



# 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**



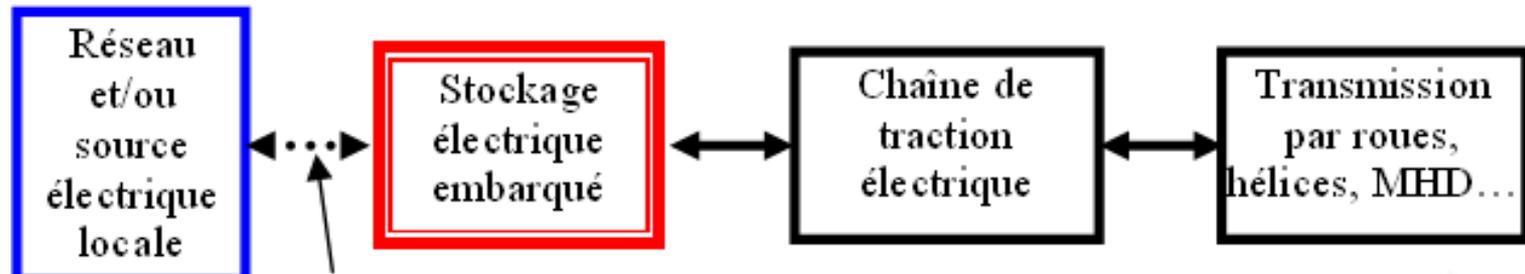
## 1- Introduction

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

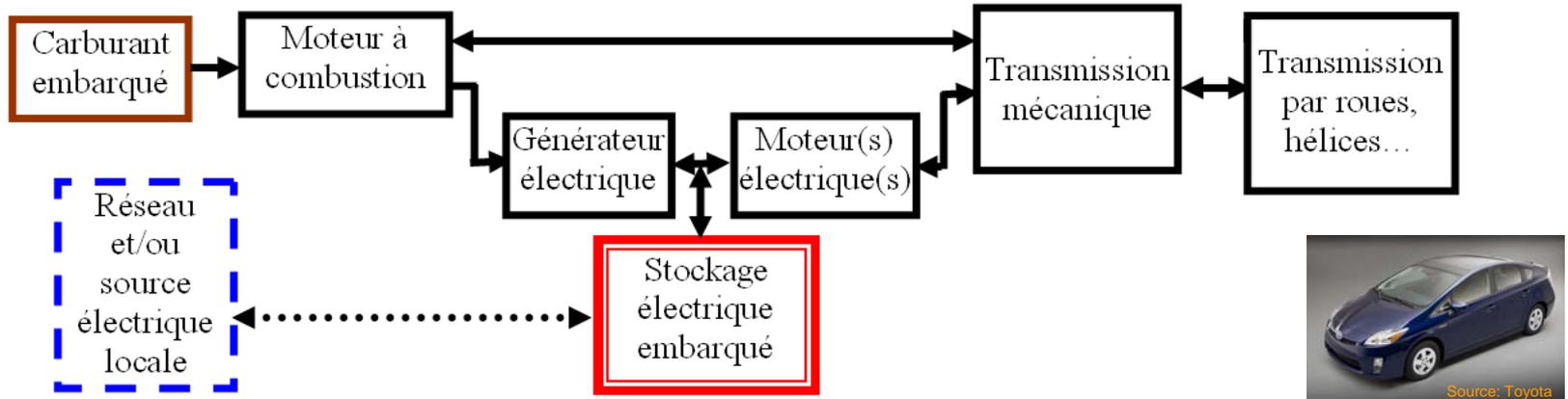


# Atelier Stockage d'énergie pour le vecteur électricité

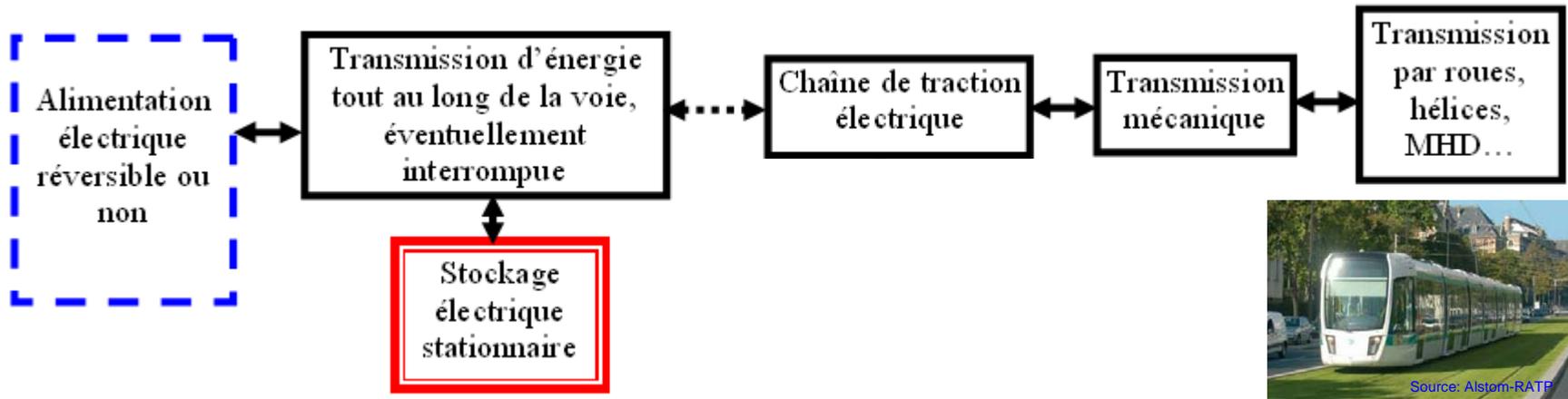
## 1- Introduction

Les principales contributions (suite) :

### 2- Transports : système de propulsion hybride, éventuellement rechargeable



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



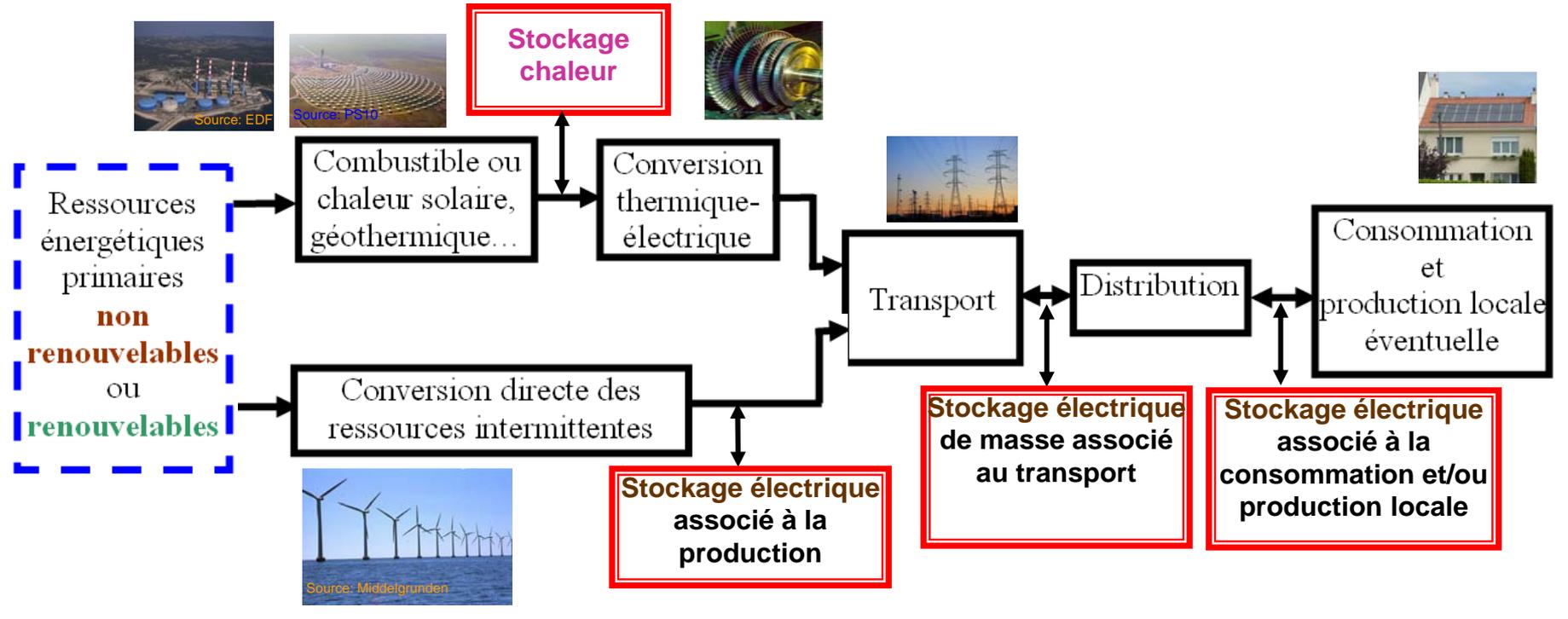


# Atelier Stockage d'énergie pour le vecteur électricité

## 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)



# Atelier Stockage d'énergie pour le vecteur électricité

## 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)

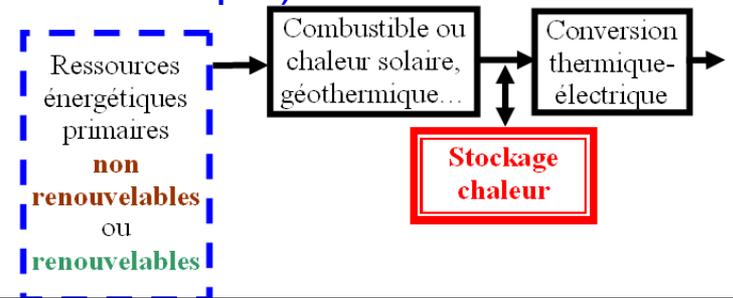
### - Volants d'inertie

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

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

Production électrique irrégulière



Source: Middelgrunden

Production  $H_2$   
Electrolyseur

Surplus

Valorisation industrielle

+ Bilan carbone  
+ Pureté  
(métallurgie,  $\mu$  électronique)

Point clef: rendement  
- Augmentation T,P  
- Catalyseurs d'électrode  
- Conductivité ionique

Fluctuation

Stockage  $H_2$

Générateur  $e^-$   
PAC

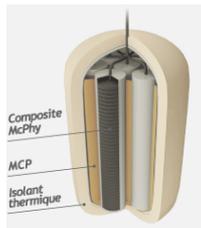
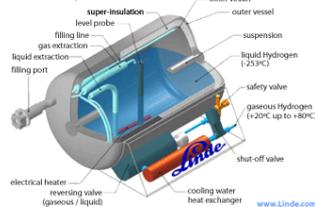
Lissage/gain  
d'électricité

PR. NoMaStock

Solide (P, T ~ normales)

Gaz (200 bar) Liquide (20 K)

LH2 - Tank System





## 3- L'hydrogène comme moyen de stockage

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

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

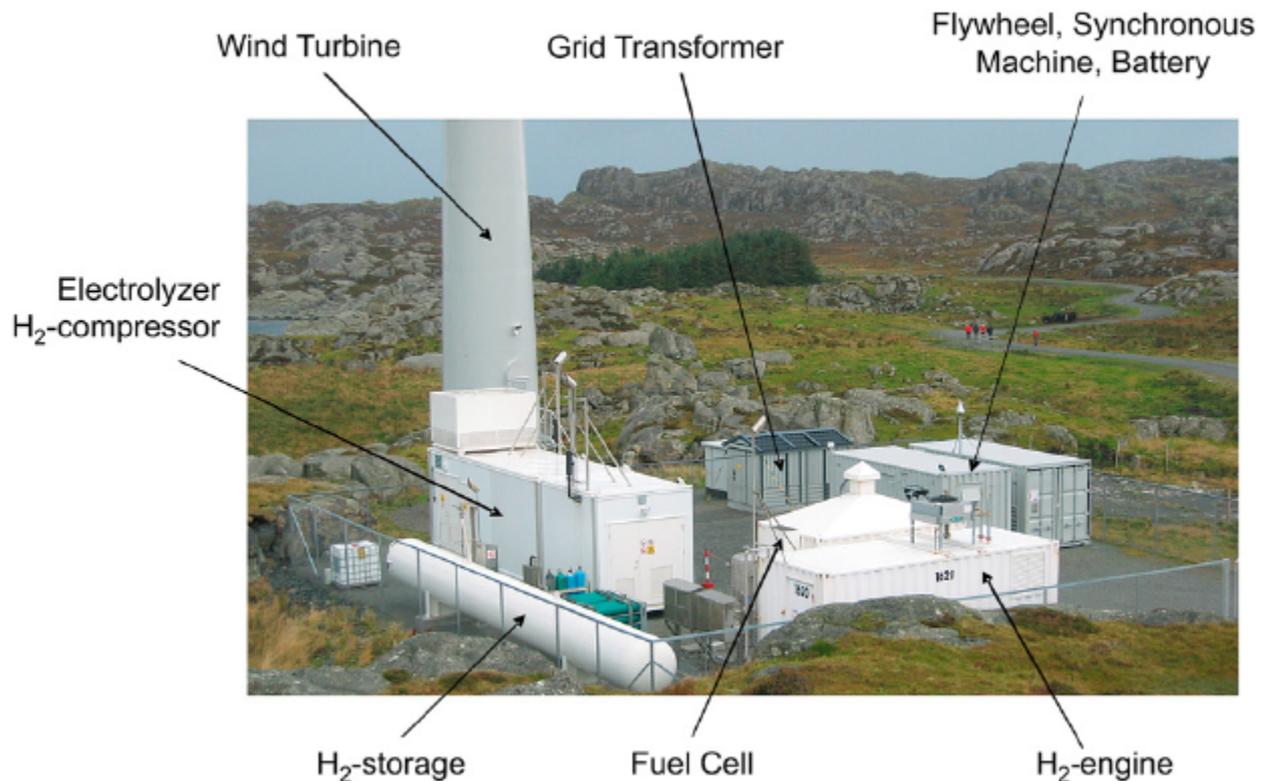
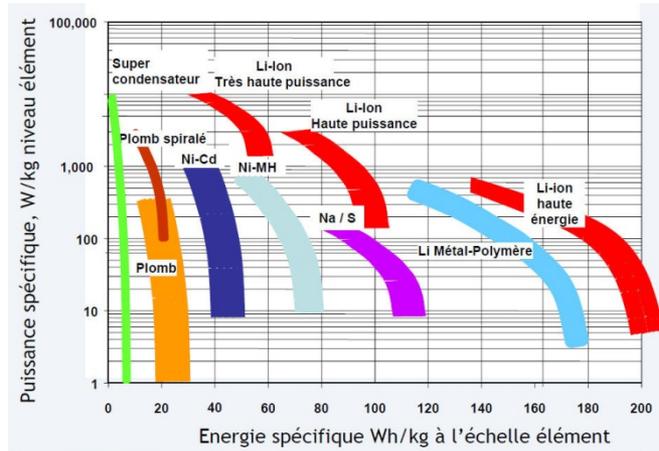


Fig. 1 - Photo of the Utsira wind/hydrogen demonstration plant (Ulleberg, 2005).



## 4- Les systèmes électrochimiques et les supercondensateurs



### Supercondensateurs

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

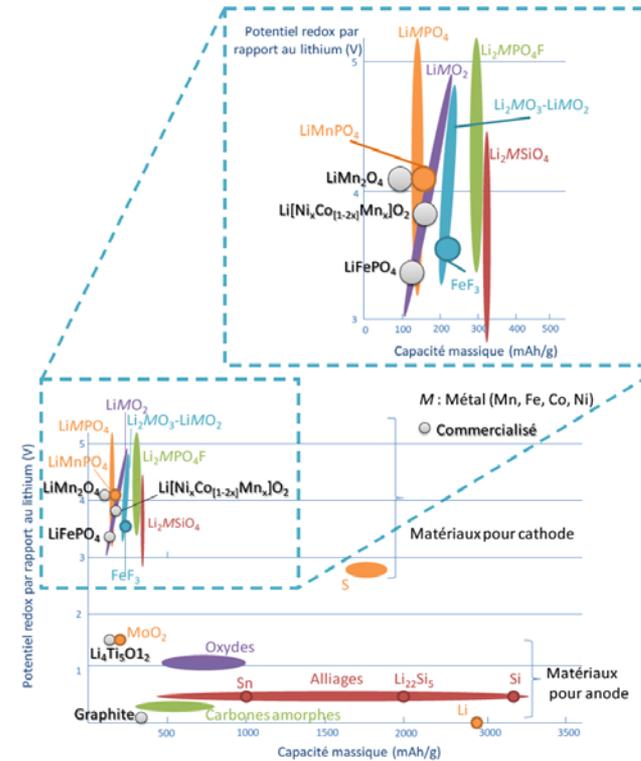
Matériaux: charbon actif

Electrolytes: organiques ou aqueux

**Céramiques multicouches à haute permittivité**  
matériaux ferroélectriques tels que  $\text{BaTiO}_3$   
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

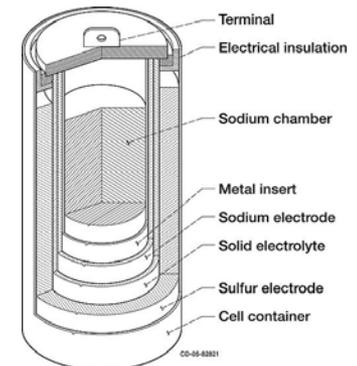
- Maîtrise des réactions entre l'air et les composés constitutifs des électrodes, formation d'hydroxydes et de dendrites
- Piégeage des polysulfures ( $\text{Li}_2\text{S}_x$ ,  $x=1..8$ ) solubles dans les électrolytes organiques par des nano-composites C-S

### 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)



Sodium sulfur battery schematic

#### ◆ A circulation d'électrolyte (redox-flow)

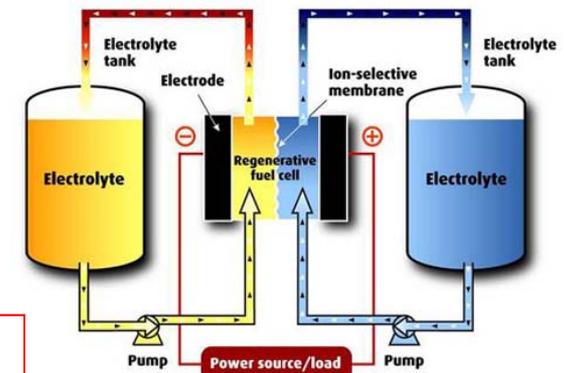
Deux demi-cellules contenant chacune un électrolyte.

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

Ex : système Vanadium – Vanadium obtenu par dissolution de  $\text{V}_2\text{O}_5$  dans l'acide sulfurique  $\text{H}_2\text{SO}_4$

→ cathode : ions  $\text{VO}_2^+$  et  $\text{VO}^{2+}$ ; anode : ions  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{V}^{2+}$

Adapté au stockage stationnaire à grande échelle



Miniaturisation pour application au stockage électrique embarqué ?





## 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...