



Atelier Stockage d'énergie pour le vecteur électricité

Jérôme PERRIN (Renault, Direction Recherche, Etudes Avancées & Matériaux)
Fermin CUEVAS (ICMPE-CNRS Thiais)
Bernard MULTON (SATIE-CNRS, ENS Cachan)

Membres du groupe de travail de l'atelier	Autres personnes consultées
Jérôme PERRIN (Renault), animateur Secrétaires : Bernard MULTON (ENS Cachan SATIE-CNRS), Fermin CUEVAS (ICMPE-CNRS) Membres CNRS Laurence CROGUENNEC (ICMCB ENSCPB) Salvatore MIRAGLIA (Institut Néel CNRS), Patricia de RANGO (Institut Néel CNRS) Annick PERCHERON (ICMPE-CNRS) Yvan FAURE MILLER (CNRS) Membres Industrie Philippe STEVENS (EDF R&D) Stéphane BISCAGLIA (ADEME) Françoise BARBIER (Air Liquide) Florence MATTERA (CEA, LITEN) Anne de GUIBERT (SAFT) Sophie de RICHECOUR (TOTAL) Valérie SAUVANT (IFP Energies Nouvelles) Jean-Paul REICH (GDF Suez)	<u>Systèmes physiques :</u> Olivier TELLER (Alstom), Guy BESLIN (GDF Suez) Sylvain LEMEFOUET (EPFL, Enairys Powertech) Jacques RUER (SAIME) Pascal TIXADOR (CNRS Grenoble G2ELab) Xavier PY (CNRS-PROMES) Jean-Jacques HEROU (EDF) Jean-Paul YONNET (CNRS Grenoble G2ELab) <u>Hydrogène :</u> Claude LAMY (Équipe électrocatalyse, GDR CNRS PACS) Christophe BOYER (IFP Energies nouvelles) Daniel FRUCHART (CNRS Institut Néel, McPhy Energy) <u>Systèmes électrochimiques et supercondensateurs</u> Jean-Louis LISKA (JC-SAFT) Didier MARGINEDES (Batscap) Jean-Marie TARASCON (LRCS, Univ. Picardie, CNRS) Réseau européen ALISTORE Réseau National de Recherche et de Technologie sur le Stockage Electrochimique de l'Energie (RS2E)



1- Introduction

L'électricité :

- une forme d'énergie toujours en expansion
(doublement de la part finale entre 1973 et 2008)
- encore produite à plus de 80% à partir de ressources non renouvelables
- représente 40% de la consommation d'énergie primaire d'origine fossile pour une contribution de 17% à l'énergie finale mondiale

Mais :

- des qualités indéniables pour le développement durable
(facilités de conversion en toutes formes et favorise l'exploitation des immenses ressources renouvelables intermittentes)
- un stockage dont les performances physiques et économiques limitent encore ses possibilités :
 - dans les **transports**
(hydrocarbures liquides = 10 000 Wh/kg, meilleur accumulateur : 200 Wh/kg)
 - dans les **applications stationnaires**

Le stockage (« réversible ») : talon d'Achille de l'électricité



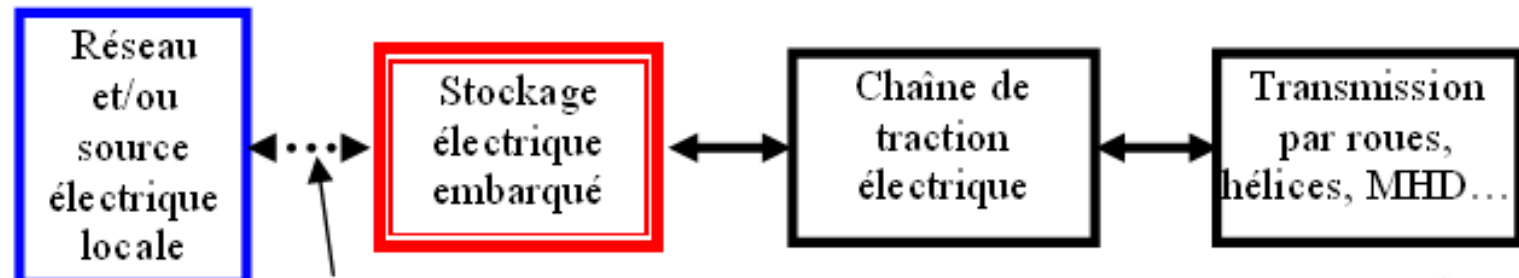
1- Introduction

Diversités des problématiques scientifiques et technologiques du stockage :

- un large spectre disciplinaire
(chimie-physique, sciences pour l'ingénieur, économie, géographie, politique...)
- du matériau au système électrique en passant par la gestion d'énergie

Principales contributions du stockage au vecteur électricité :

1- Transports : système de propulsion « tout électrique »



Possibilité d'échanges bidirectionnels lors de la connexion à la source



Source: Renault

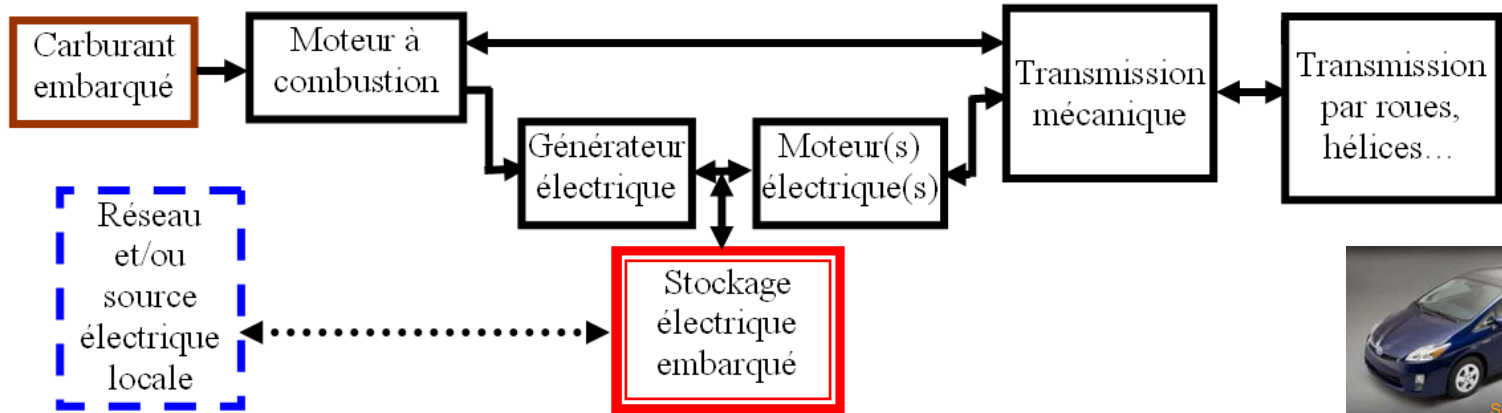


Atelier Stockage d'énergie pour le vecteur électricité

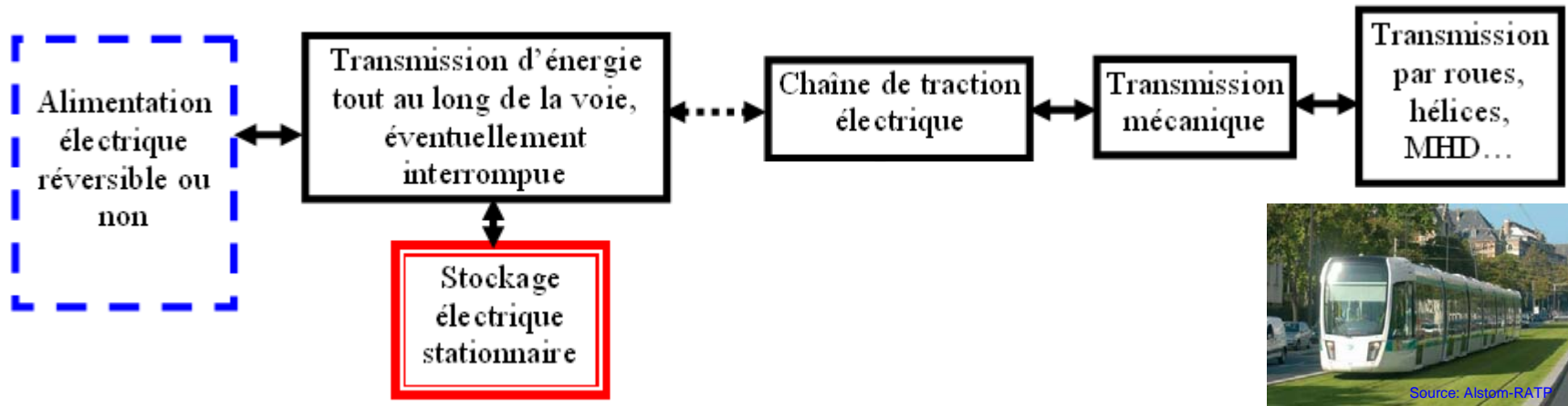
1- Introduction

Les principales contributions (suite) :

2- Transports : système de propulsion hybride, éventuellement rechargeable



3- Transports guidés, alimentation par la voie, éventuellement interrompue

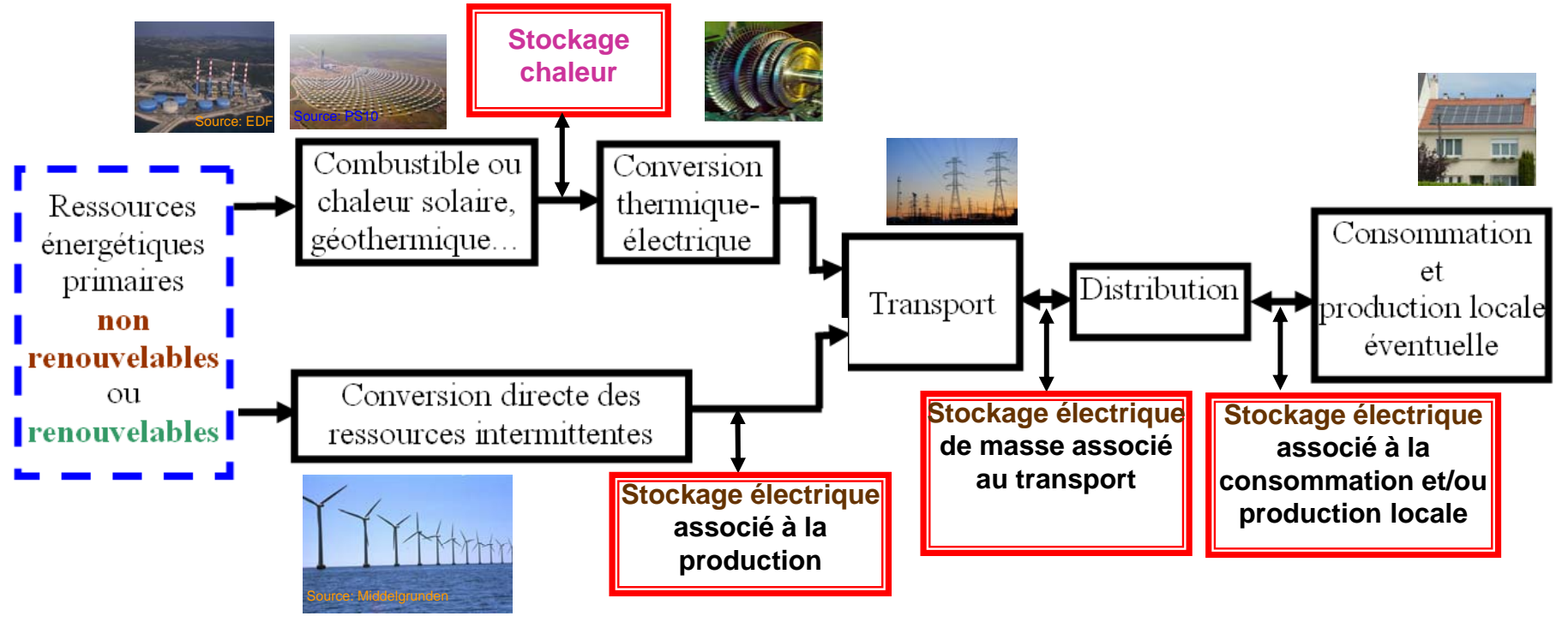




1- Introduction

Les principales contributions (suite) :

4- Système de production – transport – distribution d'énergie électrique



Améliorations nécessaires :

- performances purement techniques (masse, rendement, durée de vie...)
- gains économiques et environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie
- matériaux disponibles et/ou recyclables
- risques et impacts environnementaux acceptables à l'usage



2- Systèmes « physiques » de stockage

Exploitation des procédés « physiques » de stockage d'énergie :

- Mécanique gravitaire (eau):

$$W_G = M.g.h$$

Le stockage de masse le plus utilisé au monde, en fort développement, solutions souterraines, bord de mer...

- Gaz (air) comprimé :

$$W_{\text{comp}} \cong \Delta P.V$$

- ◆ Hydropneumatique Utilisation d'un fluide pour compresser le gaz dans des accumulateurs hydropneumatiques, en développement.
- ◆ Pneumatique en caverne: Hybridation stockage de masse / production par TAC à gaz (2 usines en service : Allemagne et USA)
- ◆ Pneumatique en caverne avec récupération de chaleur
Amélioration du bilan par récupération/stockage de chaleur : en développement, Projet ADELE (RWE) 1 000 MWh - 200 MW (2013)



2- Systèmes « physiques » de stockage

- Stockage thermodynamique de chaleur

$$W = c.M$$

Stockage de masse, chaleur dans des réfractaires,
Turbomachines (pompes à chaleur haute température (800°C), en développement (projet THESE).

- Électromagnétique avec supraconducteurs

$$W_L = \frac{1}{2} L.I^2$$

Usages impulsions (s, min)

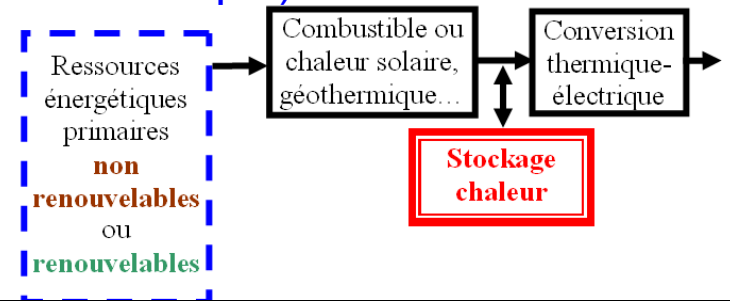
- Volants d'inertie

$$W_c = \frac{1}{2} J.\Omega^2$$

Grande tenue en cyclage, temps courts (minutes -> heures)

- Stockage réversible de chaleur (sans conversion électrique) :

Pour des usages chaleur en amont
de la production d'électricité

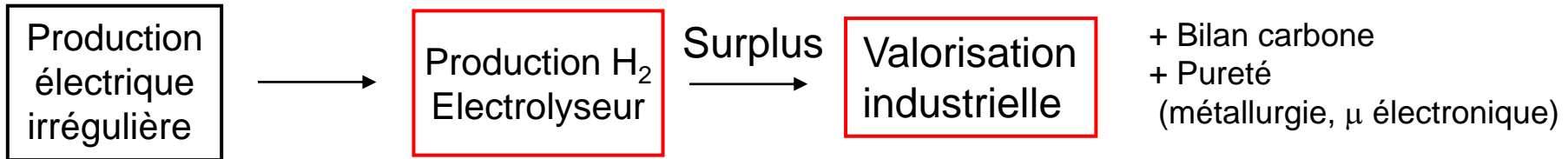


PR Stockage chaleur d'été => volets génériques : dimensionnement ⇔ gestion d'énergie



3- L'hydrogène comme moyen de stockage du vecteur électricité

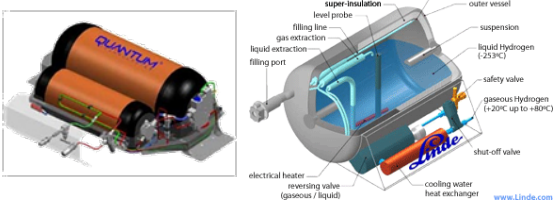
L'hydrogène peut jouer un rôle majeur dans le stockage tampon de l'électricité (versatilité conversion $H_2 \leftrightarrow e^-$) et/ou pour valoriser le surplus de production électrique



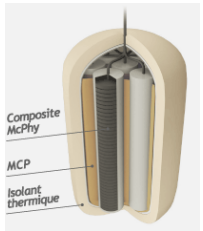
Point clef: rendement

- Augmentation T,P
- Catalyseurs d'électrode
- Conductivité ionique

Gaz (200 bar) Liquide (20 K)



Fluctuation



Solide (P, T ~ normales)

PR. NoMaStock





3- L'hydrogène comme moyen de stockage

An exemple: Le projet éolien-*hydrogène* d'*Utsira*

INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY 35 (2010) 1841-1852

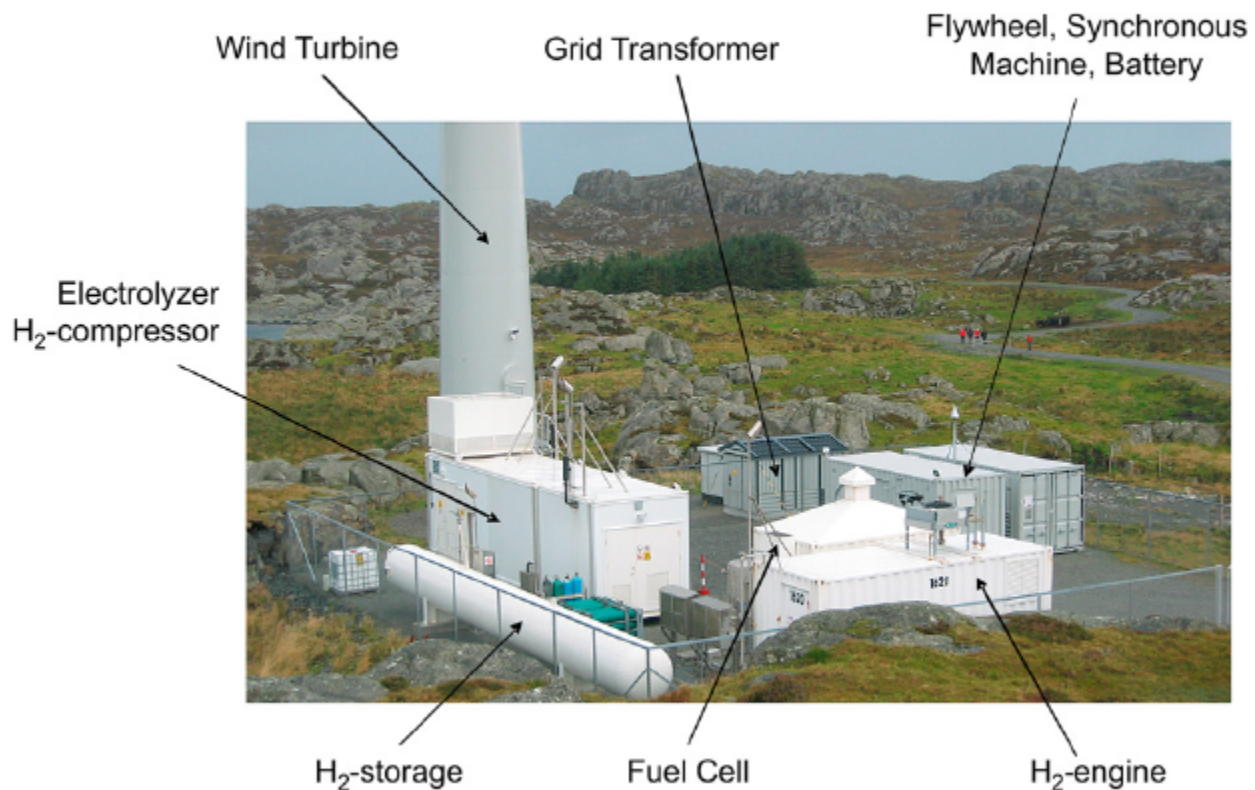
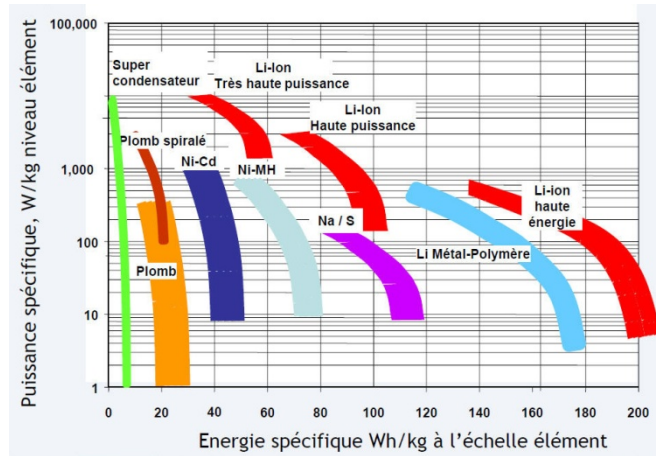


Fig. 1 - Photo of the Utsira wind/hydrogen demonstration plant (Ulleberg, 2005).



4- Les systèmes électrochimiques et les supercondensateurs



Supercondensateurs

pour le stockage instantané de puissance
Électrolytique à double couche (EDLC)

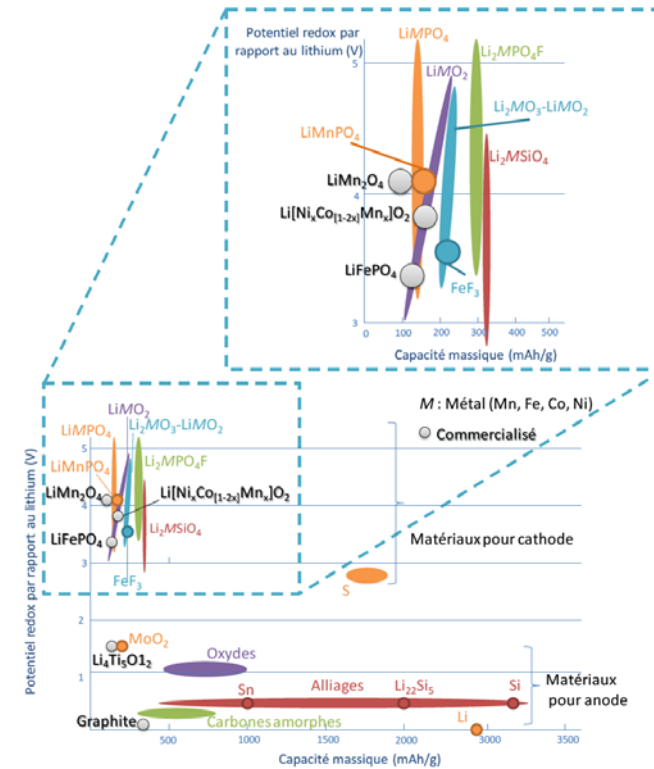
Matériaux: charbon actif

Electrolytes: organiques ou aqueux

Céramiques multicouches à haute permittivité
 matériaux ferroélectriques tels que BaTiO_3
 permittivités diélectriques gigantesques : $10^5 - 10^6$

Utilisation de poudres nanométriques
 Procédé de frittage en couches minces

Accumulateurs électrochimiques



Matériaux: capacité-durée de vie
 Electrolytes: stabilité/sécurité

PE PON

PE SELENSOL



4- Les systèmes électrochimiques et les supercondensateurs

◆ Technologies « post-lithium-ion »

Zinc – air, Lithium-air

Lithium - Soufre

- + Energie spécifique >> 200 Wh/kg
- Réversibilité au cyclage

- Maîtrise des réactions entre l'air et les composés constitutifs des électrodes, formation d'hydroxydes et de dendrites
- Piégeage des polysulfures (Li_2S_x , $x=1..8$) solubles dans les électrolytes organiques par des nano-composites C-S

Batteries de haute capacité

◆ Sodium-soufre

Haute température (350°C) : cathode solide, anode Na liquide, électrolyte céramique

- + haute densité d'énergie et bonne efficacité de charge/décharge (~ 90%)
- + long cycle de vie, matériaux bon marché
- polysulfures de sodium très corrosifs. Un seul fabricant NGK (Japon)

◆ A circulation d'électrolyte (redox-flow)

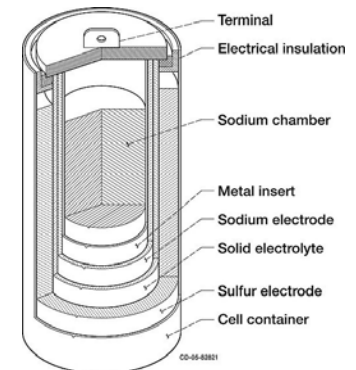
Deux demi-cellules contenant chacune un électrolyte.

Electrolytes en circulation . Paroi semi-perméable: passage d'ions.

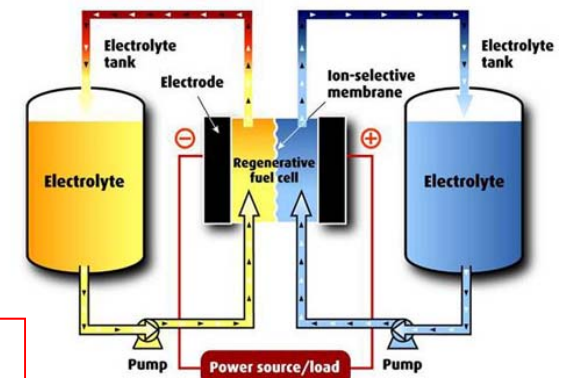
Ex : système Vanadium – Vanadium obtenu par dissolution de V_2O_5 dans l'acide sulfurique H_2SO_4

→ cathode : ions VO_2^+ et VO^{2+} ; anode : ions V^{3+} , V^{2+}

Adapté au stockage stationnaire à grande échelle



Sodium sulfur battery schematic



Miniaturisation pour application au stockage électrique embarqué ?



5- Conclusions

Stockage = système comprenant généralement plusieurs étages de conversion dont un convertisseur électronique de puissance au rôle essentiel

Grande variété des besoins en : Capacité énergétique, puissance,
 Sévérité du cyclage

...

Nécessité de : Baisser les **coûts**
 Réduire les **pertes énergétiques**
 Accroître la **durée de vie** (vieillessement calendaire et en cyclage)
 Améliorer les performances **environnementales**

Pour, in fine, une meilleure **optimisation système et intégration économique** :

- Importance de considérer l'ensemble du cycle de vie des systèmes auxquels le stockage apporte une contribution
- Matériaux performants, disponibles, peu impactants...
- Meilleure connaissance des lois de vieillissement à l'échelle du composant
- Optimisations de dimensionnement et de la gestion d'énergie...



5- Conclusions

Dans le cadre du PIE,
comment faire de l'interdisciplinarité du matériau au système ?

Un bon exemple : PE SELENSOL
INC + INSIS

Comment exploiter les forces vives du CNRS pour résoudre
les défis du stockage d'énergie
pour l'accompagnement du vecteur électricité ?

Une suggestion : se donner des défis
mais lesquels, avec les moyens du PIE ?

- Poser le problème d'une comparaison crédible
stockage hydrogène vs stockage électrochimique
en situation stationnaire ??
- Recherche de nouveaux matériaux et concepts ??

Pour poser les bases de programmes plus ambitieux...