

Les différentes technologies de stockage de l'électricité

D. Guyomard

Contact : Dominique.Guyomard@cnrs-imn.fr

10 MW - GW

→ Réseau électrique

| | Puissance cible / Cycle | Rendement | Investissement(€/kW) | Durée de vie (ans) | Maturité |
|--|----------------------------------|--|----------------------|--------------------|---------------------------------------|
| STEP Stations de pompage et de turbinage | Qq MW/GW | 0,7 | 1000-2000 | 40 | Mature |
| CAES classique Stockage à air comprimé souterrain | 300-500 MW Turbine gaz | 0,5 (perte thermique) | 700 | 25 | Mature |
| CAES 2ème génération | 300-400 MW Turbine gaz | 0,6 (+chaleur turbinage) | 400-500 | 30 | Horizon 2010 (à valider) |
| CAES adiabatique | 30-300 MW Turbine à vapeur | 0,75 +chaleur compression & turbinage) | 1000 (800 à 1200) | 30 | Horizon 2012-2015 (à expérimenter) |
| Thermique | Qq 100 MW/GW | 0,65 à 0,75 | 1000 ? | 30 | Horizon 2020 (stade R&D) |

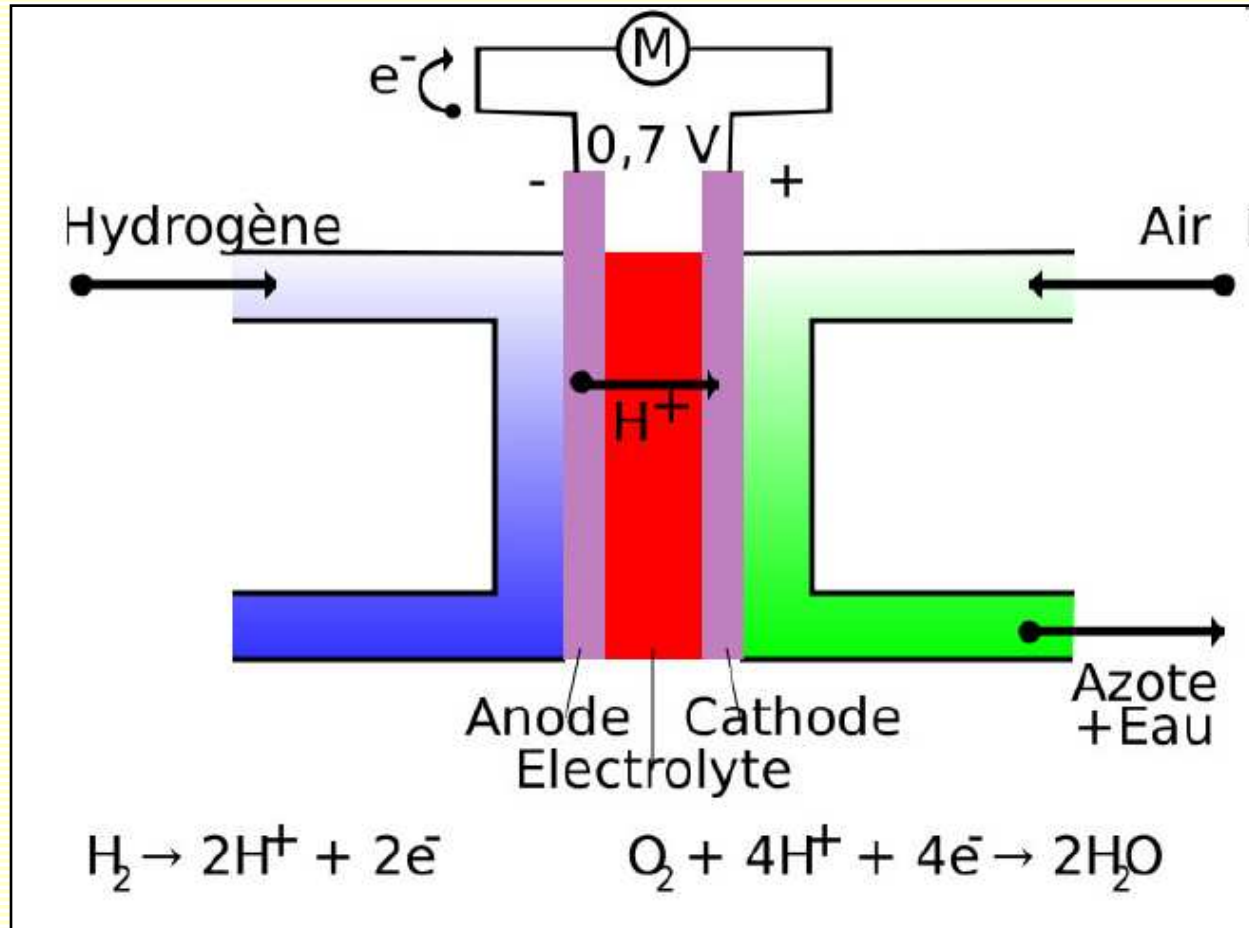
Source : M. Jacquemelle, EDF R&D, 2008

10 kW – 10 MW

→ Réseaux locaux, sites isolés

| | Puissance cible | Rendement | Investissement(€/kW) | Durée de vie (ans) | Maturité |
|---|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------------------|---------------------------|
| CAES avec réservoirs | Qq 1-10 MW | 0,6 | ≈ 1000 | 30 | A valider (2010) |
| Hydropneumatique | Qq 1-10 MW | 0,7 | ≈ 1000 | 30 | A développer (2015) |
| Batteries classiques (cycle qq minutes à plusieurs heures) | Qq 10 kW-MW | 0,7 | 500 à 1500 | 5 (3 à 7) 1500-2000 cycles | Mature |
| Batteries Redox Flow circulation | Qq MW | 0,75 | ≥3000 | 15-20 4000-5000 cycles | Mature + R&D d'innovation |
| Batteries NaS 320°C | Qq 1-10 MW | 0,8 | ≥3000 | 10-15 2500-3000 cycles | Mature |
| <i>Source : M. Jacquemelle, EDF R&D, 2008</i> | | | | | |
| Piles à Combustible H₂ | kW – 10 MW | kW – 10 MW | | | Développement |

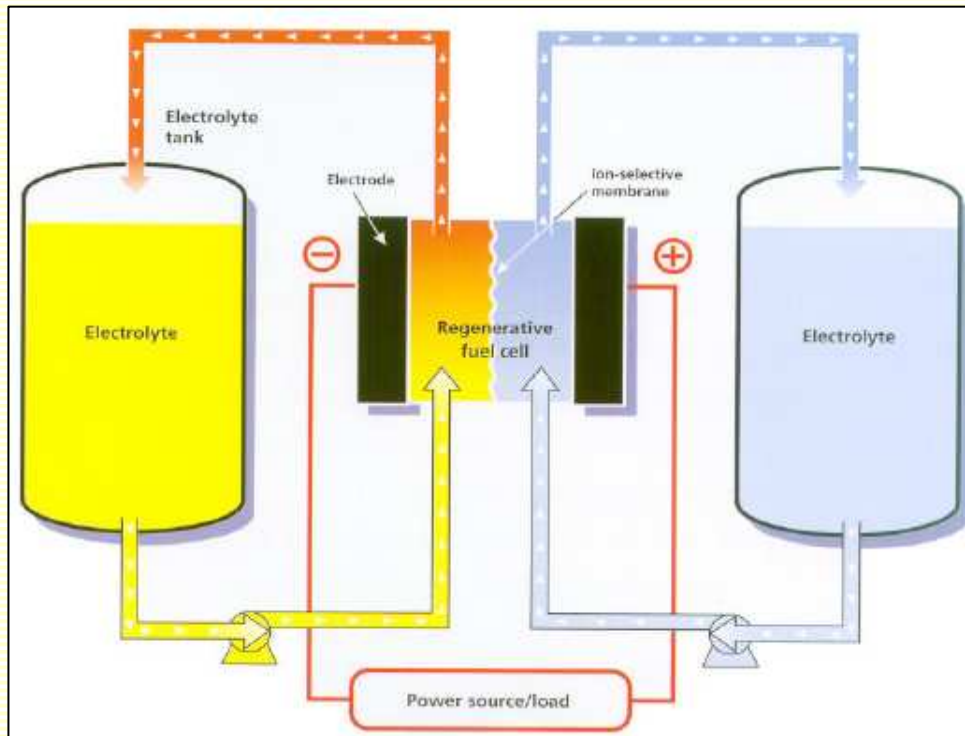
Principe de la pile à combustible



Piles à combustible : différents types et applications

| Description | Gaz/liquide à l'anode | Gaz à la cathode | Puissance | Température de fonctionnement | Maturité | Domaine |
|---|---|------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| AFC Alcaline | H ₂ | O ₂ | 10 à 100 kW | 60 °C à 90 °C | Commercialisé/ Développement | Portable, transport |
| DBFC Hydru de Bore | NaBH ₄ liquide | O ₂ | 250mW/cm ² | 20 °C à 80 °C | Développement | portable <20W |
| PEMFC – à membrane d'échange de protons | H ₂ | O ₂ | 0,1 à 500 kW | 60 °C à 100 °C | Commercialisé/ Développement | portable, transport, stationnaire |
| DMFC – méthanol | méthanol | O ₂ | mW à 100 kW | 90 °C à 120 °C | Commercialisé/ Développement | Portable, transport, stationnaire |
| PAFC acide phosphorique | H ₂ | O ₂ | jusqu'à 10 MW | environ 200 °C | Développement | transport, stationnaire |
| MCFC carbonate fondu | H ₂ , Méthane, Gaz de synthèse | O ₂ | jusqu'à 100 MW | environ 650 °C | Développement/ Mise sur le marché | stationnaire |
| PCFC céramique cond. proton | IMN | | | 500 °C | Développement | |
| SOFC oxyde solide | H ₂ , Méthane, Gaz de synthèse IMN | O ₂ | jusqu'à 100 MW | 800 °C à 1 050 °C | Développement | stationnaire |

Piles à circulation (stockage)



| Chemistry | Positive Electrode | Negative Electrode | V |
|--------------------------|---|---|------|
| a. Bromine - Polysulfide | $\text{Br}^{3-} + 2e^- \rightarrow 3\text{Br}^-$ | $2\text{S}_2^{2-} \rightarrow \text{S}_4^{2-} + 2e^-$ | 1.54 |
| b. Vanadium - Vanadium | $\text{VO}_2^+ + 2\text{H}^+ + e^- \rightarrow \text{VO}^{2+} + \text{H}_2\text{O}$ | $\text{V}^{2+} \rightarrow \text{V}^{3+} + e^-$ | 1.3 |
| c. Vanadium - Bromine | $\text{ClBr}_2^{2-} + 2e^- \rightarrow 2\text{Br}^- + \text{Cl}^-$ | $\text{VBr}_2 + \text{Br}^- \rightarrow \text{VBr}_3 + e^-$ | 1.0 |
| d. Iron - Chromium | $\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ | $\text{Cr}^{2+} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + e^-$ | 1.03 |
| e. Zinc - Bromine | $\text{Br}^{3-} + 3e^- \rightarrow 3\text{Br}^-$ | $\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$ | 1.75 |
| f. Zinc - Cerium | $\text{Zn}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Zn}$ | $\text{Ce}^{3+} \rightarrow \text{Ce}^{4+} + e^-$ | <2 |

10 kW – 10 MW

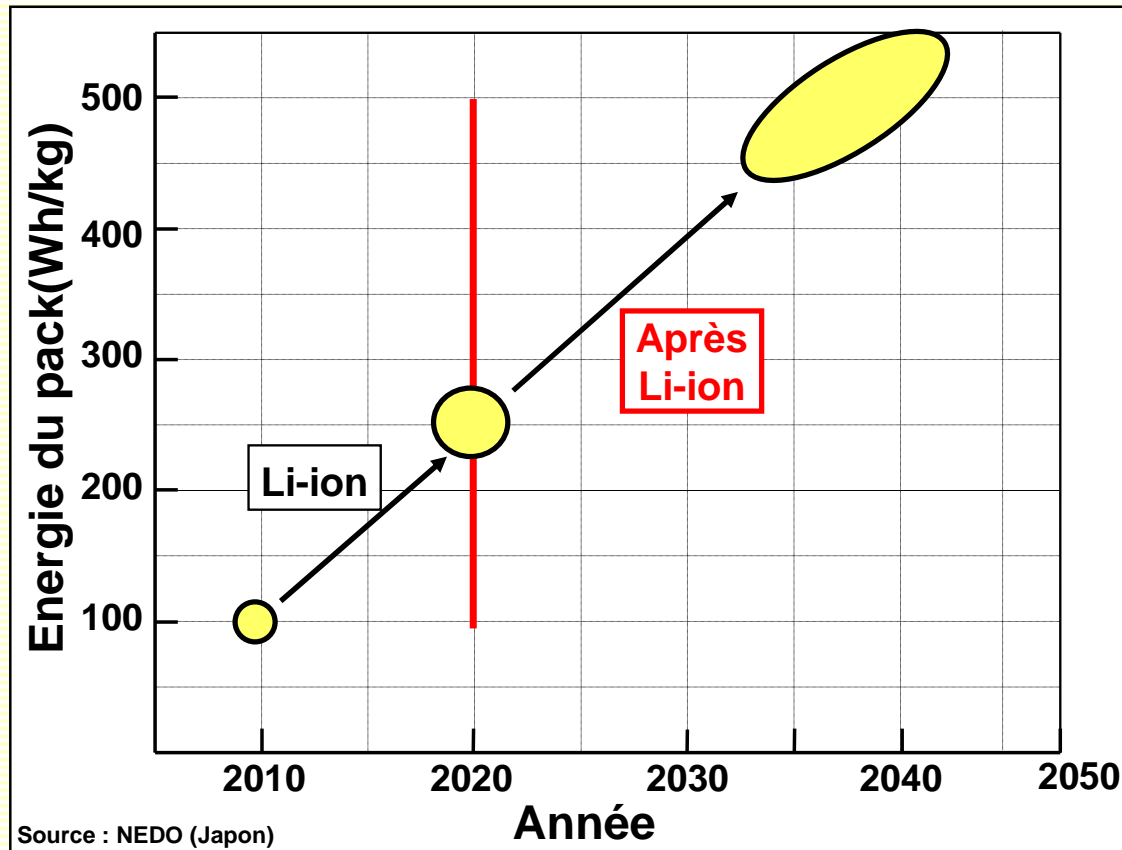
→ transports (camions, bus, voitures)

| Technologie | Rendement / cycle |
|--|------------------------------|
| <u>Batteries chaudes</u> Na-S (320°C) Zebra Na-NiCl ₂ (320°C) Li-FeS ₂ (450°C) | 80% |
| <u>Batteries ambiante</u> Pb Ni-Cd (industrielle) Zn-air Ni-HM Li | 85% |
| Volant d'inertie | 35% |
| Supercondensateurs (C-C) | 90% |
| H₂ - Piles à combustible | 70% |

Avantages et inconvénients

| Technologie | Avantages | Inconvénients |
|---|---|--|
| <u>Batteries chaudes</u> Na-S (320°C) Zebra Na-NiCl ₂ (320°C) Li-FeS ₂ (450°C) | Bonne énergie | Gestion thermique Peu de puissance Faible durée de vie |
| Zn-air | Très bonne énergie | Charge difficile Faible cyclabilité |
| Ni-HM | Bonne énergie Bonne cyclabilité Bonne puissance | Coût élevé Autodécharge |
| Lithium | Très bonne énergie Très bonne cyclabilité Forte puissance | Coût très élevé Sécurité packs |
| Supercondensateurs | TRES forte puissance Très bonne cyclabilité | Faible énergie |
| H ₂ - Piles à combustible | Excellente autonomie | Coût trop élevé Durée de vie |

Le futur



| | | |
|----------------|-----|-----------|
| Zn air | X2, | 2015 |
| Lithium soufre | IMN | 2020 |
| Lithium air | X5, | 2020 |
| Na-ion | IMN | / 2, 2020 |
| ??? | X7, | 2050 |