

Les batteries redox pour le stockage d'énergie

Autor(en): **Amstutz, V. / Toghil, K. E. / Comninellis, Ch.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **103 (2012)**

Heft 10

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-857347>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Les batteries redox pour le stockage d'énergie

Des applications conventionnelles à la production d'hydrogène

Le stockage de l'énergie est un élément-clé pour l'intégration des énergies renouvelables dans le mix électrique. Parmi les technologies électrochimiques, les batteries redox offrent des avantages particulièrement intéressants pour le stockage intermittent. Elles commencent d'ailleurs à être commercialisées. Cet article présente, d'une part, leur principe, leurs caractéristiques essentielles et leurs applications et, d'autre part, une variante innovante permettant la production d'hydrogène.

V. Amstutz, K.E. Toghil, Ch. Comninellis, H.H. Girault

L'intégration des sources d'énergie renouvelable, telles que les éoliennes et les panneaux photovoltaïques, est un vrai défi pour les producteurs d'énergie. Tributaires des conditions météorologiques, celles-ci ne permettent pas de prévoir la quantité d'énergie qui sera produite à chaque instant. De plus, elles sont variables, contrairement à l'énergie d'origine nucléaire par exemple, ce qui rend nettement plus difficile leur intégration à grande échelle.

Actuellement, dans des pays comme l'Allemagne, le Portugal ou l'Italie, ces sources d'énergie doivent être interrompues lors d'une production trop intensive. Ceci est représentatif du système électrique actuel au sein duquel la production d'électricité est essentiellement simultanée à la consommation d'énergie à tout instant. Pour sortir de ce schéma d'interdépendance et permettre ainsi l'intégration des sources d'énergie variables et imprévisibles, la solution la plus évidente est le stockage d'énergie.

Stockage électrochimique

Deux principales options existent : le stockage d'énergie à grande échelle, centralisé, ou à petite échelle au sein du site de production. En Suisse, le surplus d'énergie est principalement pris en charge de manière centralisée par les systèmes hydroélectriques. Ceux-ci offrent une grande capacité de stockage et s'appliquent parfaitement à la régulation du réseau électrique.

Cependant, dans les pays où la configuration géographique n'est pas appropriée à la construction de systèmes hydroélectriques, des moyens de stockage à grande échelle alternatifs sont nécessaires. Parmi ces derniers, les systèmes électrochimiques (ou accumulateurs) offrent les avantages suivants :

- leur flexibilité (capacité, puissance, emplacement, applications).
- leur efficacité de cycle élevée.

- leur simplicité d'installation.
- leur maintenance aisée.

Avec environ 200 installations dans le monde et une puissance totale installée de 315 MW, les batteries sodium-sulfure (NaS) sont les plus avancées pour les applications de stockage d'énergie à grande échelle. Les batteries Li-ion sont, elles aussi, développées pour des applications à grande échelle mais présentent actuellement des coûts trop élevés. Les batteries redox représentent quant à elles une alternative très largement étudiée. Elles ont en effet le grand avantage de permettre le découplage entre leur capacité de stockage et leur puissance. De plus, elles semblent idéales pour le stockage direct d'énergie variable puisqu'elles ne paraissent pas être affectées par des cycles partiels de charge et de décharge et peuvent être utilisées à température et pression ambiante [1-3].

Description d'une batterie redox

De manière générale, un accumulateur permet la conversion d'énergie électrique en énergie chimique grâce à la

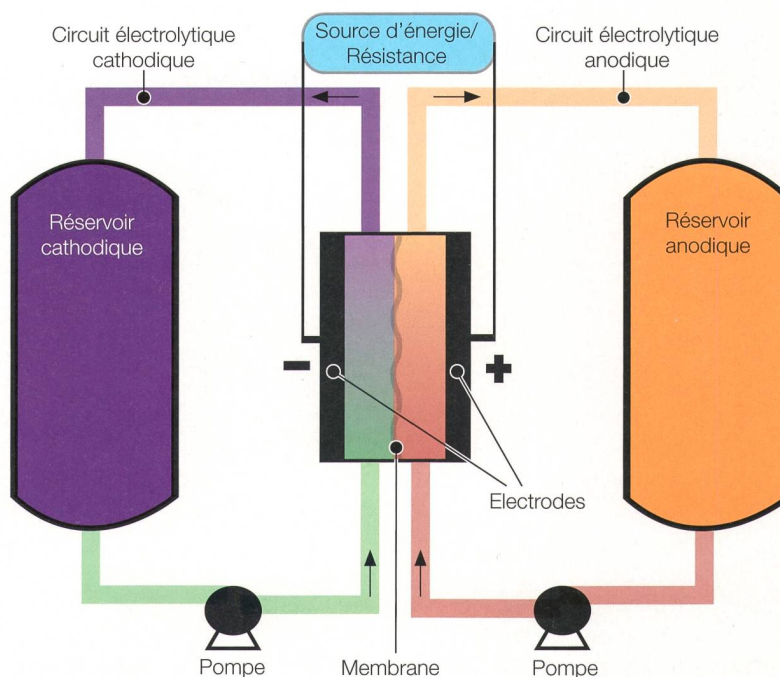


Figure 1 Schéma général d'une batterie redox.

combinaison de deux demi-réactions électrochimiques simultanées séparées. Durant la phase de charge, la source d'énergie contraint une demi-réaction de réduction (à la cathode) et d'oxydation (à l'anode) à prendre place. Les deux espèces électrochimiques produites sont dans un état moins stable, plus haut en énergie, qu'avant la réaction. Lors de la décharge, celles-ci sont remises en contact via un circuit électrique externe et retournent de ce fait spontanément à leur état plus stable suite à un transfert d'électrons, ce qui permet de récupérer l'énergie emmagasinée.

Une batterie redox (figure 1) se compose principalement d'une cellule électrolytique et de deux réservoirs de stockage abritant chacun une solution électrolytique (électrolyte) distincte. Ces dernières sont généralement des solutions aqueuses fortement acides (électrolyte support) concentrées en espèces électro-actives sous forme de sels dissous.

Fonctionnement

Le fonctionnement d'une batterie redox repose sur la circulation des deux électrolytes entre leur réservoir respectif et la cellule électrolytique centrale. Cette dernière (figure 2) est séparée par le biais d'une membrane échangeuse d'ions en deux demi-cellules : la chambre cathodique et la chambre anodique. Les réac-

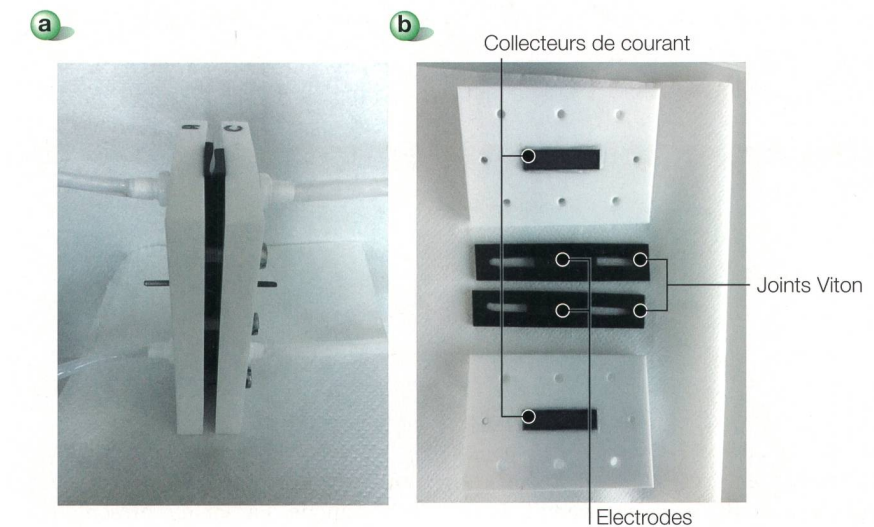


Figure 2 (a) Cellule électrolytique utilisée dans le laboratoire de l'EPFL. (b) Deux plaques en Téflon permettent de maintenir ensemble les collecteurs de courant (graphite), les électrodes (feutre de graphite) placées au centre des entretoises (joints Viton) et la membrane (non représentée).

tions électrochimiques (figure 3) prennent place à la surface des deux électrodes situées respectivement dans la chambre cathodique (cathode) et dans la chambre anodique (anode). Ces deux électrodes sont connectées à une source d'énergie pendant la charge et à une résistance électrique (ou le réseau électrique) pendant la décharge.

Le couple redox compris dans chaque électrolyte subit les réactions suivantes : lors de la phase de charge, la cathode

réduit l'oxydant O_c en réducteur R_c tandis qu'à l'anode, les électrons sont arrachés au réducteur R_a qui devient ainsi l'oxydant O_a . Durant la décharge, les deux réactions inverses interviennent spontanément.

Par définition, la cathode est le siège de la réduction tandis que l'anode est associée à l'oxydation. Durant la phase de charge, le pôle positif est associé à l'anode ; il devient la cathode pendant la phase de décharge. L'inverse est valable pour le pôle négatif. La polarité respective de chaque électrode reste constante pendant tout le cycle (voir le schéma de la figure 3). A noter que pour les batteries redox, les termes « anodique » et « cathodique » se réfèrent toujours à la phase de charge (par exemple dans l'expression « électrolyte anodique »).

Les électrodes

Les électrodes sont généralement basées sur des matériaux carbonés, tels que du feutre de graphite ou de carbone, du papier carbone ou encore des électrodes composites polymère-particule de carbone. Les avantages principaux de ce type de matériaux sont leur prix, leur grande aire de surface, ainsi que leur faible réactivité vis-à-vis de l'électrolyte support et du solvant (large fenêtre de polarisation) [4].

Néanmoins, ces matériaux présentent à long terme une stabilité limitée à l'anode. En effet, leur surface est susceptible à l'oxydation (groupe COH, COOH) et finit par se corroder lorsque les atomes de carbone sont totalement

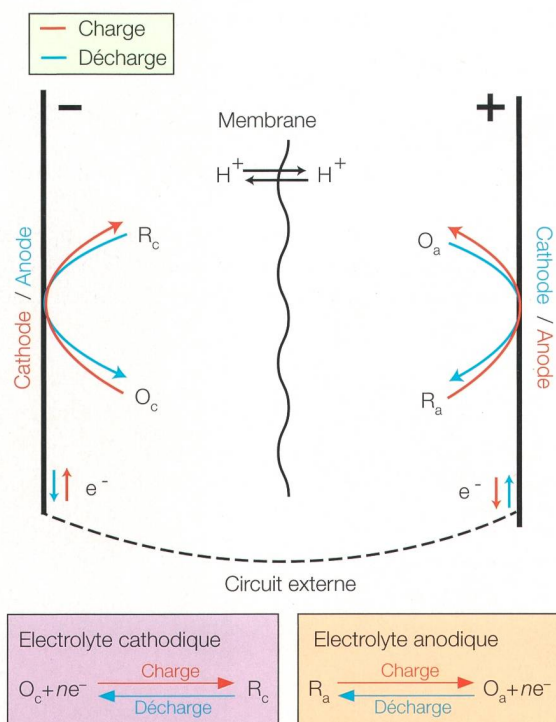
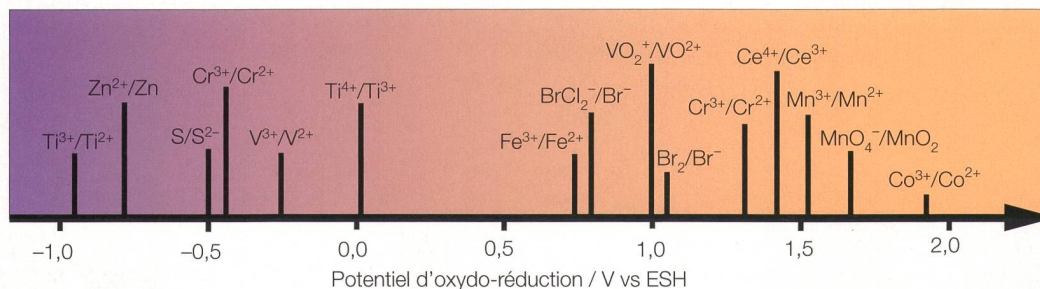


Figure 3 Réactions électrochimiques à la surface des électrodes de la cellule électrolytique centrale.

Figure 4 Potentiels d'oxydo-réduction des couples redox les plus étudiés pour les batteries redox.



oxydés sous forme de CO₂. Ceci peut se passer notamment lors d'une surcharge ou d'une décharge profonde de la batterie, lorsque les médiateurs ont été totalement convertis et que seul le solvant (généralement l'eau) est réduit à la cathode et oxydé à l'anode [5].

La membrane

La membrane échangeuse d'ions peut être échangeuse de protons ou d'anions, amphotère¹⁾, ou encore neutre. Les caractéristiques essentielles d'une membrane sont sa sélectivité aux divers ions présents dans les deux solutions électrolytiques, sa conductivité pour l'ion responsable du transport de courant, sa stabilité chimique en conditions très acides et hautement oxydantes, ainsi que son coût [6].

Dans la grande majorité des systèmes redox, une membrane échangeuse de protons, et plus précisément une membrane Nafion (Dupont, USA), est utilisée. Cette dernière montre une bonne conductivité pour les protons et une résistance chimique relativement bonne. Néanmoins, elle est trop perméable à certains cations utilisés dans les batteries redox et est parfois reconnue comme un obstacle pour la commercialisation de ces dernières en raison de son prix excessif.

De nombreuses recherches portent actuellement sur de nouveaux types de membranes, mais leur stabilité chimique à long terme dans des conditions chimiques extrêmes doit encore être améliorée [6,7].

Les couples redox

La sélection des deux couples redox est déterminante pour les performances de la batterie. C'est pourquoi chaque batterie redox est désignée par les couples redox sur lesquels elle se base (par exemple la batterie redox brome-polysulfure). Il existe, d'une part, les batteries redox conventionnelles utilisant deux électrolytes liquides et, d'autre part, les

batteries redox hybrides impliquant au moins une espèce électro-active sous forme solide ou gazeuse.

Une grande variété de couples redox ont été étudiés, tant pour la cathode que pour l'anode. La figure 4 présente leurs potentiels d'oxydo-réduction, exprimés par rapport à l'électrode standard à hydrogène (ESH) dont le potentiel est défini à 0 V.

La sélection d'un couple redox se base principalement sur les critères suivants :

- une bonne solubilité et stabilité chimique de l'oxydant et du réducteur.
- le potentiel auquel la réaction électrochimique a lieu sur le type d'électrode choisi.
- une cinétique électrochimique réversible ou quasi-réversible.
- un coût raisonnable.

Les batteries redox vanadium-vanadium, brome-polysulfure, zinc-cérium et chrome-fer font partie des types de batteries redox les plus étudiés. Ces dernières ont toutes des voltages compris entre 1,2 V et 2,4 V.

Caractéristiques d'une batterie redox

Les batteries redox sont principalement caractérisées par leur voltage, leur courant et leur puissance durant la phase de décharge. Par ailleurs, leur efficacité peut être décrite par leurs efficacités coulombique (EC), de voltage (EV) et énergétique (EE), qui sont définies ainsi :

$$EC = \frac{i_{décharge}}{i_{charge}} \cdot 100\%$$

$$EV = \frac{\Delta E_{décharge}}{\Delta E_{charge}} \cdot 100\%$$

$$EE = EC \cdot EV \cdot 100\%$$

où *i*_{charge} et *i*_{décharge} sont les courants obtenus pendant la phase de charge et de décharge et Δ*E*_{charge} et Δ*E*_{décharge} les voltages de la cellule (ou différences de potentiels entre les deux électrodes) pendant la phase de charge et de décharge.

D'autres paramètres, tels que le temps de service, la capacité de la batterie (la charge totale qu'elle peut libérer), le temps de décharge et la densité d'énergie, permettent aussi de comparer les batteries au niveau de leurs applications. Le tableau présente les paramètres essentiels de la plus étudiée des batteries redox : la batterie vanadium-vanadium, basée sur les couples redox V³⁺/V²⁺ (cathode) et VO₂⁺/VO₂⁺ (anode).

Avantages

Les batteries redox présentent de nombreux avantages :

- Elles sont particulièrement flexibles et polyvalentes, peuvent se décliner en plusieurs tailles, ont un long temps de vie (plus de 10 ans) et un coût par kW relativement bas comparé à d'autres batteries [3,8].

Tableau
Performances générales des batteries redox vanadium-vanadium.

Puissance	1 – 100 MW	[3,8]
Densité de courant (charge/décharge)	10 – 130 mA/cm ²	[3]
Potentiel en circuit ouvert (batterie 100% pleine)	1,5 V	[3]
Capacité de stockage	4 – 40 MWh	[8]
Efficacité coulombique	85 – 93 %	[1]
Efficacité de voltage	80 – 90 %	[1]
Efficacité énergétique	65 – 83 %	[3,8]
Temps de vie	> 10 000 cycles (> 10 ans)	[8]
Temps de décharge	1 – 20 h	[3]
Coût au kWh	750 – 830 \$/kWh	[8]

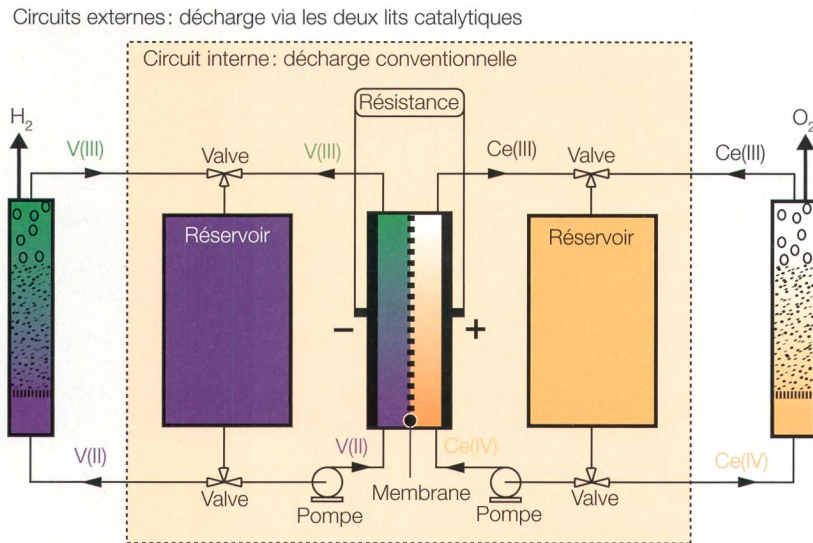


Figure 5 Schéma d'une batterie redox permettant la production directe d'hydrogène et d'oxygène.

- Elles montrent une bonne réactivité (temps de réaction de quelques ms) et un long temps de décharge (entre 1 et 20 h).
- Elles sont résistantes face aux micro-cycles²⁾.
- Contrairement aux autres moyens de stockage électrochimique, elles permettent la séparation entre la quantité d'énergie stockée et la puissance de la batterie, ce qui facilite grandement l'adaptation des batteries redox aux diverses applications du stockage d'énergie.

L'énergie emmagasinée par la batterie dépend de la taille des réservoirs, de la concentration des espèces actives et de la combinaison des deux couples redox utilisés. La puissance, elle, est reliée à la surface d'électrode utilisée et à la cinétique des deux réactions électrochimiques.

Limitations

Les batteries redox ont par contre une densité d'énergie (énergie disponible par unité de volume ou de masse) relativement faible, celle-ci étant notamment limitée par la solubilité des espèces électroactives dans le solvant. Elles nécessitent de ce fait de grands espaces pour leur installation à grande échelle. De plus, certaines batteries redox reposent sur des couples redox dont l'une ou les deux espèces sont oxydées par l'oxygène de l'air : elles requièrent donc des circuits parfaitement isolés de l'air.

Les batteries redox à plus grande échelle sont basées sur des empilements d'électrodes en parallèle et/ou en série. Les courants dérivatifs (passant d'une cellule à l'autre) représentent alors un obstacle qui n'est actuellement résolu que par

une augmentation du parcours de l'électrolyte. Par ailleurs, malgré tous les avantages qu'elles offrent, les batteries redox, comme la majorité des autres systèmes électrochimiques, manquent encore d'acceptabilité dans le secteur électrique principalement pour des raisons économiques et par manque d'expérience à long terme sur le terrain (prototypes).

Applications et commercialisation

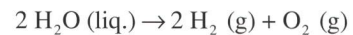
De par leur modularité et leur flexibilité, les batteries redox sont prometteuses pour le stockage d'énergie à plusieurs niveaux du réseau électrique. Premièrement, elles peuvent grandement contribuer à l'intégration des énergies renouvelables en permettant de stocker l'énergie produite directement sur le site de production. Grâce à leur réactivité élevée et leur modularité, elles peuvent également être utilisées comme systèmes ASI (alimentation sans interruption) auprès des consommateurs. Enfin, elles sont aussi envisagées comme système de stockage dans les endroits éloignés et comme moyen de stockage à grande échelle pour répondre aux pics de demande.

Deux types de batteries redox sont déjà commercialisés à travers le monde : les batteries redox vanadium-vanadium sont exploitées par Prudent Energy aux Etats-Unis et Cellstrom (Gildemeister) en Autriche dans l'ordre du kW (kWh) et récemment de quelques MW (MWh). Les batteries redox hybrides zinc-cérium sont, elles, produites par ZBB Energy Corporation et Redflow en Australie et Premium Power aux Etats-Unis.

Une batterie redox pour la production d'hydrogène

Afin de convertir l'énergie électrique en énergie chimique transportable, un nouveau système basé sur une batterie redox qui permet la production directe d'hydrogène est actuellement développé à l'EPFL. Lors de son utilisation, l'énergie chimique contenue dans la molécule d'hydrogène est reconvertie par exemple en énergie électrique grâce à une pile à combustible. Celle-ci utilise de l'hydrogène et de l'air et ne produit que de l'eau.

Actuellement, l'hydrogène est majoritairement produit par reformage de gaz naturel, de charbon et de combustibles fossiles. Ces technologies sont bon marché, mais elles produisent du CO₂ et sont basées sur des combustibles fossiles, ce qui n'est pas durable à long terme et à grande échelle. Une autre alternative pour produire de l'hydrogène consiste en l'électrolyse de l'eau selon la réaction globale :



Deux types d'électrolyseurs sont actuellement développés et commercialisés : les électrolyseurs en solution alcaline et les électrolyseurs PEM (proton-exchange membrane) en solution acide dans lesquels l'eau est directement convertie en hydrogène à la cathode et en oxygène à l'anode.

Principe

Dans le système proposé, une batterie redox permet le transfert de l'énergie électrique à des médiateurs électrochimiques au travers des réactions redox prenant place aux électrodes. L'énergie portée par ces médiateurs est ensuite convertie en énergie chimique grâce à deux réactions chimiques catalysées situées dans des circuits externes (figure 5).

Plus précisément, une batterie redox cérium-vanadium en milieu aqueux et acide est utilisée. Durant la phase de charge, elle fonctionne comme expliqué précédemment, produisant ainsi les espèces Ce(IV) à l'anode et V(II) à la cathode. Par contre, la phase de décharge n'est pas conventionnelle : chaque électrolyte passe en effet dans un circuit externe, au travers d'un lit catalytique composé de particules de catalyseur déposées sur un substrat. L'électrolyte anodique voit, au travers de la réaction catalysée, le Ce(IV) être reconverti en Ce(III) et la production, à partir de l'eau, d'oxygène sous forme de gaz qui peut

Figures: EPFL

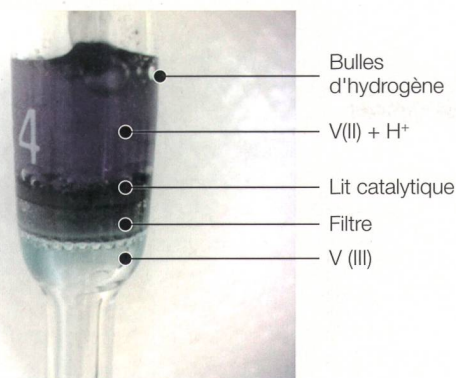


Figure 6 Lit catalytique permettant la production d'hydrogène dans l'un des prototypes de l'EPFL.

être récupéré. L'électrolyte cathodique, quant à lui, produit de l'hydrogène par réduction des protons contenus dans l'électrolyte grâce à la reconversion catalytique du V(II) en V(III) (figure 6). Chaque électrolyte est ensuite filtré afin de retenir les particules dans le lit catalytique et finalement redirigé vers son réservoir respectif. Il peut alors recommencer un cycle de charge de la batterie. Ce système permet aussi une décharge conventionnelle de la batterie si nécessaire (figure 5).

L'efficacité de ce système, dans l'optique de la production d'oxygène et d'hydrogène, est dépendante de la conversion de l'espèce active lors du passage au travers du lit catalytique et de la différence entre les potentiels des couples redox réagissant grâce aux catalyseurs (couple vanadium et hydrogène du côté cathodique et cérium et oxygène du côté anodique). Les catalyseurs utilisés sont basés sur des nanoparticules d'iridium pour la réaction de formation d'oxygène et sur des matériaux à base de molybdène pour la réaction de formation d'hydrogène. La réaction de formation d'hydrogène est très rapide et convertit totalement le V(II) en V(III) et ce, même avec une faible quantité de catalyseur.

Conclusions

Une multitude de batteries redox ont été étudiées et développées depuis environ 40 ans. Elles ont comme avantages leur flexibilité tant au niveau de la taille, de l'emplacement et de leur utilisation, leur coût relativement bas au kWh et leur résistance face aux micro-cycles. Elles sont par contre limitées par une faible densité d'énergie, par une contamination des deux électrolytes au travers de la membrane et par la nécessité d'être en absence d'oxygène (pour certaines d'entre elles). Ces caractéristiques

orientent notamment les batteries redox vers des applications telles que la régulation de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables intermittentes.

Une variante de la batterie redox permettant la production d'hydrogène grâce à des lits catalytiques augmente encore la flexibilité et la polyvalence de ce type de systèmes. Cette dernière peut s'utiliser soit conventionnellement et seuls les surplus d'énergie sont convertis en hydrogène et oxygène, soit comme moyen direct de production d'hydrogène à partir de l'eau. Dans les deux cas, ce système effectue une électrolyse indirecte de l'eau, par exemple à partir des sources d'énergie renouvelables.

Références

- [1] C. Ponce de León, A. Frías-Ferrer, J. González-García, D.A. Szánto and F.C. Walsh: Redox flow cells for energy conversion. *Journal of Power Sources* 160, pp 716-732, 2006.
- [2] A.Z. Weber, M.M. Mench, J.P. Meyers, P.N. Ross, J.T. Gostick and Q. Liu: Redox flow batteries: a review. *Journal of Applied Electrochemistry* 41, pp. 1137-1164, 2011.
- [3] M. Skyllas-Kazacos, M.H. Chakrabarti, S.A. Hajimolana, F.S. Mjalli and M. Saleem: *Progress in flow*

battery research and development. *Journal of the Electrochemical Society* 158(8), pp. R55-R79, 2011.

- [4] Z. González, C. Botas, P. Álvarez, S. Roldán, C. Blanco, R. Santamaría, M. Granda and R. Menéndez: Thermally reduced graphite oxide as positive electrode in vanadium redox flow batteries. *Carbon* 50, pp. 828-834, 2012.
- [5] H. Liu, Q. Xu, C. Yan and Y. Qiao: Corrosion behavior of a positive graphite electrode in vanadium redox flow battery. *Electrochimica Acta* 56, pp. 8783-8790, 2011.
- [6] X. Li, H. Zhang, Z. Mai, H. Zhang and I. Vankelecom: Ion exchange membranes for vanadium redox flow battery (VRB) applications. *Energy and Environmental Science* 4, p. 1147-1160, 2011.
- [7] B. Schwenzer, J. Zhang, S. Kim, L. Li, J. Liu and Z. Yang: Membrane development for vanadium redox flow batteries. *ChemSusChem* 4(10), pp. 1388-1406, 2011.
- [8] B. Dunn, H. Kamath and J.-M. Tarascon: Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science* 334, p.928, 2011.

Informations sur les auteurs

Véronique Amstutz a obtenu son Master en chimie moléculaire et biologique à l'EPFL. Elle y poursuit actuellement un doctorat dans le groupe du Prof. Hubert Girault.

EPFL-SB-ISIC-LEPA, 1015 Lausanne,
veronique.amstutz@epfl.ch

Kathryn Toghil a obtenu en 2011 sa thèse en électrochimie à l'Université d'Oxford, Angleterre. Elle effectue actuellement un post-doctorat dans le groupe du Prof. Hubert Girault, à l'EPFL.

EPFL-SB-ISIC-LEPA, 1015 Lausanne,
kathryn.toghil@epfl.ch

Christos Cominellis est depuis 2011 professeur émérite de génie électrochimique à l'EPFL.

EPFL-SB-SCGC-GE, CH J2 489, 1015 Lausanne,
christos.cominellis@epfl.ch

Hubert Girault est professeur de chimie physique et dirige le Laboratoire d'Électrochimie Physique et Analytique (LEPA) de l'EPFL.

EPFL-SB-ISIC-LEPA, 1015 Lausanne,
hubert.girault@epfl.ch

Les auteurs souhaitent tout particulièrement remercier EOS Holding qui soutient financièrement ce projet.

¹⁾ Une membrane amphotère possède à la fois des charges positives et négatives, ce qui permet un meilleur contrôle de la perméabilité respective des anions et des cations.

²⁾ Cycles faisant intervenir des phases de charge et/ou décharge incomplètes.

Zusammenfassung Energiespeicherung mit Redox-Batterien

Von konventionellen Anwendungen zur Wasserstoffherzeugung

Die Energiespeicherung stellt ein Schlüsselement bei der Integration erneuerbarer Energien in den Strommix dar. Bei den elektrochemischen Technologien bieten Redox-Batterien interessante Vorteile für die intermittierende Speicherung: Ihre Flexibilität sowohl im Hinblick auf die Grösse, die Einbaustelle als auch auf ihre Anwendung, ihr relativ geringer kWh-Preis und ihre Alterungsbeständigkeit bei Mikrozyklen. Sie sind übrigens bereits auf dem Markt. Dieser Artikel erläutert die Funktionsweise von Redox-Batterien und stellt ihre wichtigsten Merkmale und ihre Anwendung vor. Zusätzlich wird eine neue, an der EPFL entwickelte Variante präsentiert, die die Wasserstoffherzeugung mithilfe von Katalysatorbetten erlaubt, wodurch die Vielseitigkeit dieser Systeme noch erhöht wird. Letztere Methode kann entweder konventionell genutzt werden – nur die überschüssige Energie wird dabei in Wasserstoff und Sauerstoff umgewandelt – oder als direktes Mittel zur Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser eingesetzt werden.

CHE