electrolyte polymère	80°C
Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique liquide	200°C
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondu liquide	650°C
Oxyde solide (SOFC)	Céramique solide	800°C

Electrolyse de l'eau

- **Avantage**

Rendement 80 %

- **Inconvénients**

Coût très élevé

Sécurité H2 et O2

Comportement à charge variable

Source d'énergie
intermittente en excès



Electrolyse de l'eau



Injection au réseau gazier en
faible proportion (Gaz Hytane)

Usage besoins de chaleur



Source Norsk Hydro

Sommaire

Stockage d'énergie et réseaux électriques

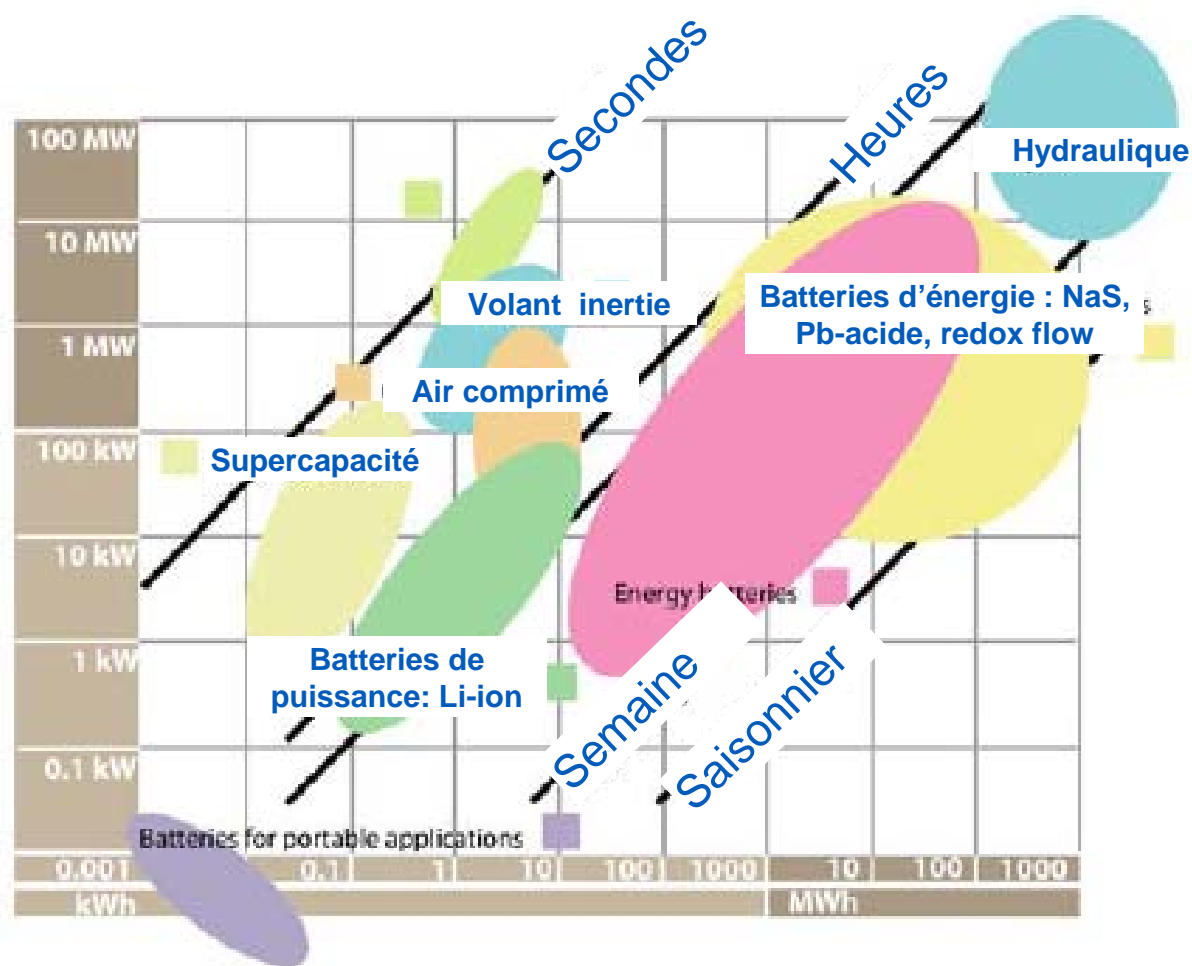
Facteurs de développement du stockage par batteries pour les réseaux électriques

Inventaires des technologies électrochimiques

Inventaire des applications du stockage d'énergie par batteries

Éléments économiques

Applications des stockages



Fonctions du stockage dans les réseaux électriques

•Pour les moyens de production:

- Report de production à la pointe
- Lissage de l'intermittence ENR

Durée de sollicitation

heures à semaine
minutes à heures

•Pour les réseaux de transport et distribution:

- Lissage de pointe au poste
- Réglage de tension

heures
minutes à heures

•Pour l'équilibre offre demande:

- Réglage de fréquence

secondes

•Pour les clients:

- Qualité de l'onde électrique
- Secours électrique

secondes

secondes à heures

Pour maximiser sa rentabilité, le stockage doit cumuler plusieurs fonctions.
Par ex: lissage PV en période diurne, report d'énergie nuit/jour et réglage de fréquence

Les critères de sélection d'un stockage

► Les critères de sélection en investissement :

- Coût d'investissement du stockage (€/MWh) et de l'électronique de puissance (€/MW)
- Durée de vie en cyclage et calendaire => durée d'immobilisation
- Rendement énergétique => impact sur la taille du stockage, gestion thermique de l'ouvrage
- Emprise au sol => besoin en foncier
- Sécurité, environnement, recyclage => impacts réglementaires et environnementaux, risques technologiques, restriction de localisation
- Contraintes de température, humidité, salinité => investissements complémentaires

► Les critères de sélection en exploitation

- Besoins en maintenance
- Rendement
- Consommation des auxiliaires et coût d'achat de l'énergie
- Limitation des conditions d'exploitation (contrôle de charge, acceptation de charges aléatoires, température variables, coupure de charge...) => impact sur la technologie et la taille du stockage

Application report de production à la pointe

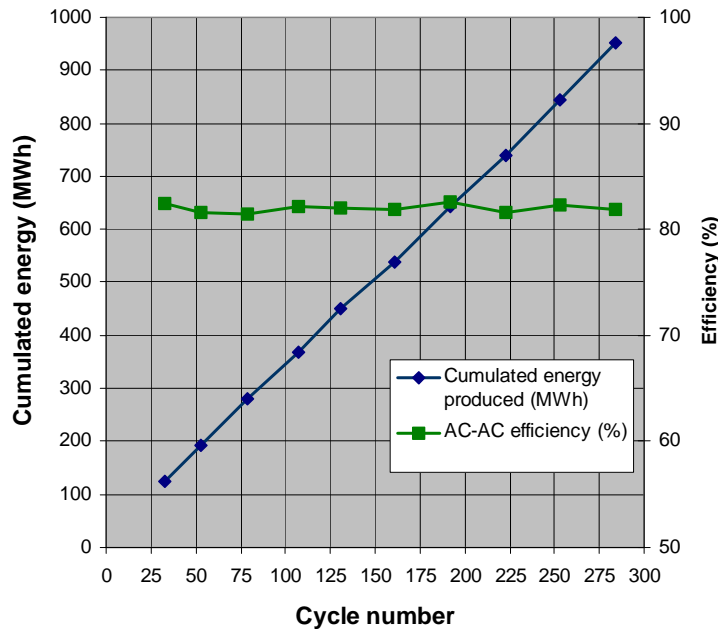
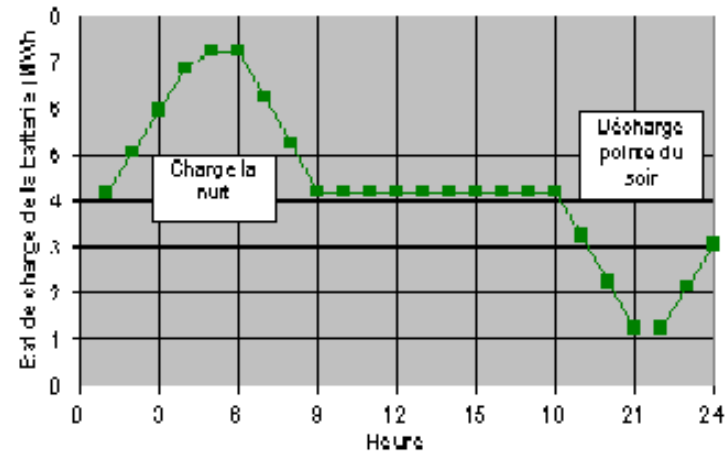
Transfert d'énergie quotidien.
Charge de la batterie Sodium Soufre (NaS) la nuit lorsque le coût marginal de l'électricité est bas.
Décharge en période de pointe.
Plus de 100 MW au Japon.



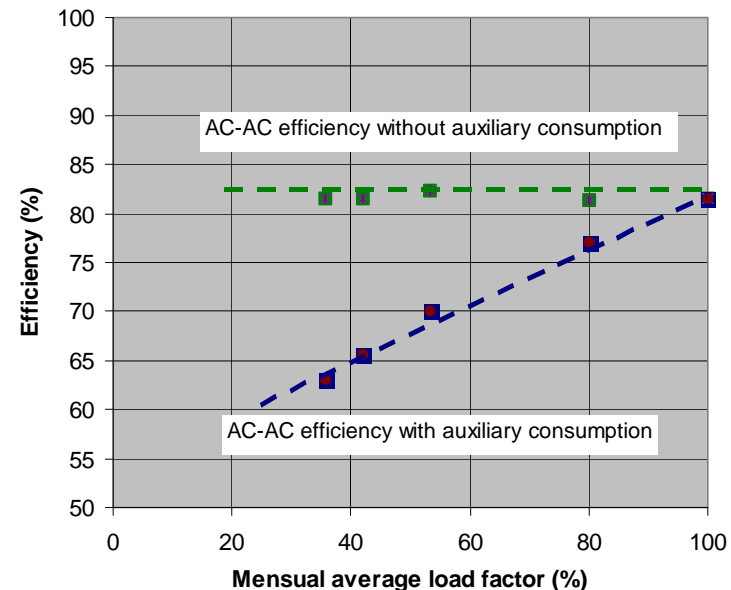
Batterie NaS 1MW – 7,2 MWh. Poste source 63kV/15kV de Saint André. Source EDF SEI La Réunion.

Application report de production à la pointe

- Utilisation quotidienne. Charge de la batterie la nuit et production à la pointe du soir.

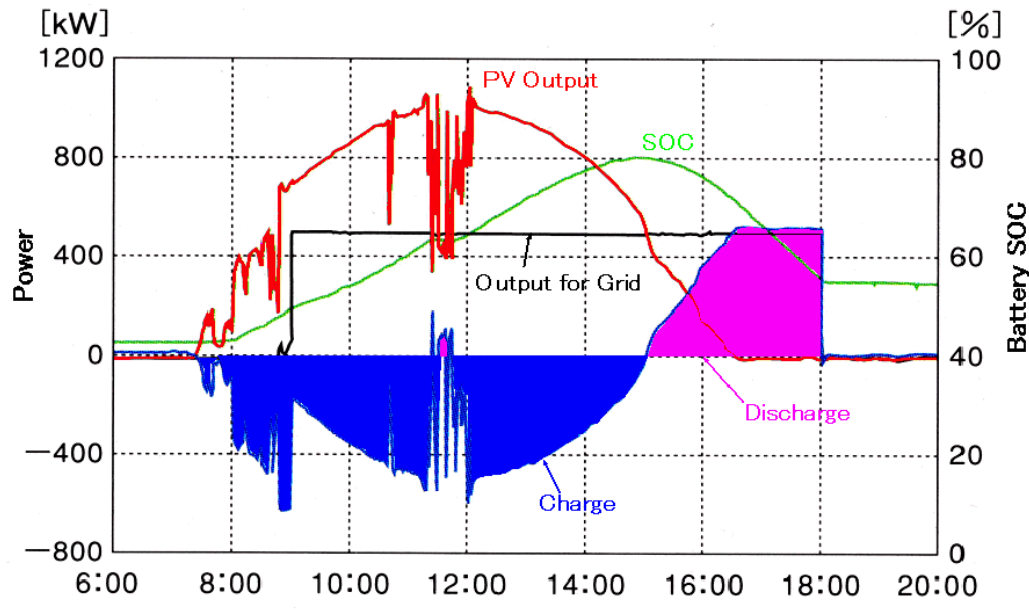


NaS battery efficiency versus load factor



Lissage de l'intermittence photovoltaïque

- Gestion de la puissance intermittente injectée sur le réseau. Suivant la taille du stockage, lissage de la puissance photovoltaïque jusqu'à maîtrise du gabarit de production.



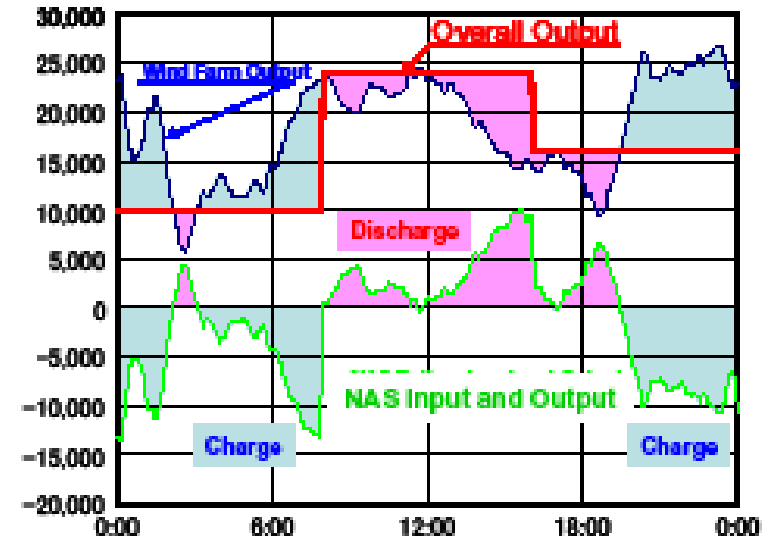
Profil de production d'une ferme photovoltaïque avec stockage



Batterie NaS 1MW et ferme PV de 5MW. Source NEDO, Hokaido Electric

Transfert d'énergie éolienne

• **Transfert d'énergie éolienne.** Prédiction de la production éolienne. Annonce d'un plan de production éolien et stockage à J+1. Gestion des aléas par le stockage. **Vente sur les marchés au prix le plus élevé.**



Ferme éolienne de 51 MW avec stockage par batterie NaS.

Batterie sodium soufre 34 MW.

Source: Japan Wind Development

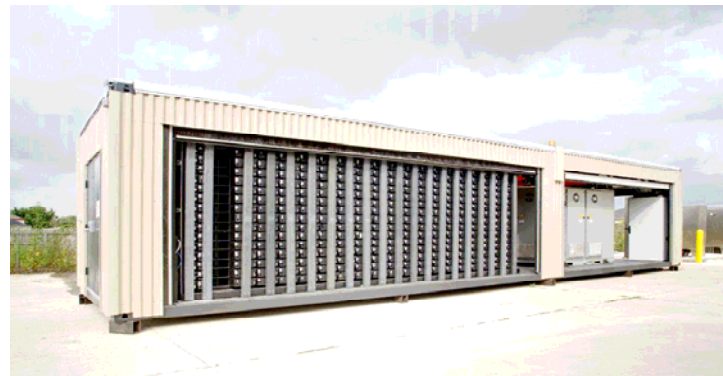
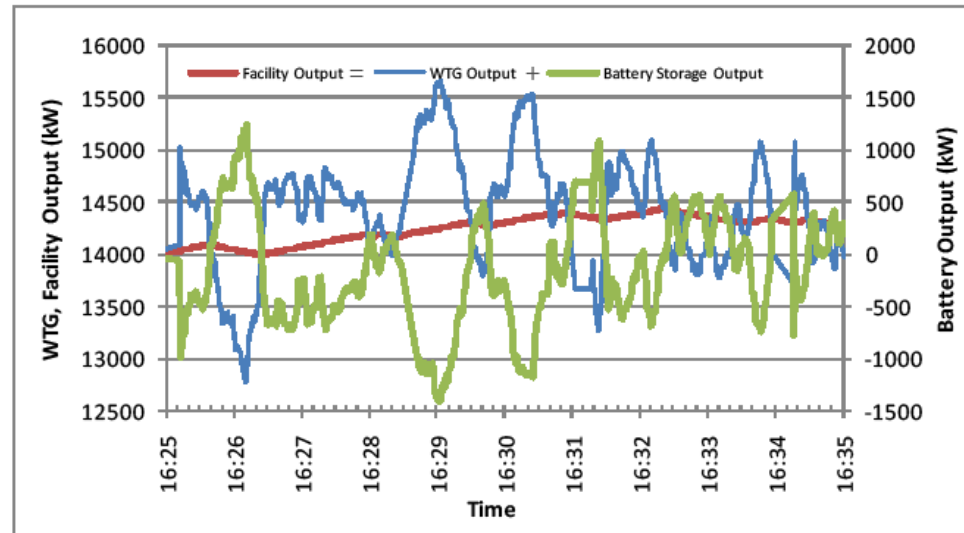
Lissage d'énergie éolienne

- Limitation des rampes de puissance à +/- 100 kW/min de la production éolienne en cas de vitesse de vent moyenne.



Raccordement du stockage à une éolienne. Hawaï Maui

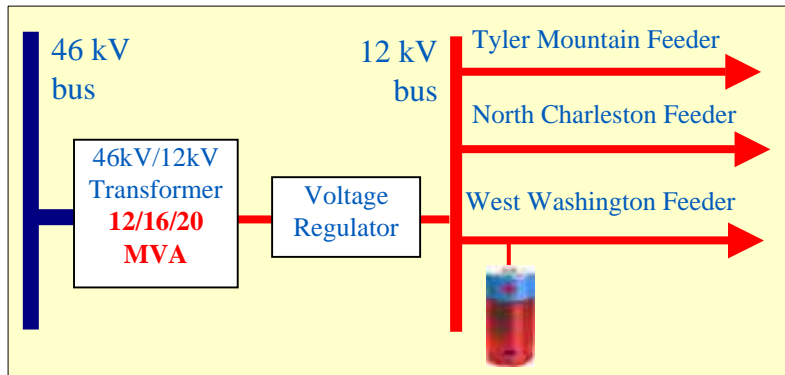
Output Smoothing Using Battery Storage



firstwind.

Système de stockage par batterie Plomb étanche et électronique de puissance: Source: Xtrem power 1,5 MW- 1 MWh.

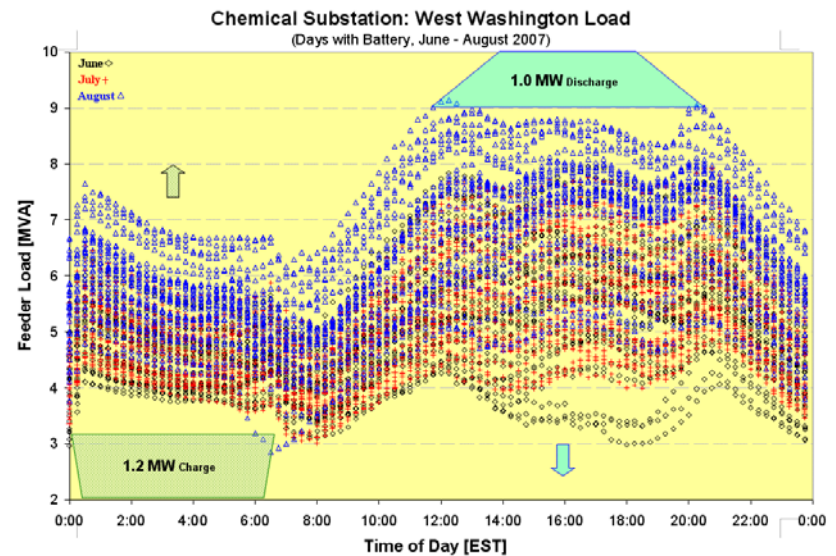
Report d'investissement réseau



Report d'investissement de 3 ans d'un nouveau poste source.

Accroissement du taux d'utilisation de la ligne de 75% à 80%

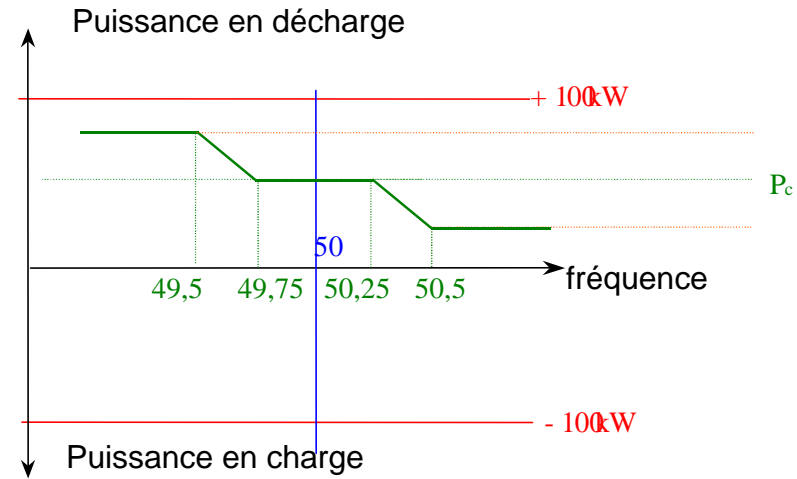
Réduction de la température du transformateur. Ralentissement du vieillissement



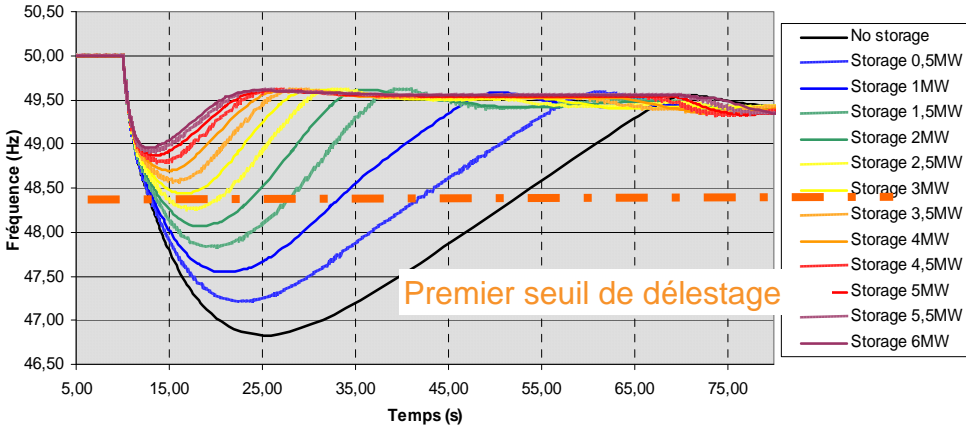
Source: AEP

Réglage de fréquence

• Réglage de fréquence et réserve primaire. Accroissement de l'inertie du système électrique et réduction du gradient de fréquence en cas d'incident. Permet de palier la diminution d'énergie réglante lorsque de la production avec des machines tournantes est substituée par de l'énergie photovoltaïque (sans inertie).



Impact of ultracapacitor-based DESS on the frequency response of an isolated power system after a major generation loss



Simulation dynamique d'un stockage par super-capacité sur la réponse en fréquence après une perte majeure d'un groupe de production. Source EDF R&D, Ecole centrale de Lille

Stéphane LASCAUD. EDF R&D

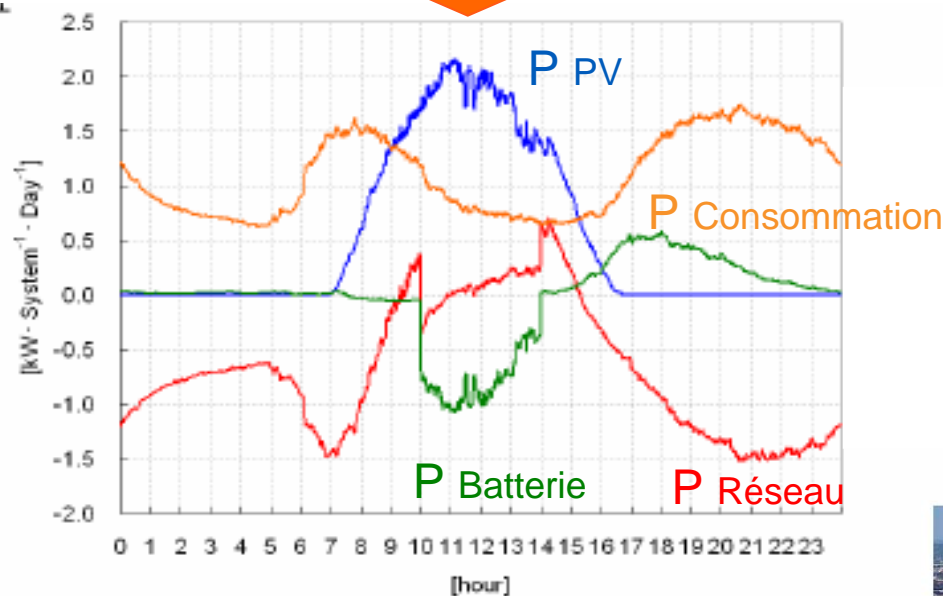


Stockage Li-ion nanophosphate. 20 MW –5 MWh sur un site de production thermique.

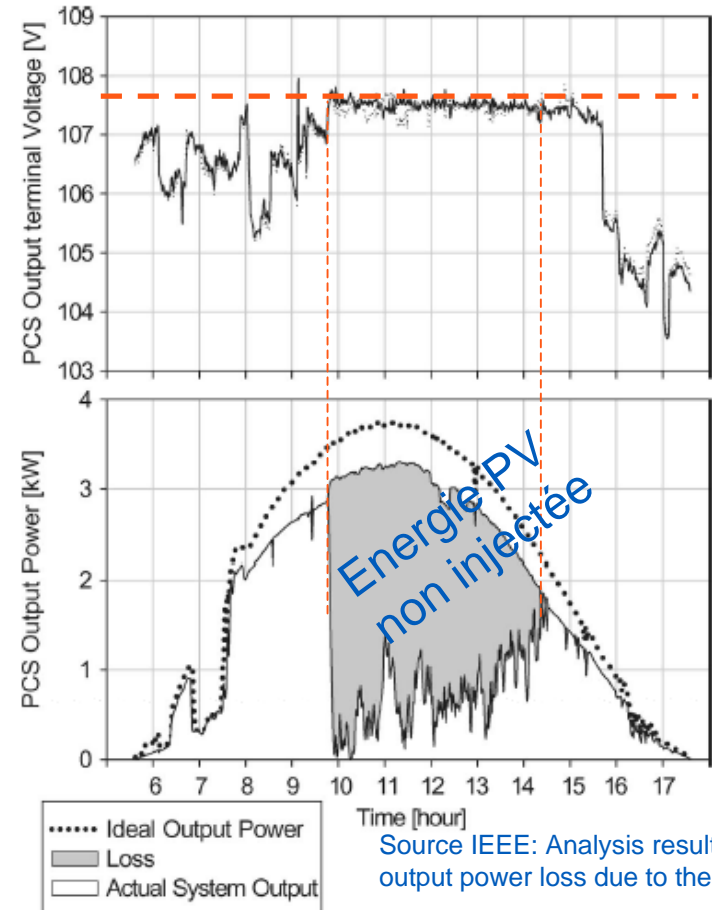
Réserve primaire 15 minutes. Source A123/AES

Réglage de tension sur les réseaux BT

• Limitation des pertes de production photovoltaïque par congestion sur le réseau basse tension lorsque trop de producteurs injectent (cas d'un quartier solaire comme Otha city au Japon). Stockage par batterie au plomb. Système domestique 9kWh.



$$P_{\text{Consommation}} - P_{\text{PV}} + P_{\text{Batterie}} = P_{\text{Réseau}}$$



Source IEEE: Analysis results of output power loss due to the grid voltage rise in grid-connected photovoltaic power generation systems. Yuzuru Ueda et al.



Source: Ohta City Land Development Corporation

Transfert d'énergie photovoltaïque

• **Transfert d'énergie: flux unidirectionnel PV vers le réseau ou via le stockage.** Transfert d'énergie de la production photovoltaïque aux heures de forte consommation (commande du dispatching). Pas de charge depuis le réseau.

Rendement total batterie lithium-ion + convertisseur > 90%



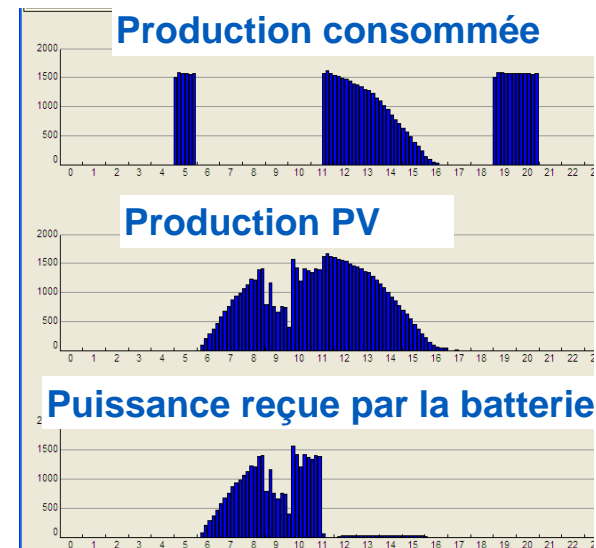
Système de stockage 3 kW – 10 kWh connecté réseau. Ile de la Guadeloupe



Coffret électrique: chargeur, onduleur, automate, GSM



Modules de batteries lithium-ion: 240 V- 40 Ah



Source: Tenesol, Saft

Sommaire

Stockage d'énergie et réseaux électriques

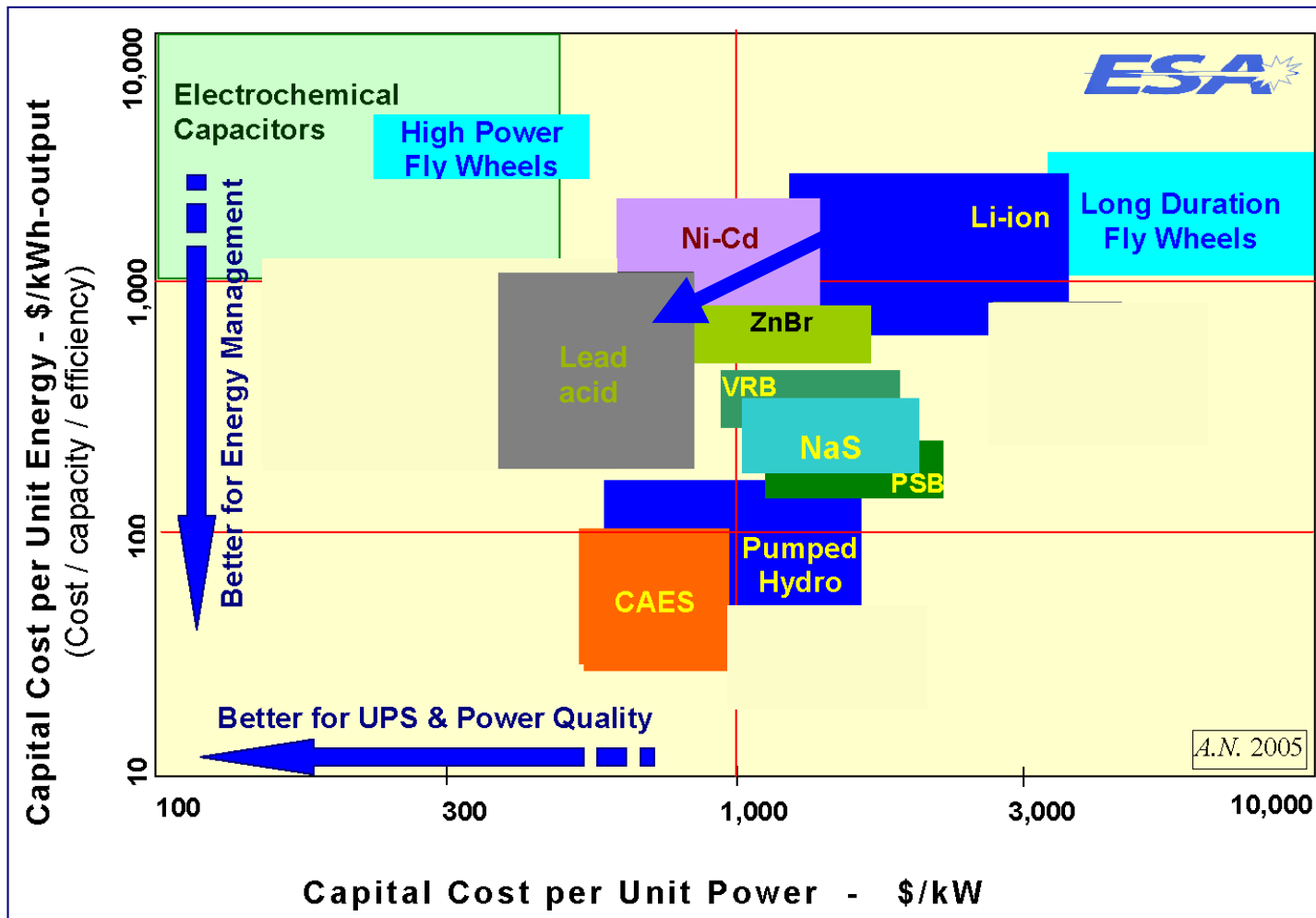
Facteurs de développement du stockage par batteries pour les réseaux électriques

Inventaires des technologies électrochimiques

Inventaire des applications du stockage d'énergie par batteries

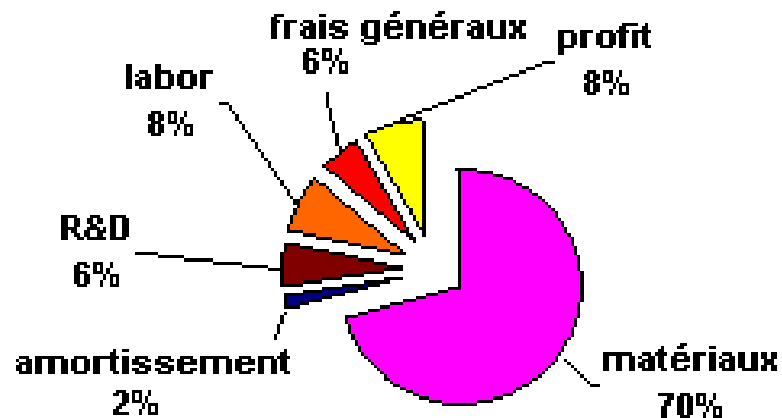
Éléments économiques

Comparaison des coûts de stockage



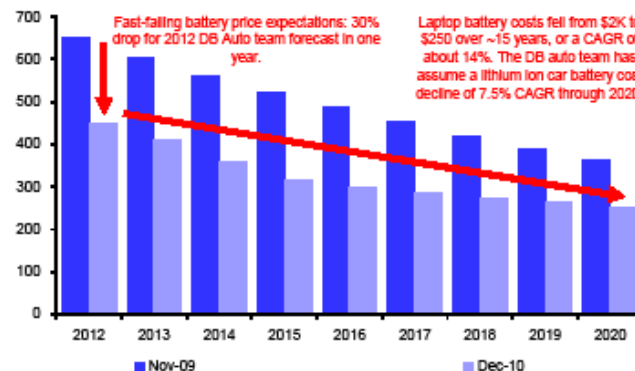
Source: Electric Storage Association

Potentiel de baisse des coûts des batteries Li-ion



Structure de coût d'une batterie Li-ion

Figure 23: DB Auto team lithium-ion battery price forecast (\$ per kWh)



Source: DB Auto team, industry discussions and private interviews, Deutsche Bank

Source: Deutsche Bank

- Les matériaux comptent pour 50 à 75 % du coût des cellules unitaires Li-ion
- Batteries pour le portable: vers 250 €/kWh mais durée de vie courte (moins de 200-250 cycles, ~ 2ans).
- Pour les batteries « système », entre 700 et 1200 €/kWh en pack. Durée de vie 1500 à 2000 cycles.

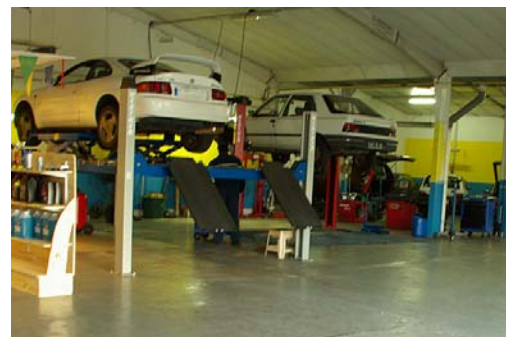
Facteur de baisse des coûts: la deuxième vie des batteries après le véhicule électrique



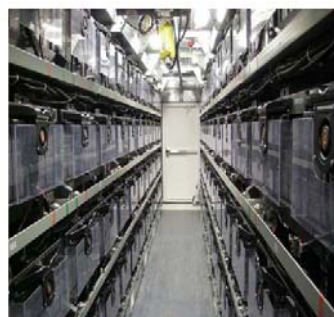
Fabrication batterie



Utilisation des batteries en VE jusqu'à 80% de leur capacité



Démontage et re conditionnement des batteries



Utilisation batteries stationnaires:

Caractéristiques techniques ?

Valeur de reprise ?

Durée de vie résiduelle (jusqu'à 50% de leur capacité) ?



Recyclage des matériaux de batterie.

Merci de votre attention



CHANGER L'ÉNERGIE ENSEMBLE