



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
(offre des facilités de conversion en toutes formes et favorise l'exploitation des immenses ressources renouvelables)
 - 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 ?



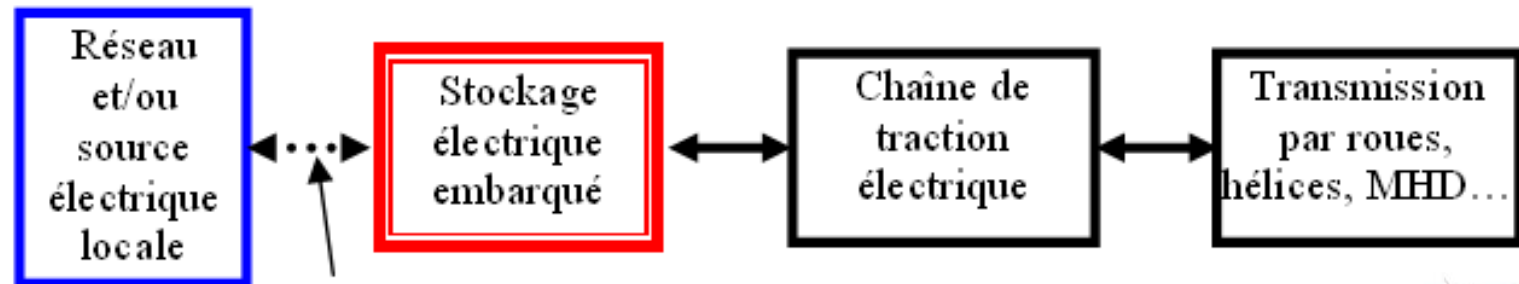
1- Introduction

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
(comprendre les interactions de l'accumulateur d'énergie avec le « système »)

Les principales contributions du stockage au vecteur électrique :

Transports : système de propulsion « tout électrique »



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



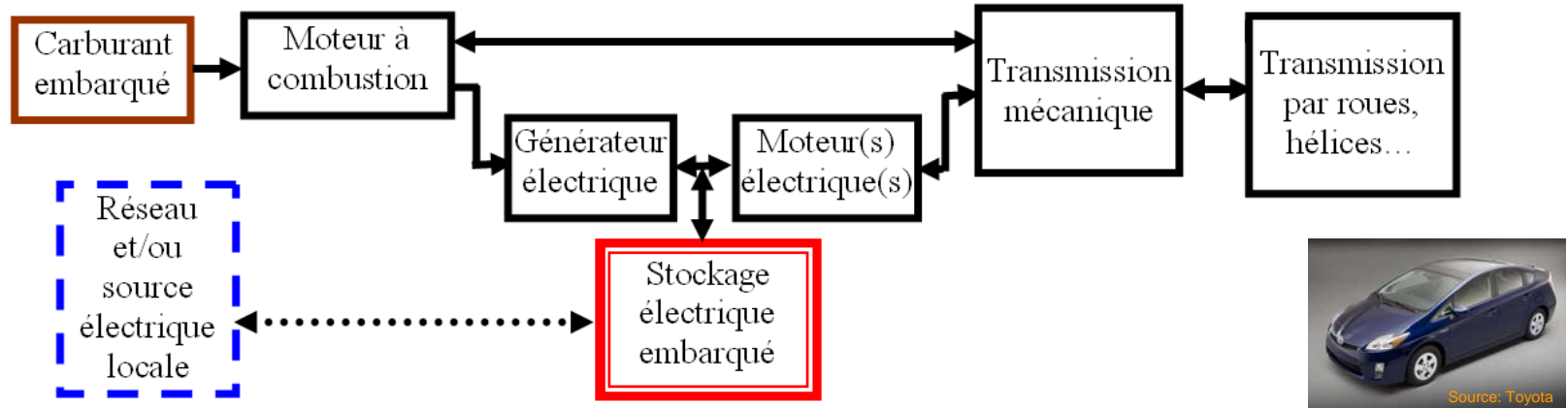
Source: Renault



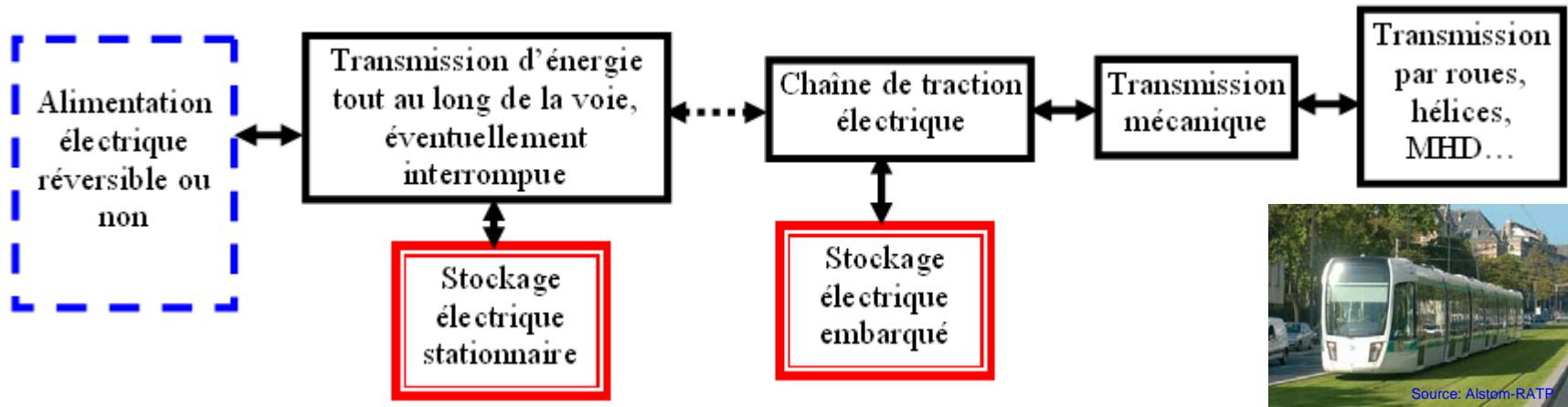
1- Introduction

Les principales contributions (suite) :

Transports : système de propulsion hybride, éventuellement rechargeable



Transports guidés, alimentation par la voie, éventuellement interrompue

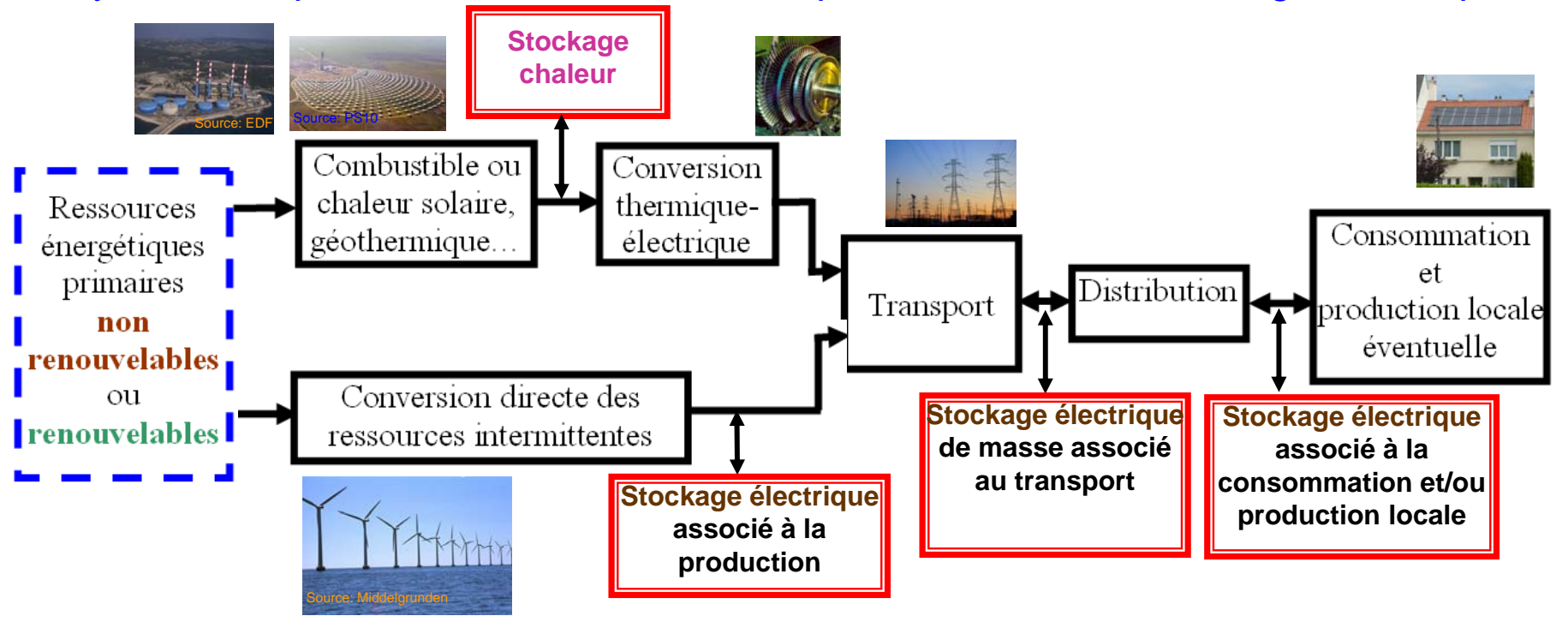




1- Introduction

Les principales contributions (suite) :

Systeme de production – réseau de transport et distribution d'énergie électrique



Améliorations nécessaires :

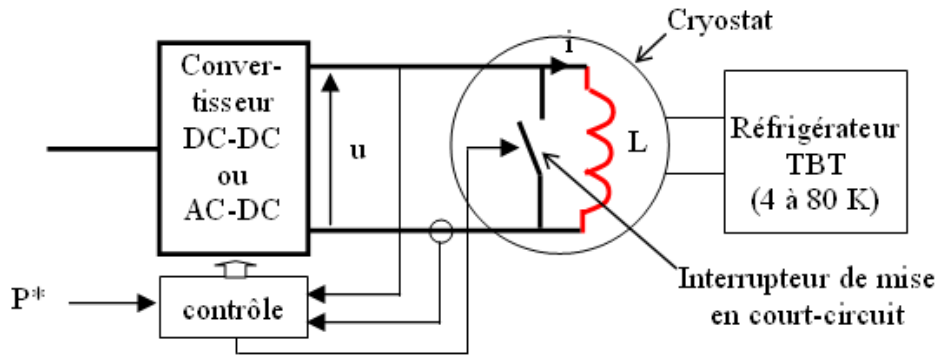
- outre les performances purement techniques (masse, rendement, durée de vie...)
- gains économiques et environnementaux sur l'ensemble du cycle de vie
- matériaux disponibles et/ou recyclables
- risques et impacts environnementaux acceptables à l'usage



2- Systèmes « physiques » de stockage

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

Electromagnétique avec supraconducteurs



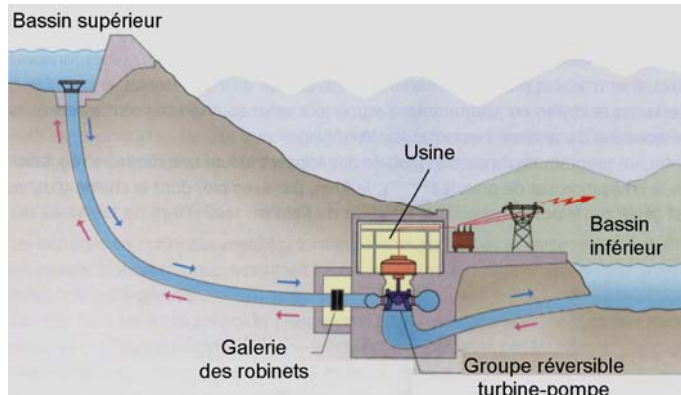
$$W_L = \frac{1}{2} L \cdot I^2$$

Usages impulsions (s, min)

Matériaux supra HT,
mise en œuvre, coûts
Aspects magnétiques,
mécaniques, cryogénie...

Mécanique gravitaire (eau):

Le stockage de masse le plus utilisé au monde, groupes de qq MW à qq 100 MW, qq heures ; STEP = station de transfert d'énergie par pompage



$$W_G = M \cdot g \cdot h$$

Encore beaucoup de possibilités :

- sous-terrain,
- bord de mer
- autres...

Aspects environnementaux,
Électrotechniques (vitesse variable grande puissance),
Valorisation économique...



2- Systèmes « physiques » de stockage

Gaz (air) comprimé :

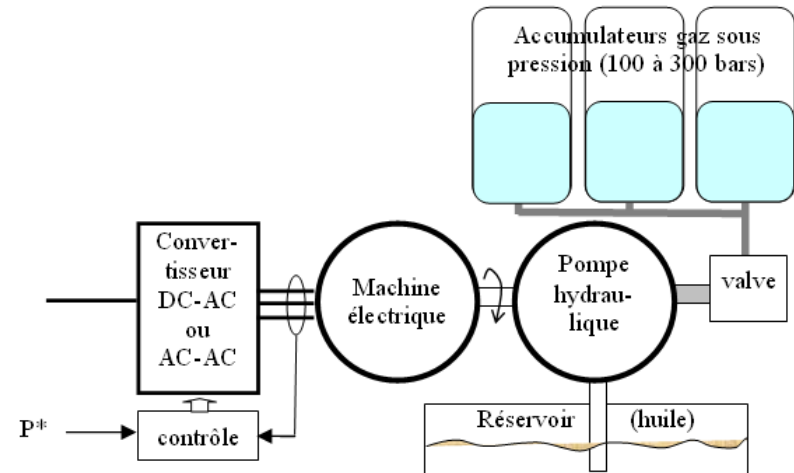
$$W_{\text{comp}} \cong \Delta P \cdot V$$

◆ Hydropneumatique

Utilisation d'un fluide pour compresser le gaz dans des accumulateurs hydropneumatiques, en développement.

Bilan énergétique plutôt bon (selon masse et coût)
Potentiel de coût sur cycle de vie intéressant.

Optimisations « système » nécessaires



◆ Pneumatique en caverne:

Hybridation stockage / production
par turbine à combustion à gaz
(2 usines en service : Allemagne et USA)

Bilan énergétique médiocre
Répond à un modèle économique
de valorisation par les variations de coût de l'électricité

◆ 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)
rendement sur cycle attendu 70%
chaleur stockée à 600°C

Stockage de chaleur à améliorer
Compresseurs et turbines
Réservoirs géologiques

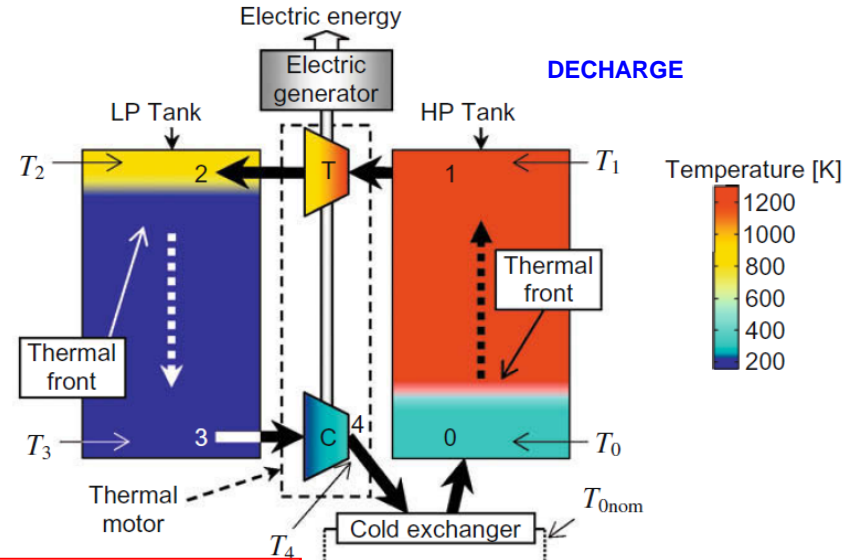
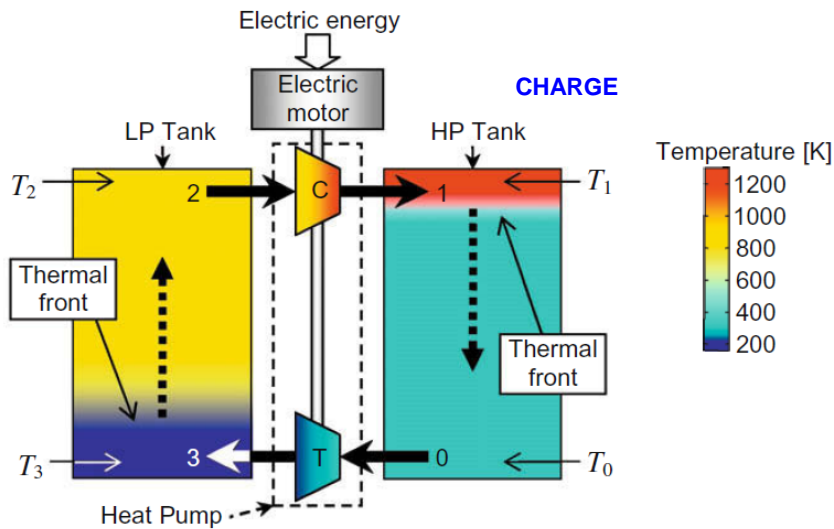


2- Systèmes « physiques » de stockage

Stockage thermodynamique de chaleur

Stockage de masse, chaleur dans des réfractaires,
Pas de contraintes géographiques
Rendement potentiellement élevé
En développement.

$$W = c.M$$



Turbomachines nouvelles (pompes à chaleur haute température (800°C)
Matériaux bas coûts, disponibles et à faible impact

Source : projet THESE
(Thermal Energy Storage of Electricity)



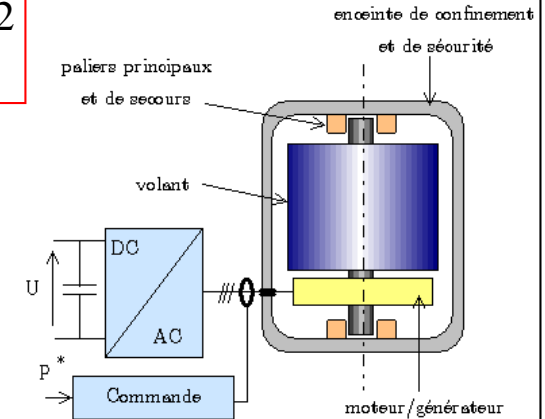
2- Systèmes « physiques » de stockage

Volants d'inertie

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

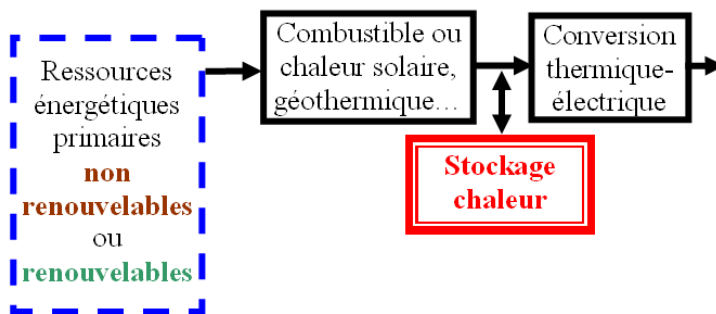
- Grande tenue en cyclage
- Autodécharge élevée (frottements aérodynamiques)
- Matériaux à haute résistance, grande vitesse
- Suspensions magnétique...

Optimisation système : matériaux et machines grande vitesse, vide, enceinte de confinement...
Minimisation des coûts.



Stockage réversible de chaleur :

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



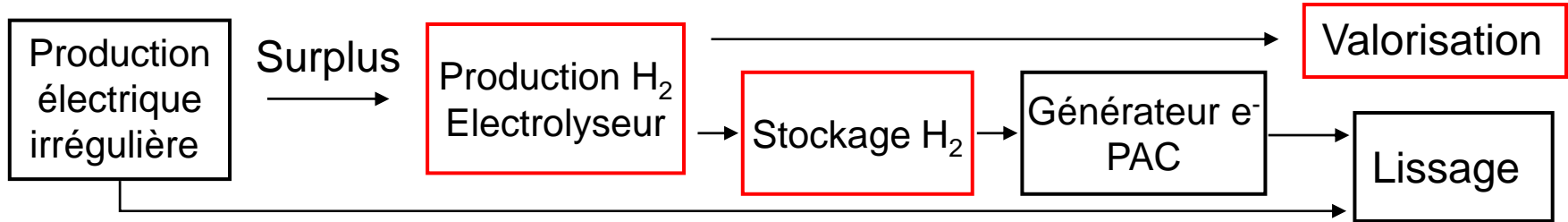
Déjà exploité dans les centrales solaires à concentration
Pourrait l'être dans d'autres centrales thermiques pour accroître la souplesse et le rendement

Matériaux bas coûts, disponibles et à faible impact
Gestion d'énergie

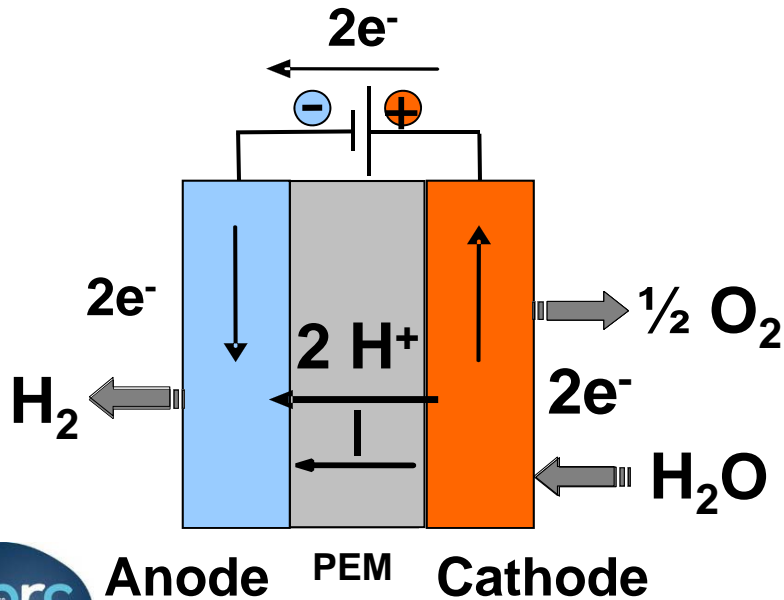


3- L'hydrogène comme moyen de stockage du vecteur électricité

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 H₂ par électrolyse de l'eau



Rendement ~ 50-60 % (vs. PCI de l'hydrogène)

Durée de vie ~ 10000 h

Coût ~ 7-9 €/kg

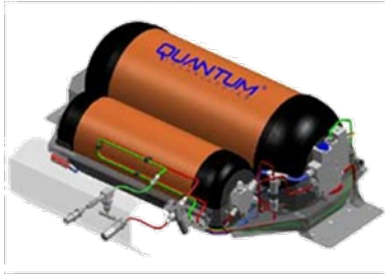
Pistes d'amélioration:

- Augmentation P fonctionnement à T.A.
- Augmentation T fonctionnement : $\Delta E = (\Delta H - T\Delta S)/2F$
- Catalyseurs d'électrodes (diminution surtension et coût)
- Conductivité ionique des Membranes (PEM, Céramiques)

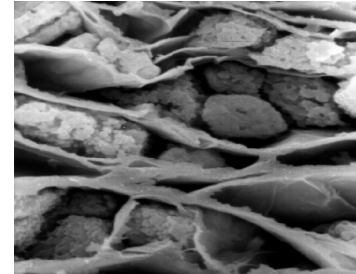


3- L'hydrogène comme moyen de stockage

Stockage stationnaire de l'hydrogène



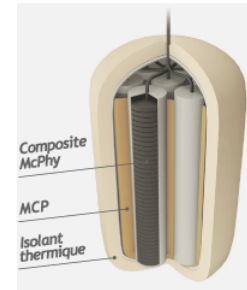
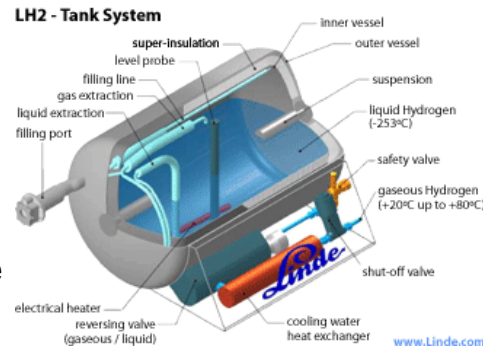
Gaz (200 – 700 bar)
 $C_V \sim 20 \div 40 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{l}$
 + technologie
 - sécurité



Solide (P, T normales):
 $C_V \sim 100 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{l}$
 +sécurité
 +capacité volumique
 - capacité spécifique
 - transfert de la chaleur

Liquide (20 K)

$C_V = 71 \text{ g}_{\text{H}_2}/\text{l}$
 + capacité
 - cout, efficience, sécurité



Réservoirs:
 $\text{MgH}_2 + \text{C} + \text{MCP}$

Société McPhy & CNRS-Néel Grenoble

Valorisation industrielle de la surproduction électrique

Production H₂ industriel

- 96 % dérivés carbonés (CH₄, Nafta, charbon...)
- 4% électrolyse

Utilisateurs

- Raffineries
- Ammoniac
- Verre
- Métallurgie, spatial
- Agroalimentaire

Atouts production H₂ par électrolyse:

- Bilan carbone
- Pureté (métallurgie, μ électronique)
- Valorisation surplus e⁻



4- Les systèmes électrochimiques et les supercondensateurs

Supercondensateurs

pour le stockage instantané de puissance

Électrolytique à double couche (EDLC)

deux électrodes poreuses, généralement en charbon actif et imprégnées d'électrolyte, séparées par une membrane isolante et poreuse (pour assurer la conduction ionique).

électrolyte organique (acétonitrile)

→ technologie mature : Maxwell (USA), Batscap (France)

+ Grande tenue en cyclage

- Toxicité en cas de feu

- faible énergie massique ≤ 10 Wh/kg

électrolyte aqueux

→ en développement : Hutchinson (France)

+ bas coût

+ sécurité

Céramiques multicouches à haute permittivité

matériaux ferroélectriques tels que BaTiO_3

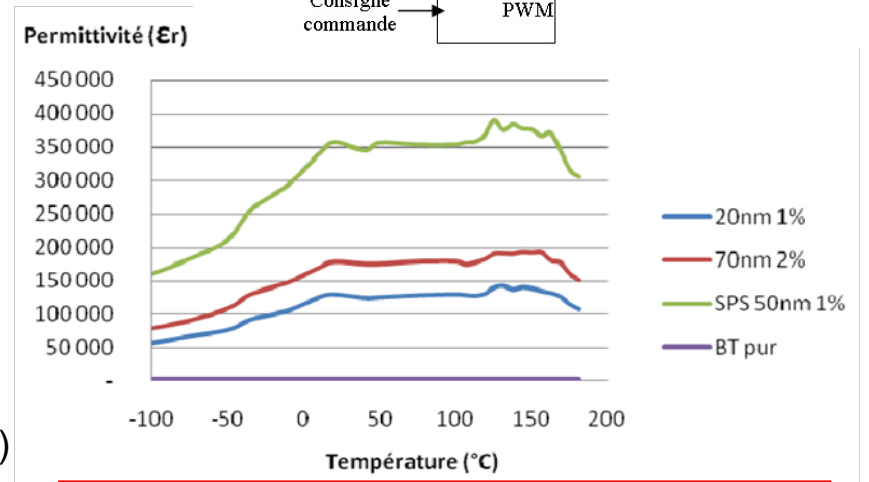
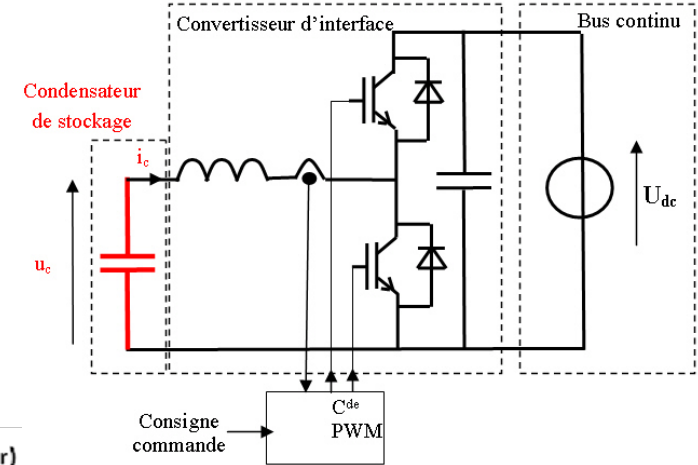
permittivités diélectriques gigantesques : $10^5 - 10^6$

→ en développement : EESor (USA), NanoE (France)

+ Energie massique $\gg 10$ Wh/kg

- Maitrise des courants de fuite

$$W_c = \frac{1}{2} C \cdot V^2$$



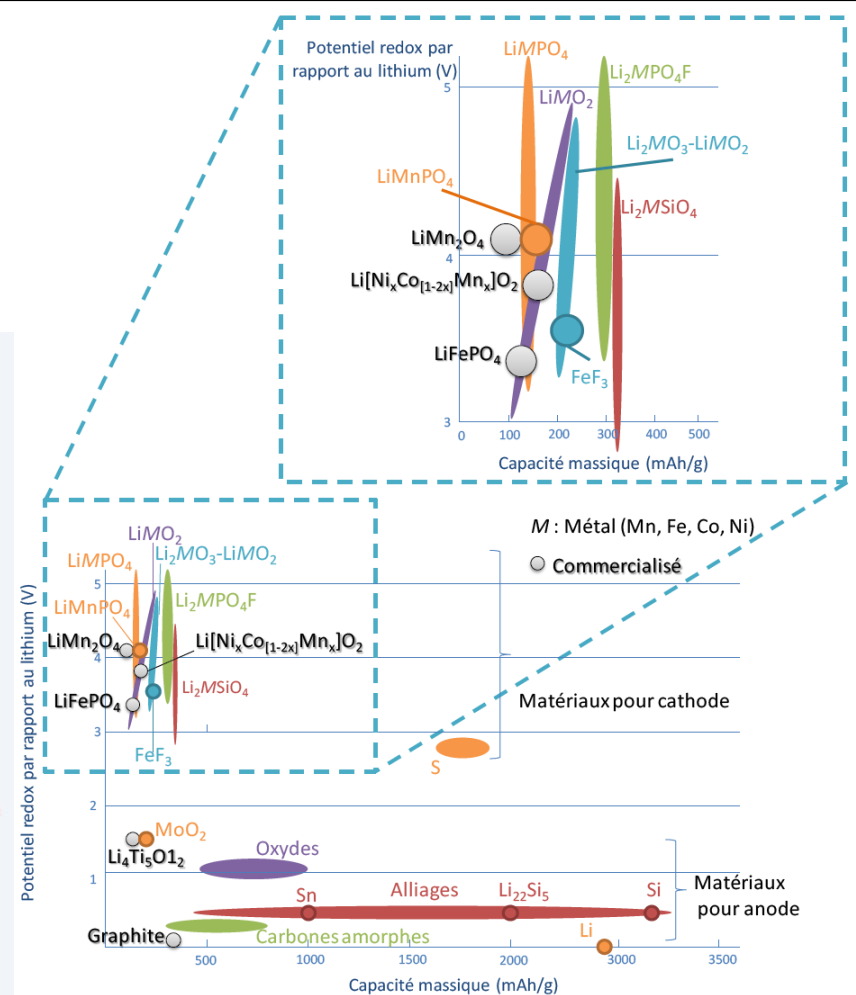
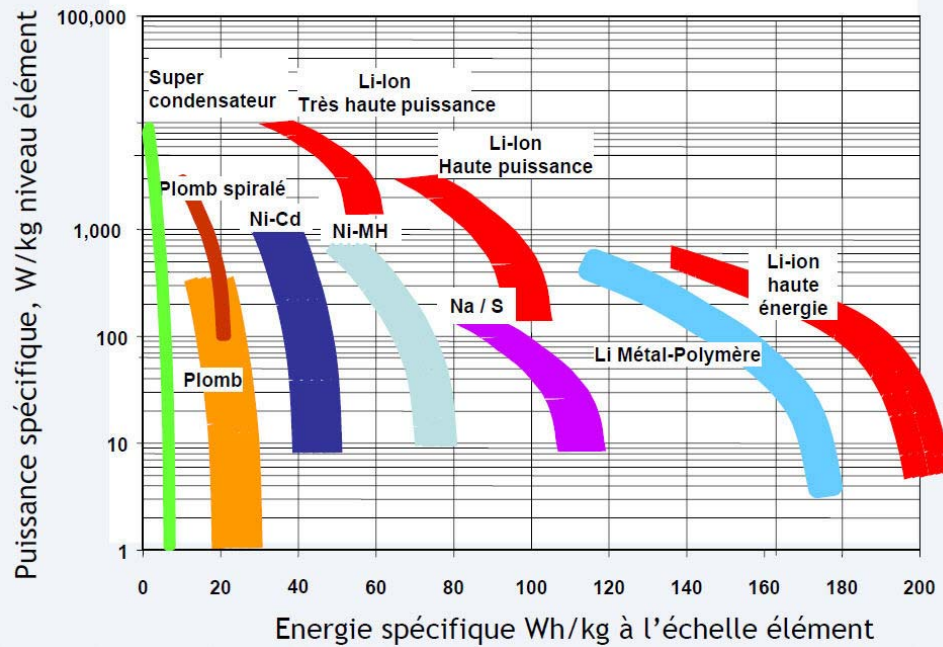
Utilisation de poudres nanométriques
Procédé de frittage en couches minces



4- Les systèmes électrochimiques et les supercondensateurs

Accumulateurs électrochimiques

Les systèmes lithium-ion et lithium métal offrent les meilleures énergies et puissances spécifiques.
Les systèmes Pb-acide, Ni-Cd, Ni-Zn, Ni-MH peuvent être mieux adaptés pour certaines applications

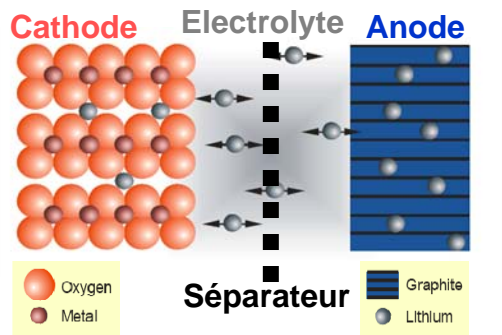




4- Les systèmes électrochimiques et les supercondensateurs

Accumulateurs électrochimiques

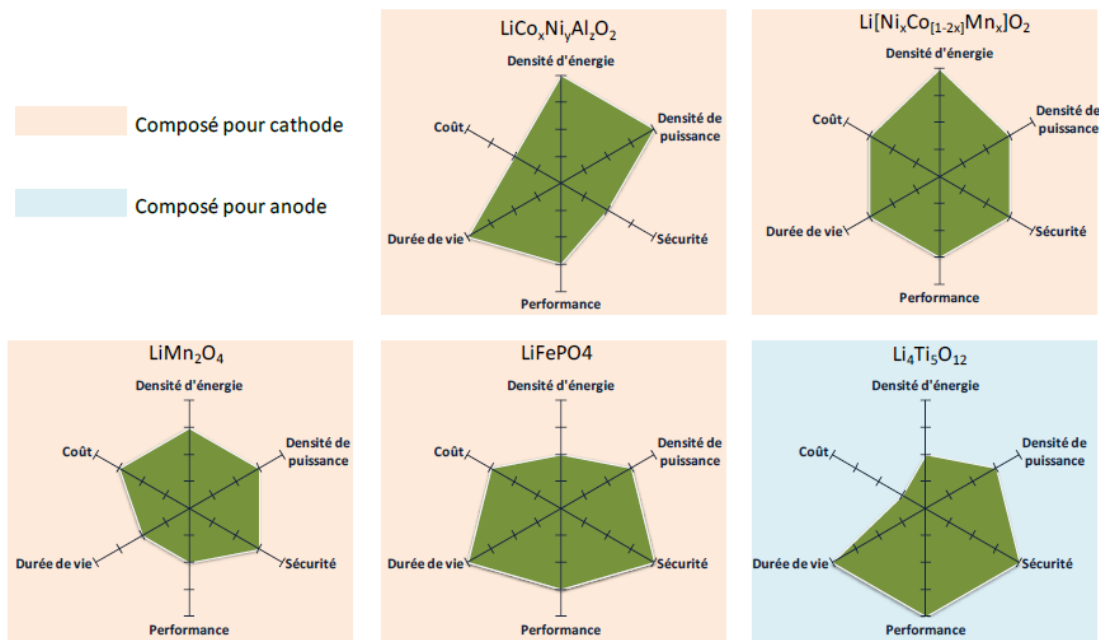
◆ Technologies lithium-ion



Composé pour cathode

Composé pour anode

- matériaux de cathode de structure lamellaire ou spinelle, ou à base de solution solide (Li_2MnO_3 - LiMO_2),
- matériaux d'anode : titanate, Si, Sn
- électrolytes stables (temp., potentiel)



◆ 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



4- Les systèmes électrochimiques et les supercondensateurs

Batteries de haute capacité

◆ Sodium-soufre

Haute température (300 - 350°C) : cathode solide, anode sodium liquide, membrane électrolyte céramique (β -alumine)

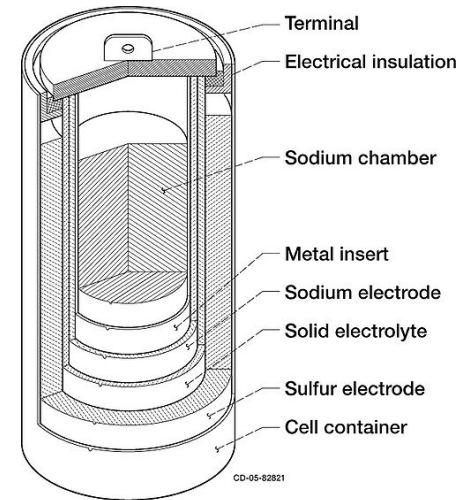
+ haute densité d'énergie et bonne efficacité de charge/décharge (~ 90%)

+ long cycle de vie, matériaux bon marché

- polysulfures de sodium très corrosifs

Exploitable uniquement pour du stockage stationnaire à grande échelle

→ Technologie commerciale ; un seul fabricant NGK (Japon)



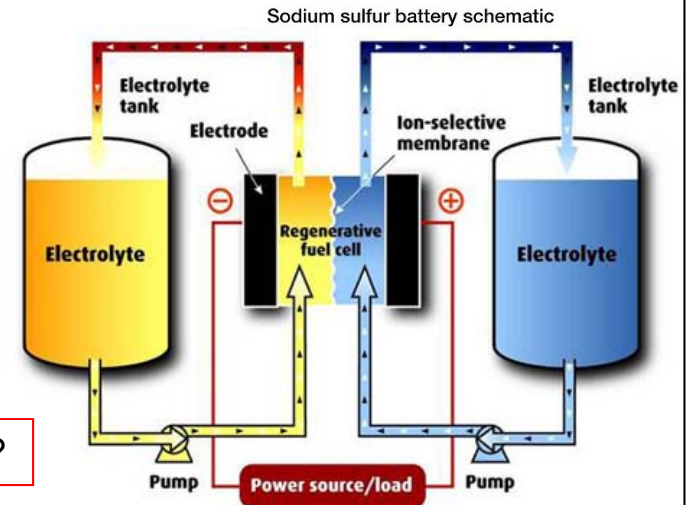
◆ A circulation d'électrolyte (redox-flow)

Deux demi-cellules contenant chacune un électrolyte. Les électrolytes stockés dans des réservoirs sont mis en circulation jusqu'aux demi-cellules séparées par une paroi semi-perméable qui autorise le passage d'ions commun aux deux électrolytes.

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



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

Variété des besoins en : Capacité énergétique, puissance,
Durée de vie en 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 une meilleure optimisation système et intégration économique :
Importance des aspects cycles de vie
Matériaux disponibles, peu impactants...
Meilleure connaissance des lois de vieillissement à l'échelle du composant

Besoin de recherche avec une vision plus globale des problèmes, des collaborations interdisciplinaires et industrielles...