

17. Stockage de l'énergie

17.4 – Stockage électrochimique et électrostatique

Daniel R. Rousse, ing., Ph.D.

Département de génie mécanique

Victor Aveline, M.ing.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Les batteries électrochimiques
- Les batteries à circulation ou à flux
- Les supercondensateurs
- Cycle de vie
- Conclusion

Plan de la présentation

- ***Introduction et objectifs de la capsule***
- Les batteries électrochimiques
- Les batteries à circulation ou à flux
- Les supercondensateurs
- Cycle de vie
- Conclusion

Introduction et objectifs

- Cette capsule aborde les technologies de stockage par batteries électrochimiques (les batteries classiques et les batteries à circulation ou à flux).
- Les supercondensateurs, bien que très ressemblants aux batteries, utilisent une autre forme de stockage de l'énergie, le stockage électrostatique.
- De plus, les batteries et les supercondensateurs ont en réalité des applications très différentes, voire même opposées.

Introduction et objectifs

- Objectifs de cette présentation
 - Être en mesure de donner les caractéristiques techniques des batteries électrochimiques ainsi que des supercondensateurs;
 - Être capable de différencier ces deux technologies;
 - Savoir donner des exemples d'applications et de centrales de stockage;
 - Réfléchir sur les perspectives de développement de chacune des technologies abordées.

Plan de la présentation

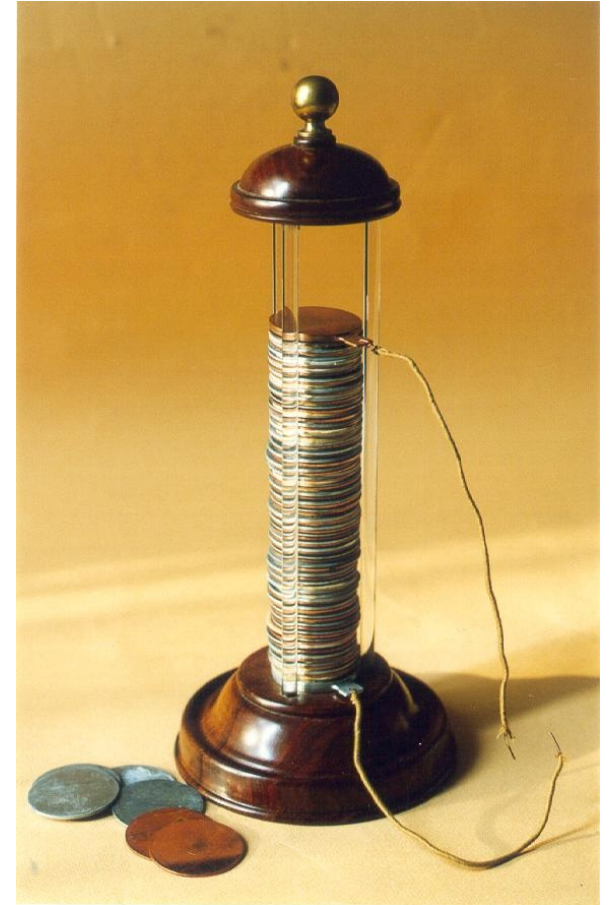
- Introduction et objectifs de la capsule
- ***Les batteries électrochimiques -> aussi appelées accumulateurs***
- Les batteries à circulation ou à flux
- Les supercondensateurs
- Cycle de vie
- Conclusion

Les batteries électrochimiques

- **Vocabulaire : de quoi parle t-on ?**

- Pile

A l'origine, la pile désigne le dispositif inventé par Alessandro Volta et composé d'un empilement de rondelles de deux métaux différents, séparées par des feutres imprégnés d'un électrolyte. Aujourd'hui, ce terme désigne tout élément monobloc, dont la décharge est irréversible. On peut aussi parler de cellule primaire. Par abus de langage, il désigne aussi d'autres générateurs électrochimiques comme la pile à combustible.



Les batteries électrochimiques

- **Vocabulaire : de quoi parle t-on ?**

- Accumulateur

Par opposition à la pile, l'accumulateur électrique est un élément susceptible d'être rechargé, avec un courant de charge inverse. On peut aussi parler de cellule secondaire.

- Batterie

C'est un assemblage d'accumulateurs : une batterie d'accumulateurs est le terme exact. Dans l'industrie, comme dans ce cours, la terminologie plus sobre de batterie est employée.

Les batteries électrochimiques

- **Qu'est ce qu'une batterie ?**

- Les premières furent inventées sur la fin du 19^{ème} siècle;
- Les batteries électrochimiques sont le moyen de stockage de l'énergie **le plus répandu** et avec la plus large gamme d'applications. Aujourd'hui leur application vont de l'automobile à l'alimentation d'appareils électroniques portables;
- Elles commencent à être utilisées pour du stockage en petite quantité de la production d'énergie renouvelable pour des utilisations locales;
- Et plus récemment encore, pour du stockage à plus grande échelle en réseau et pour des opérations de stabilité des réseaux.

Les batteries électrochimiques

- **Qu'est ce qu'une batterie ?**

- Durées de vie : de quelques mois, à quelques années, à une dizaine d'année, selon l'utilisation de cyclage;
- Puissance cible : de quelques kW à quelques MW;
- Coût : 600 à 1500 €/kW.

Les batteries électrochimiques

- **Principe de fonctionnement (type)**

- Une batterie est un assemblage d'accumulateurs qui stockent l'énergie électrique issue de la circulation des ions entre deux électrodes à travers un électrolyte, et des électrons qui se déplacent à travers un circuit extérieur.
- Les matériaux utilisés pour la conception de l'anode, de la cathode et de l'électrolyte peuvent être différents d'une technologie à une autre, donnant lieu ainsi à une grande variété de batteries.
- La plupart des batteries utilisées aujourd'hui sont dites « secondaires » et peuvent ainsi supporter plusieurs cycles de charge/décharge : les réactions chimiques mises en jeu pour produire de l'électricité peuvent être inversées pour emmagasiner l'énergie d'une source extérieure. Par opposition, les batteries « primaires » sont à usage unique.

Les batteries électrochimiques

- **Principe de fonctionnement (type)**

- Une batterie secondaire est caractérisée par un total de quatre (4) équations de demi-réaction : une (1) pour chaque électrode et pour chaque état de fonctionnement (charge ou décharge).
- On parle de réactions d'oxydo-réduction lors de la décharge.
 - Cathode = électrode positive : équation de réduction
 - Anode = électrode négative : équation d'oxydation
- L'anode fournit les électrons au système lors de la décharge et la cathode capte les charges positives de la solution électrolytique. Lors de la charge, c'est l'inverse.

Les batteries électrochimiques

- **Avantages et inconvénients des batteries électrochimiques**

Avantages

- Efficacité : 70-80% contre 50-70% pour les systèmes mécaniques
- Temps de réponse en charge et en décharge très rapide
- Diversité
- Disponibilité + modularité
- Pour du stockage horaire, plus rarement journalier

Inconvénients

- Temps de vie : dégradations graduelles (différentes en origines et en intensité selon le type)
- Réversibilité
- Densité en énergie et en puissance
- Taille du système
- Sécurité
- Souvent besoin d'une régulation thermique

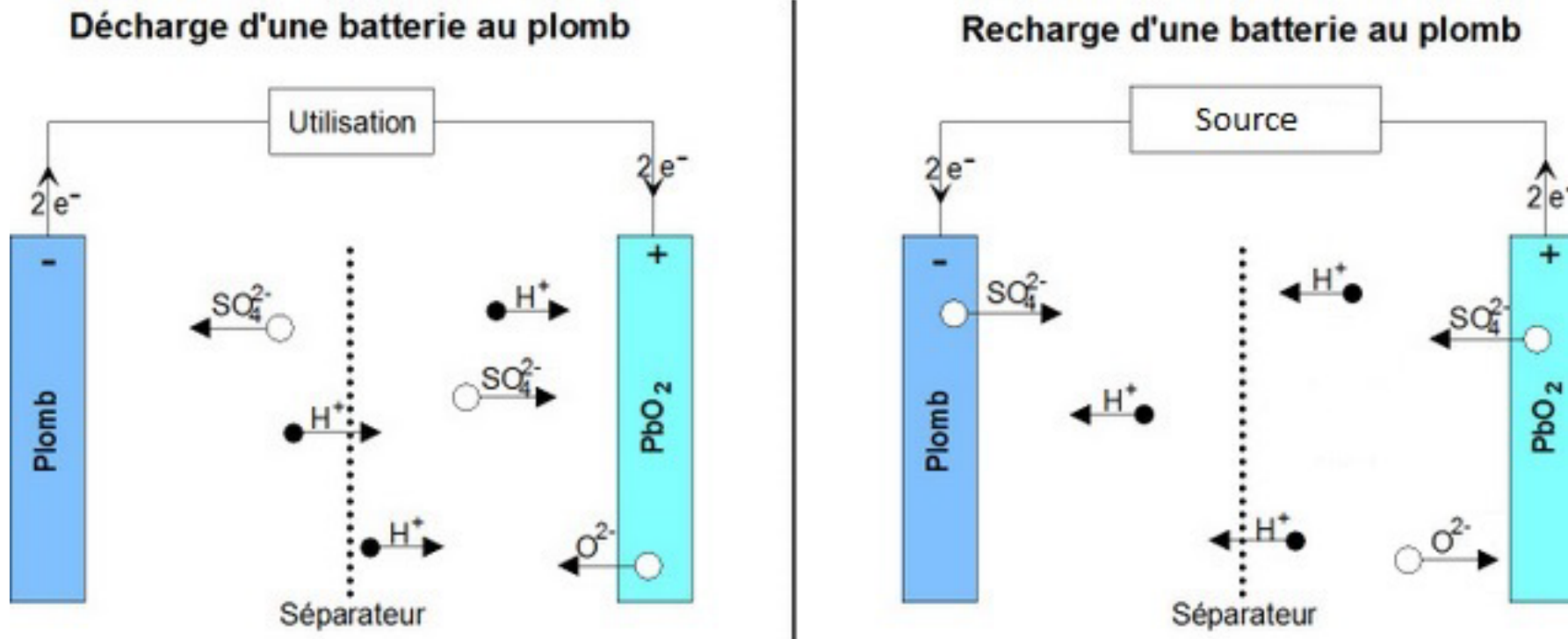
Les batteries électrochimiques

- **Les accumulateurs traditionnels - Batterie plomb/acide (Pb/A)**
 - Technologie la plus ancienne et la plus mature : mise au point par le physicien Gaston Planté, en 1859 (au Conservatoire National des Arts et Métiers, à Paris);
 - Tension nominale d'un accumulateur au plomb : 2,1 V -> il en faut donc six (6) en série pour concevoir une batterie de 12 V;
 - Le plomb est un polluant de l'eau, l'électrolyte est donc très difficilement recyclable.

Les batteries électrochimiques

- Batterie plomb/acide (Pb/A)

Bosch Auto. 2014. *Fonctionnement d'une batterie Processus électrochimique*. 2:02min.
<https://www.youtube.com/watch?v=uyMA7padCKk> (batterie au plomb)



Les deux électrodes sont en plomb et l'électrolyte est une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 et d'eau

Fonctionnement électrique d'une batterie au plomb. <https://www.batterie-solaire.com/PBCPPlayer.asp?ID=299054>

Les batteries électrochimiques

- **Les accumulateurs traditionnels - Batterie plomb/acide (Pb/A)**
 - Densité théorique de 168 Wh/kg. En pratique, 45 à 50 Wh/kg, dû à l'utilisation de matériaux électrochimiquement inertes et à une utilisation partielle des matériaux actifs (35 à 55%);
 - Rendement de 70 à 75%;
 - La moins chère des batteries;
 - Autodécharge de 5%/mois à 25°C pour des batteries neuves et jusqu'à 1%/jour pour des batteries en fin de vie.

Les batteries électrochimiques

- **Batterie plomb/acide (Pb/A) : applications**

- La durée de vie dépend fortement de l'utilisation qui en est faite (cyclage). Tenue moyenne de quelques centaines de cycle et jusqu'à environ 500. Supporte très mal les décharges profondes;
- La batterie au plomb est utilisée pour le démarrage de la plupart des véhicules thermiques;
- Comme système de stockage couplé à des panneaux solaires PV pour les sites isolés, dans leur version à décharge profonde.

Les batteries électrochimiques

- **Une autre batterie traditionnelle : la batterie nickel/cadmium (Ni/Cd)**
 - Elle n'est plus autorisée aujourd'hui à cause de la toxicité du Cd

- **Puis dans les années 1970-1980 : apparition des technologies nickel-metal hydrure (Ni-MH) et lithium-métal polymère (LMP)**

Les batteries électrochimiques

- **Batterie Lithium-Ion (Li-ion)**

- La plus connue, avec des performances en terme d'autonomie nettement supérieures aux autres technologies plus anciennes, alimentent aujourd'hui plus de 90% de l'électronique portable de petite puissance;
- L'état de charge consiste en une réaction d'oxydation dans l'électrode positive (cathode) qui va libérer des ions Li^+ dans l'électrolyte;
- Une réaction de réduction va ensuite avoir lieu au niveau de l'électrode négative (anode), recombinant les ions Li^+ avec les électrons qui ont traversé le circuit extérieur. En mode décharge, c'est la réaction inverse qui a lieu;
- Cette réaction est réversible et donc reproductible mais sur un nombre limité de cycles.

Les batteries électrochimiques

- **Batterie Lithium-Ion (Li-ion)**

- Utilise du carbone comme matériau d'électrode négative et des oxydes métalliques à base de cobalt (NMC), de manganèse (LMO) ou du phosphate de fer lithié (LFP) pour l'électrode positive;
- Densité de 200 à 250 Wh/kg pour NMC;
- Pas de processus chimique pour le stockage;
- Des variantes existent: Lithium air (batterie la moins polluante) et lithium métal.

Les batteries électrochimiques

- **Batterie Nickel-Zinc (Ni-Zn)**
 - Une cathode en nickel et une anode en zinc et un électrolyte alcalin
- **Batterie Métal-Air Zinc (Zn-Air)**
- **Batterie Sodium-Souffre (Na-S)**
- **Batterie Sodium-Nickel Chloride (Na-NiCl₂) ou ZEBRA**

Les batteries électrochimiques

- The “Liquid Metal Battery”



- Donald Sadoway: The missing link to renewable energy
- [https://www.ted.com/talks/donald_sadoway_the_missing_link_to_renewable_ergy?language=en#t-846019](https://www.ted.com/talks/donald_sadoway_the_missing_link_to_renewable_energy?language=en#t-846019)

Les batteries électrochimiques

- **Applications**

- Centrale de stockage;
- Concurrentielles avec les STEP ou le stockage par air-comprimé pour des applications de taille moyenne;
- Transports;
- Petits appareils électroniques.

Les batteries électrochimiques

- **Applications : quelques exemples de centrales**
 - [AES Alamos Energy Storage Array](#) ;
 - Long Beach, USA;
 - 100 MW for up to 4h.
 - [Grand Ridge Energy Storage](#) ;
 - Marseilles, USA;
 - 31,5 MW for up to 23 min.

Les batteries électrochimiques

- Applications : quelques exemples de centrales

- Graciosa Project, Portugal

- Solar capacity: 1 MW
- Wind capacity: 4,5 MW
- Peak load: 2,3 MW
- Lithium-Ion: 6 MW, 32 min, 3,2 MWh
- Remplace 3,3 million L de diesel par an



Les batteries électrochimiques

- **Les batteries dans les voitures électriques : la Tesla Model S**

La Tesla Model S de capacité 100 kWh est équipée de 8 256 cellules Li-Ion de type 18650, pour un poids de la batterie d'environ 600 kg et une tension de fonctionnement du pack de 346 V. La batterie se trouve sous le plancher et est protégée par un blindage de 6 mm d'aluminium.

A droite : Une Tesla Model S et son Supercharger.
Source : <https://www.slas-hgear.com>



A gauche : Cellule Li-Ion de type 18650, conçue par Panasonic. Tension nominale de 3,6 V, pèse environ 50 g.
Source : Wikipédia

Question



ENR2020

- Qu'est-ce qui est vrai à propos des batteries ?
 - A. Il s'agit de l'assemblage d'accumulateurs.
 - B. C'est un dispositif également appelé cellule primaire.
 - C. Les batteries électrochimiques sont le moyen de stockage de l'énergie le plus répandu.
 - D. C'est un dispositif ne pouvant être rechargé.
 - E. Aucune de ces réponses.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Les batteries électrochimiques
- ***Les batteries à circulation ou à flux***
- Les supercondensateurs
- Cycle de vie
- Conclusion

Les batteries à circulation ou à flux

- Ou *redox-flow battery* en anglais
- Il y a stockage des couples électrochimiques à l'extérieur de la batterie : les électrolytes sont alors à l'état liquide
- Rendement de 65 à 75%
- Pour des puissances de quelques MW
- Coûts : 230-470 \$/kW (DOE, 2018)
- Coûts : 70-600\$/kWh (ces coûts baissent chaque année, 66\$/kWh (PC Mag, 2020) mais 555\$/kWh (DOE, 2018))

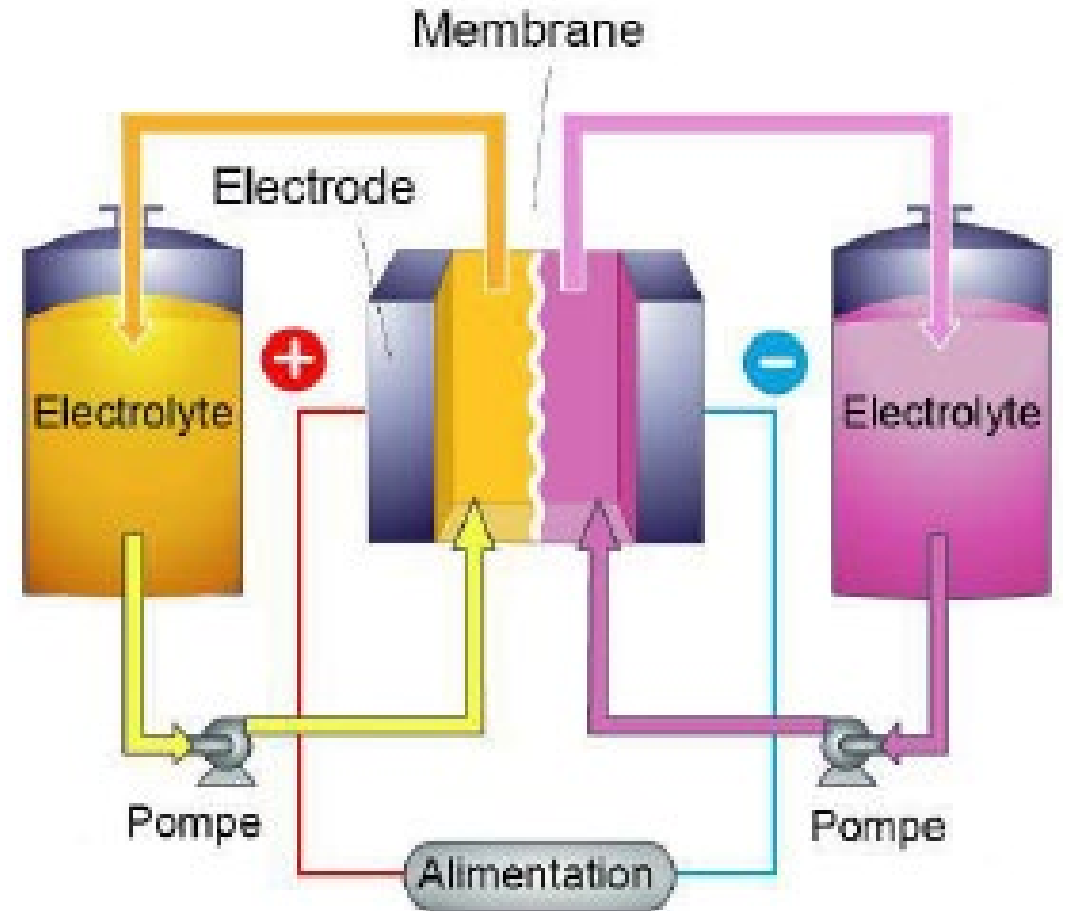


Illustration Corinne Beurtey, CEA, 2012

Les batteries à circulation ou à flux

- Le principe repose sur une réaction d'oxydation et une réaction de réduction au niveau de chacune des électrodes.
- La spécificité de la batterie redox-flow vient du fait que les réactifs sont en solution dans un électrolyte différent pour l'anode et la cathode, ils sont donc stockés dans deux réservoirs séparés et circulent dans deux demi-cellules.
- Ces dernières sont séparées par une membrane semi-perméable qui autorise le passage des ions communs aux deux électrolytes.
- Des pompes assurent la circulation des électrolytes afin de renouveler chaque réactif à la surface de l'électrode correspondante.

Les batteries à circulation ou à flux

- **Avantages**

- Principal avantage : la séparation électrolyte/cellule électrochimique permet un découplage entre la puissance disponible (dimensionnement de la cellule électrochimique) et la capacité énergétique du système (taille du réservoir d'électrolyte) : haute modularité et large plage des ratios puissance/énergie;
- De plus, les électrolytes jouent également le rôle de fluides caloporteurs, facilitant ainsi la régulation en température de la batterie;
- Grande durée de vie (15 à 20 ans) et faible autodécharge.

Les batteries à circulation ou à flux

- **Inconvénients**
 - Architecture à deux cuves compliquée;
 - Risques de fuites de l'électrolyte;
 - Faible densité énergétique;
 - Coût de maintenance.

Les batteries à circulation ou à flux

- Deux variantes seulement semblent opérationnelles :
 - Les batteries à base de **brome** : zinc-bromine (Zn-Br), sodium-brome, vanadium-brome
 - Les batteries **Vanadium**-Redox Flow (VBR), utilisent le vanadium dans différents états d'oxydation, pas de dégradation si déchargement sur une longue période.
- Ces batteries sont pour des applications de stockage de masse ou de lissage d'une production d'EnR.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Les batteries électrochimiques
- Les batteries à circulation ou à flux
- ***Les supercondensateurs***
- Cycle de vie de ces systèmes
- Conclusion

Les supercondensateurs

- Ou supercapacités : une valeur de capacité très élevée comparée aux condensateurs de la petite électronique;
- Stockage sous forme électrostatique;
- Deux électrodes poreuses en carbone activé plongées dans un électrolyte liquide et séparées par un séparateur laissant circuler les ions mais pas les électrons;
- Maximisation de la surface d'échange;
- Le rendement est élevé : 90 à 95%;
- Pour des puissances de quelques kW à quelques MW.

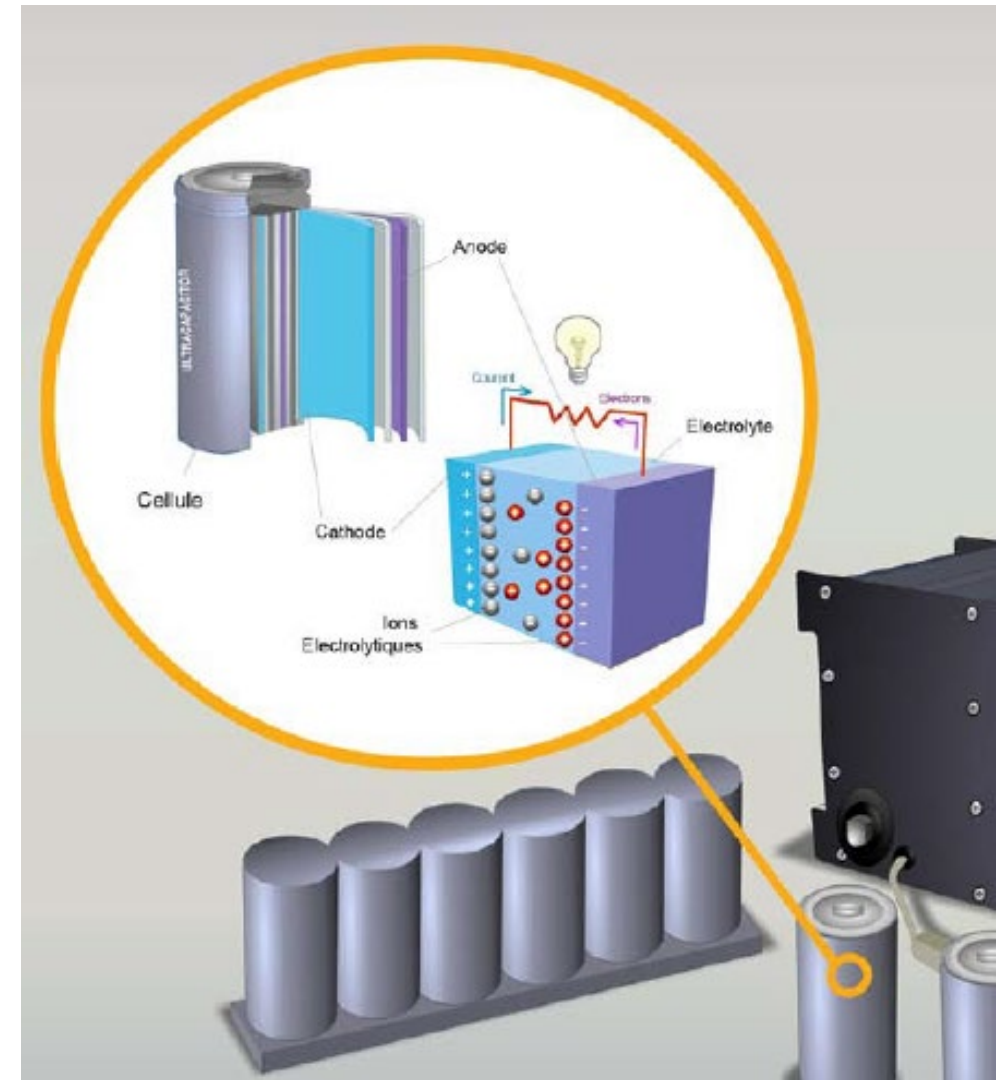
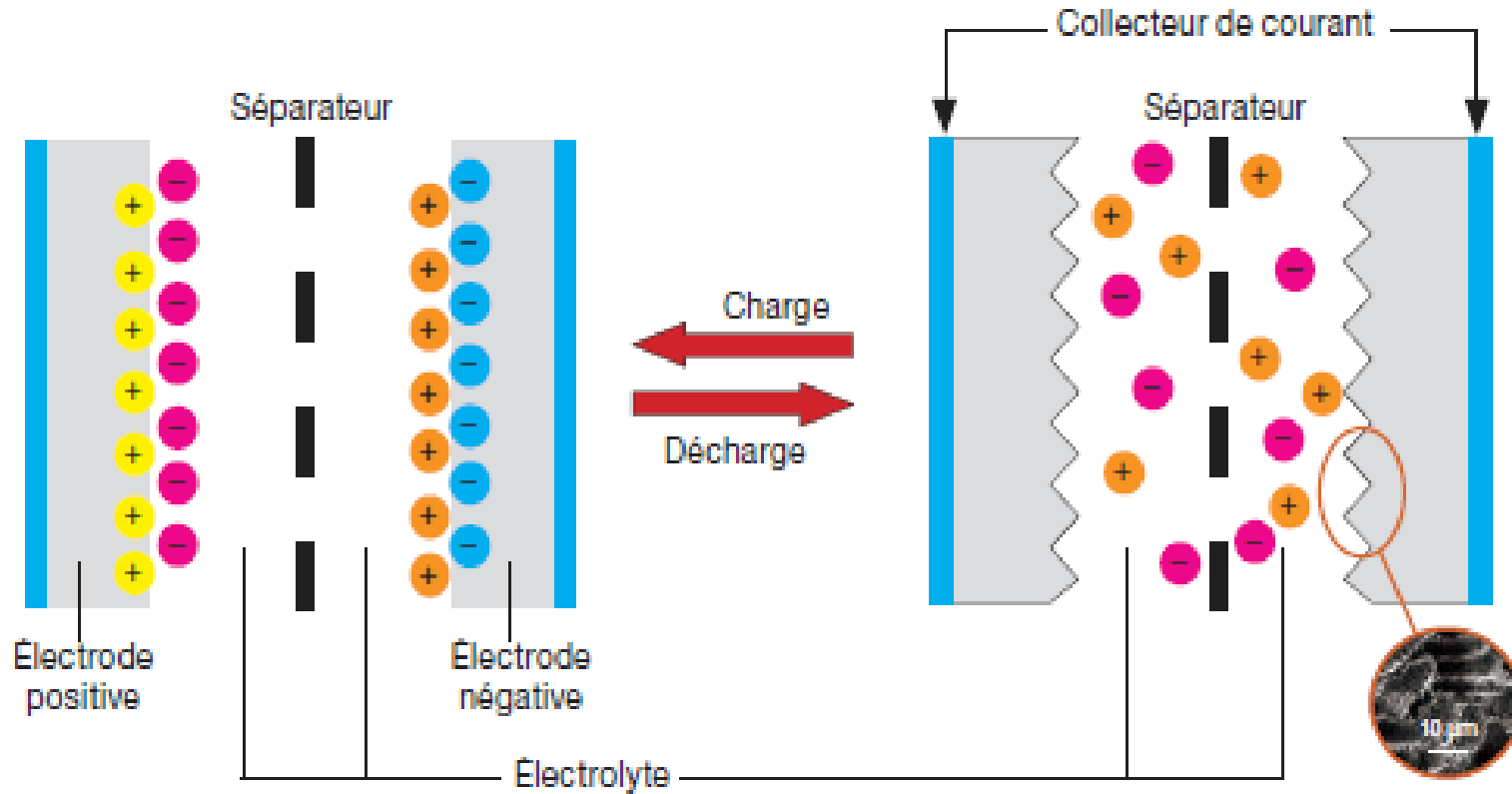


Illustration Corinne Beurtey, CEA, 2012

Les supercondensateurs



Représentation schématique d'un supercondensateur dans l'état chargé et déchargé. La porosité du carbone des électrodes est visible sur le zoom montrant une photo de microscopie électronique à balayage.
Source : *L'énergie à découvrir*, CNRS, 2013

L'interaction des électrodes et de l'électrolyte entraîne l'apparition spontanée d'une accumulation de charges aux interfaces : formation d'une double couche électrochimique (une couche de charges positives et une de charges négatives, pour un ensemble électriquement neutre).

Les supercondensateurs

Avantages

- Temps de réponse très rapide
- Temps de vie long : jusqu'à plusieurs centaines de milliers de cycles
- Haute densité énergétique
- Limite de tension assez basse

Inconvénients

- Autodécharge en quelques heures ou quelques dizaines d'heures
- Limite de capacité
- Coût élevé (100-500 €/kW ; 10 000-20 000 €/kWh d'après ENEA dans CEA)

Les supercondensateurs

- **Applications**

Stockage très court terme;

Pour de nombreux cycles de charge/décharge;

Pour un boost de puissance sur des temps courts : transport ou sport automobile essentiellement.

Question

- Quelles caractéristiques sont applicables aux batteries à circulation?
 - A. Le stockage des couples électrochimiques se fait à l'extérieur de la batterie.
 - B. Elles ont un rendement supérieur à 80%.
 - C. Leurs coûts moyens sont de l'ordre de 100000 \$/kWh.
 - D. Elles sont utilisées pour des puissances de quelques MW.
 - E. Elles sont utilisées pour des puissances de quelques watts.



ENR2020

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Les batteries électrochimiques
- Les batteries à circulation ou à flux
- Les supercondensateurs
- ***Cycle de vie***
- Conclusion

Cycle de vie

- Les batteries sont l'une des sources d'accumulation dans l'environnement de certains métaux lourds et d'autres produits chimiques pouvant mener à la contamination du sol et la pollution de l'eau;
- Maladie du saturnisme : intoxication aiguë ou chronique par le plomb;
- Question de la disponibilité de la ressource et de l'exploitation à outrance de certains sites de matière première (voir le module 9 – *Énergies non renouvelables*).

Cycle de vie

- Recyclage des batteries au Plomb
 - On recycle ces dernières en les passant à la meule, neutralisant l'acide et séparant les polymères du plomb. Le matériel récupéré peut alors être utilisé dans la construction de nouvelles batteries, notamment.
 - Dans certains États américains et certaines provinces canadiennes, les batteries au plomb sont consignées.
- Recyclage des batteries lithium-ion
 - Des partenariats ont été noués entre les constructeurs et les spécialistes du recyclage pour recycler les batteries lithium-ion des voitures électriques et hybrides rechargeables.
- En Europe, il y a l'obligation (législative) de démontrer qu'une filière de recyclage existe avant de commercialiser un tel système

Comparaison et perspectives

Parameter	Sodium-Sulfur Battery		Li-Ion Battery		Lead Acid		Sodium Metal Halide		Zinc-Hybrid Cathode		Redox Flow Battery	
	2018	2025	2018	2025	2018	2025	2018	2025	2018	2025	2018	2025
	Capital Cost – Energy Capacity (\$/kWh)	400-1,000 661	(300-675) (465)	223-323 271	(156-203) (189)	120-291 260	(102-247) (220)	520-1,000 700	(364-630) (482)	265-265 265	(179-199) (192)	435-952 555
Power Conversion System (PCS) (\$/kW)	230-470 350	(184-329) (211)	230-470 288	(184-329) (211)	230-470 350	(184-329) (211)	230-470 350	(184-329) (211)	230-470 350	(184-329) (211)	230-470 350	(184-329) (211)
Balance of Plant (BOP) (\$/kW)	80-120 100	(75-115) (95)	80-120 100	(75-115) (95)	80-120 100	(75-115) (95)	80-120 100	(75-115) (95)	80-120 100	(75-115) (95)	80-120 100	(75-115) (95)
Construction and Commissioning (\$/kWh)	121-145 133	(115-138) (127)	92-110 101	(87-105) (96)	160-192 176	(152-182) (167)	105-126 115	(100-119) (110)	157-188 173	(149-179) (164)	173-207 190	(164-197) (180)
Total Project Cost (\$/kW)	2,394-5,170 3,626	(1,919-3,696) (2,674)	1,570-2,322 1,876	(1,231-1,676) (1,446)	1,430-2,522 2,194	(1,275-2,160) (1,854)	2,810-5,094 3,710	(2,115-3,440) (2,674)	1,998-2,402 2,202	(1,571-1,956) (1,730)	2,742-5,226 3,430	(2,219-3,804) (2,598)
Total Project Cost (\$/kWh)	599-1,293 907	(480-924) (669)	393-581 469	(308-419) (362)	358-631 549	(319-540) (464)	703-1,274 928	(529-860) (669)	500-601 551	(393-489) (433)	686-1,307 858	(555-951) (650)
O&M Fixed (\$/kW-yr)	10	(8)	10	(8)	10	(8)	10	(8)	10	(8)	10	(8)
O&M Variable (cents/kWh)	0.03		0.03		0.03		0.03		0.03		0.03	
System Round-Trip Efficiency (RTE)	0.75		0.86		0.72		0.83		0.72		0.675	(0.7)
Annual RTE Degradation Factor	0.34%		0.50%		5.40%		0.35%		1.50%		0.40%	
Response Time (limited by PCS)	Energy Storage Technology and Cost Characterization Report, DOE, 2019											
Cycles at 80% Depth of Discharge	4,000		3,500		900		3,500		3,500		10,000	
Life (Years)	13.5		10		2.6	(3)	12.5		10		15	
MRL	9	(10)	9	(10)	9	(10)	7	(9)	6	(8)	8	(9)
TRL	8	(9)	8	(9)	8	(9)	6	(8)	5	(7)	7	(8)

(a) An E/P ratio of 4 hours was used for battery technologies when calculating total costs.
MRL = manufacturing readiness level; O&M = operations and maintenance; TRL = technology readiness level.

Plan de la présentation

- Introduction et objectifs de la capsule
- Les batteries électrochimiques
- Les batteries à circulation ou à flux
- Les supercondensateurs
- Cycle de vie
- ***Conclusion***

Conclusion

- L'invention de la batterie électrochimique s'est faite lors de la caractérisation de l'électricité;
- La batterie au plomb/acide demeure une référence technologique mondiale. Aujourd'hui la technologie lithium-ion prédomine pour le domaine de l'électronique de petite puissance;
- Bien qu'ayant des caractéristiques énergétiques et économiques intéressantes, une batterie électrochimique possède une durée de vie relativement courte face à d'autres moyens de stockage et un impact environnemental assez élevé.

Conclusion

- Les questions du recyclage, de la disponibilité de la ressource et de l'exploitation des matières premières sont de prime importance (voir le module 9 – *Énergies non renouvelables*);
- Les batteries à circulation paraissent alors régler le problème de la durée de vie tout en offrant de nouveaux avantages énergétiques. Mais ces technologies demeurent chères et peu répandues à ce jour;
- Enfin, les supercondensateurs, qui utilisent du stockage électrostatique, servent à du stockage court terme de l'énergie car l'autodécharge d'un tel système est très rapide.

Bibliographie/médiagraphie

- Une feuille résumé est disponible dans le répertoire « Documentation » du site Moodle
- Le résumé indique clairement:
 - La documentation obligatoire. Les références qu'il faut étudier pour préparer les tests formatifs et le quiz sommatif ainsi que l'examen final.
 - La documentation facultative. Pour les gens désirant pousser plus loin leur réflexion et leurs connaissances.

Bibliographie/médiagraphie

- <https://exed.polytechnique.edu/fr/formations/32537/batteries-et-stockage-electrochimique-de-l-electricite>
- <https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement-2015-2-page-67.htm#>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique
- <https://www.youtube.com/watch?v=rLpW0wjhX-8>
- https://www.inter-mines.org/global/gene/link.php?doc_id=1012&fg=1
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Tesla_Model_S
- <https://www.slashgear.com/tesla-model-s-model-x-get-free-unlimited-charging-only-for-new-buyers-04586186/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Batterie_d%27accumulateurs
- <https://www.batterie-solaire.com/PBCPPlayer.asp?ID=463386>

- https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_alcaline#Historique
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_Leclanch%C3%A9
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_%C3%A9lectrique#Par_technologie
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique#Diff%C3%A9rentes_techniques
- https://sti2d.ecolelamache.org/partie_5_stockage_de_lenergie_electrique.html
- https://www.pedagogie.ac-nantes.fr/medias/fichier/stockageenergie_1381954627432.PDF
- <https://www.ademe.fr/expertises/energies-renouvelables-enr-production-reseaux-stockage/passer-a-laction/vecteur-hydrogene>

- https://www.socomec.com/range-power-conversion-system-storage_en.html?product=/power-conversion-system-sunsys-pcs2_en.html&view=technical#technical



Merci de votre attention !

Si vous avez des questions à formuler, veuillez les poser par écrit et spécifier le nom et le numéro de la présentation. Nous vous répondrons le plus rapidement possible.

Période de questions

