

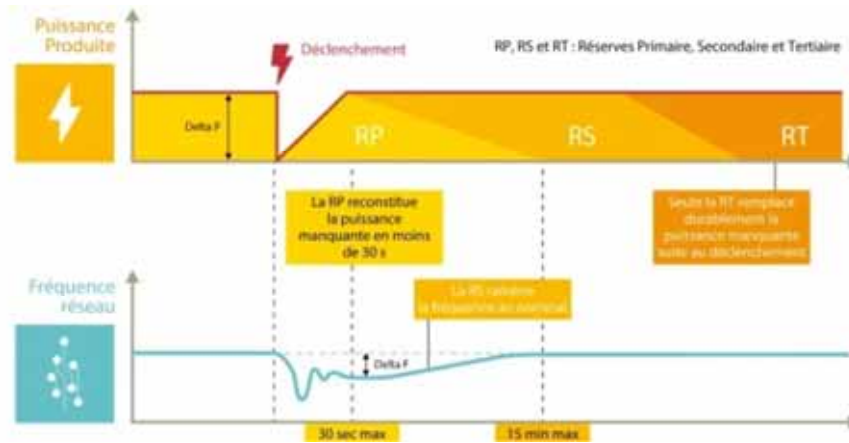
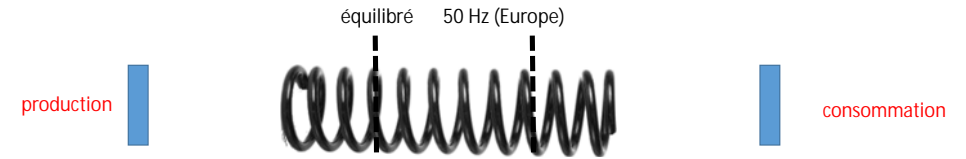


Stockage stationnaire de longue durée : une opportunité pour de nouvelles chimies de batteries

Philippe Stevens
EDF Lab Renardières

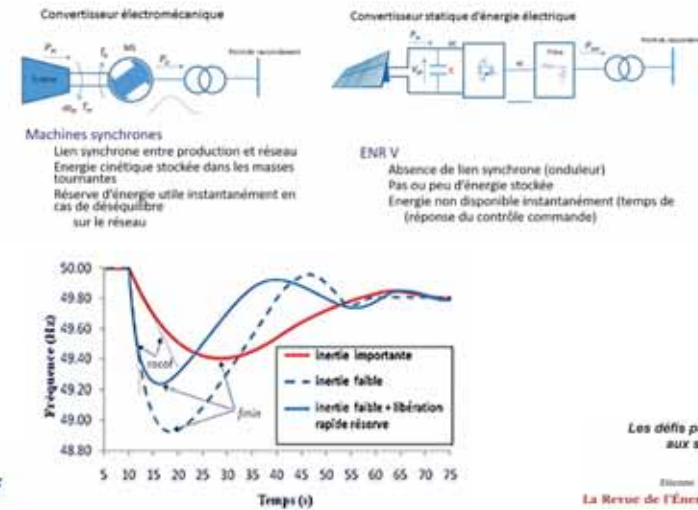


Équilibre production-consommation et fréquence

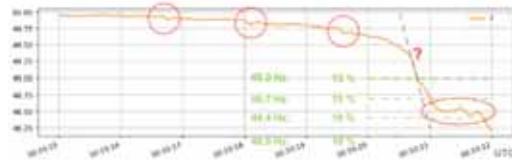
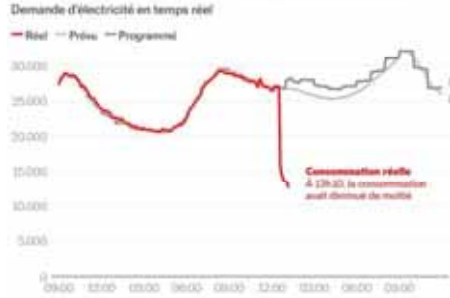


Source : CRE

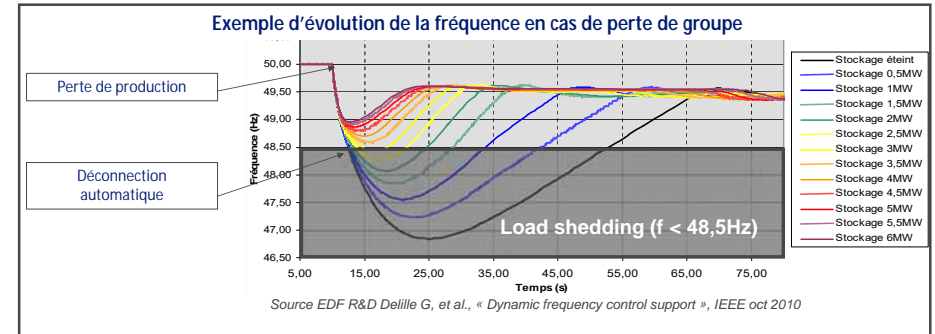
Évolution de la fréquence suite à un incident en fonction de l'inertie du système



Voici comment l'électricité a chuté à l'échelle nationale



Exemple d'évolution de la fréquence en cas de perte de groupe



Stockage 30 minutes

Mc Henry Storage – Li-ion

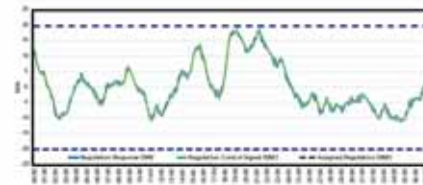


McHENRY STORAGE PROJECT • ILLINOIS

- 20 MW stand-alone storage
- Balancing function on the PJM network
- Participating in primary control PJM market
- Reg-D resource in PJM's frequency response market



2015



20 MW- 8,5 MWh

25 mins - 2C



2018

LA TRIBUNE

Prix négatifs sur le marché de l'électricité : une fausse bonne nouvelle pour les consommateurs

Le nombre d'heures pendant lesquelles les prix étaient négatifs sur les marchés européens de l'électricité a presque doublé en un an. Un phénomène qui pourrait rendre davantage pour les consommateurs français... mais

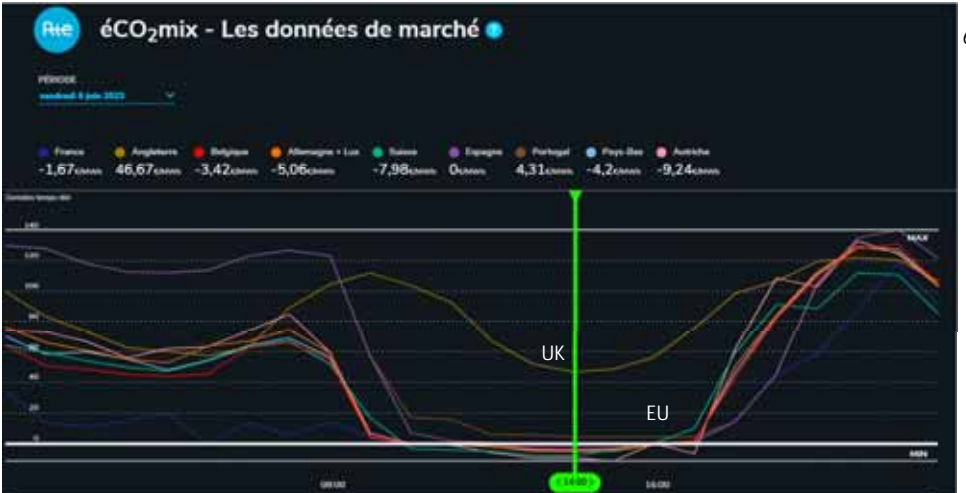
Electricité : l'ère des prix négatifs commence

Lundi 1er avril, les prix de l'électricité ont passé au négatif en France, en raison d'une offre excédentaire. Mais ce phénomène n'est pas forcément une bonne nouvelle pour le consommateur, et met en lumière la nécessité de repenser les mécanismes de marché et d'encourager la flexibilité de la demande.

LA TRIBUNE

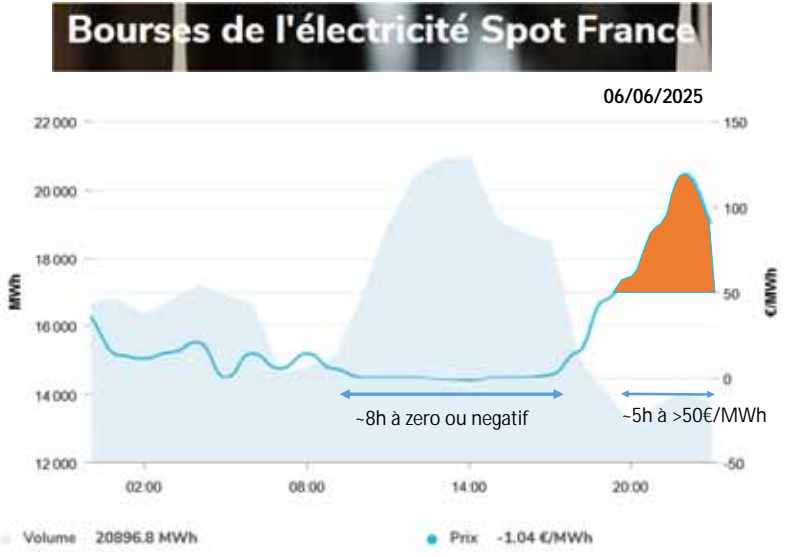
La France produit trop d'électricité, au risque de faire sauter la banque

Dans un contexte marqué par une offre excédentaire de production d'électricité, RTE, l'opérateur chargé d'équilibrer l'offre et la demande de courant, doit savoir gérer une situation inédite : un excédent de production.

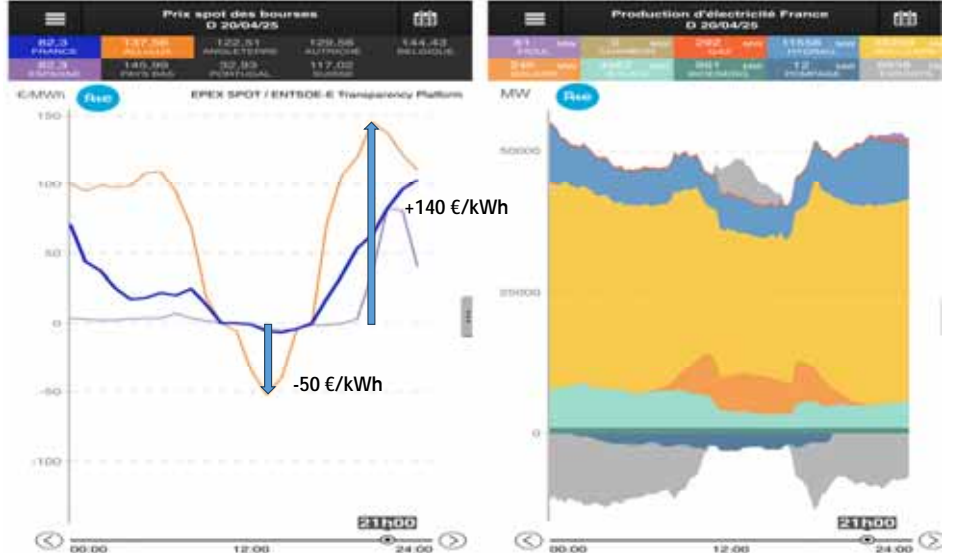



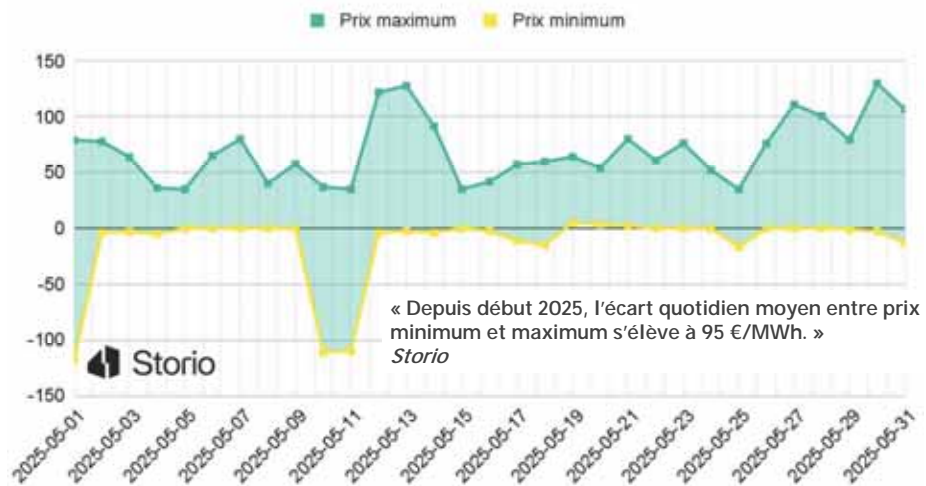
6 juin 2025

Source : <https://www.rte-france.com/eco2mix/les-donnees-de-marche#>

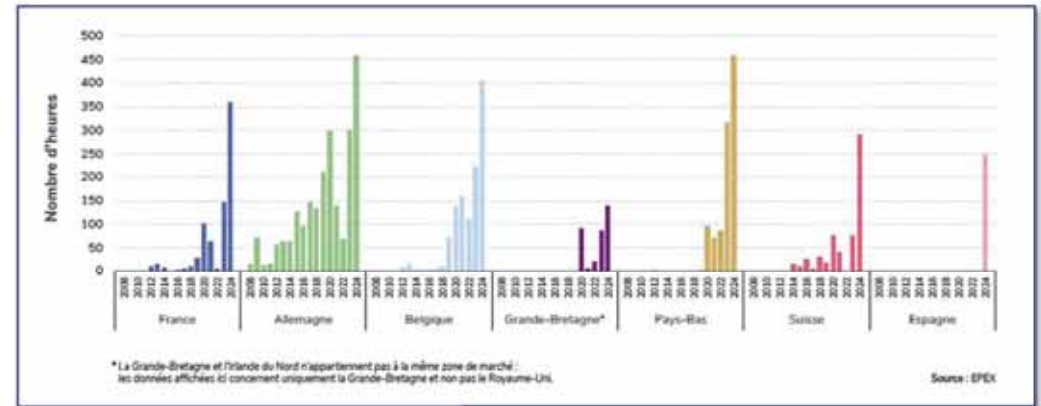


Source : RTE, Epex Spot SE et Nord Pool AS (<https://www.services-rte.com/>)

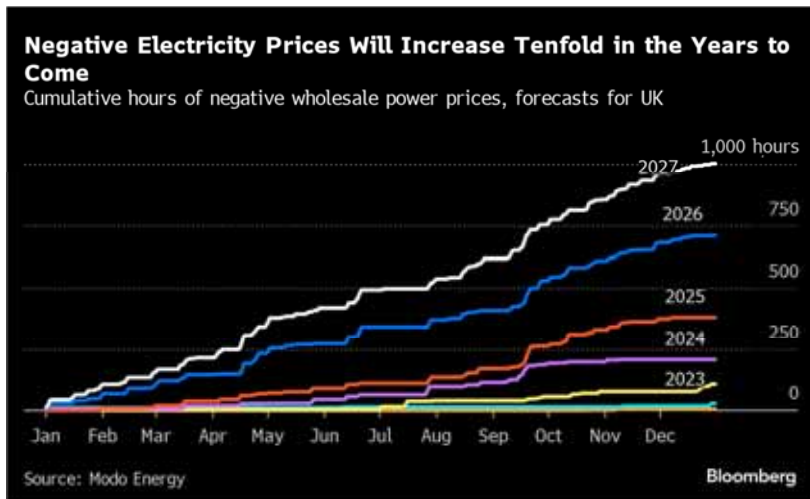




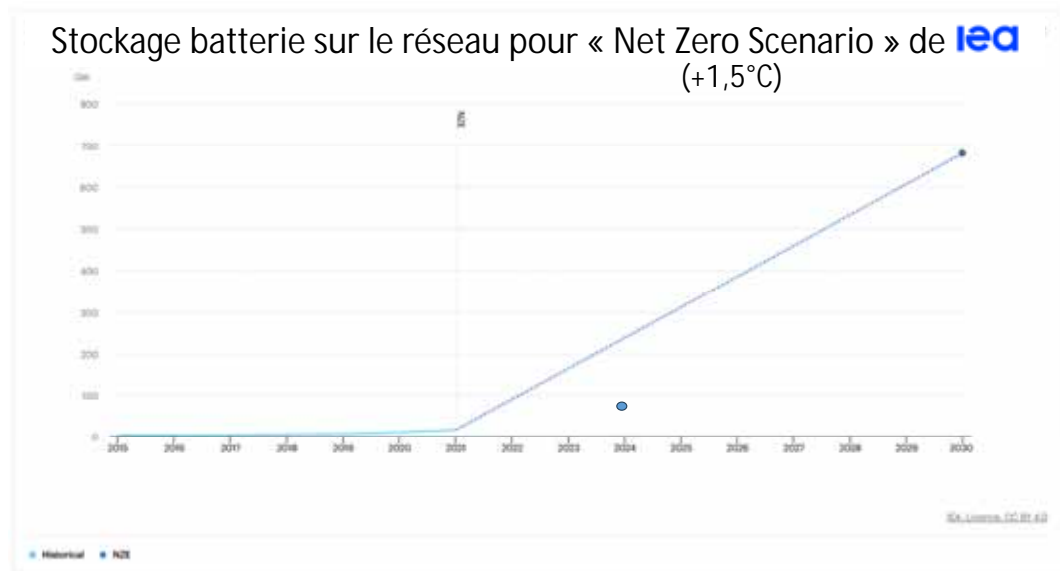
Nombre d'heures où le prix SPOT a été négatif



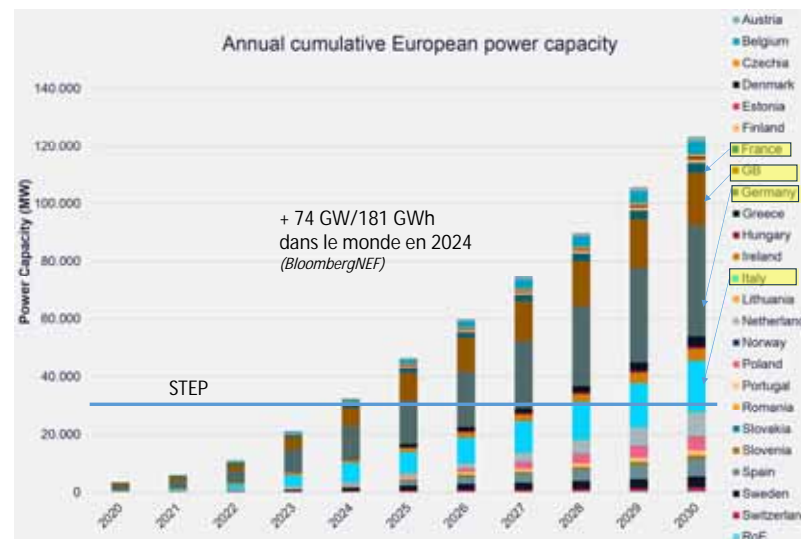
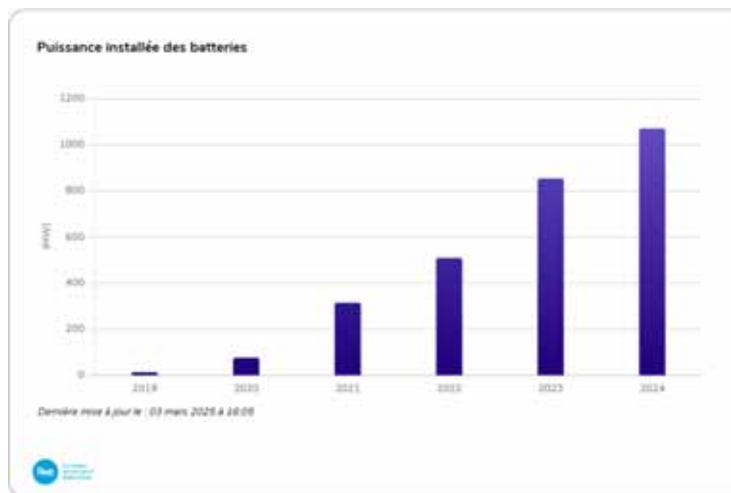
La tendance s'accélère



Stockage batterie sur le réseau pour « Net Zero Scenario » de Iea (+1,5°C)



France



Total STEP en Europe : -50 GW



Source : EUROSTAT 2023/vgbe energy e.V.

Stockage batterie vs STEP

- Pas de contrainte géographique
- Peut être installé dans des points faibles du réseaux, proche d'un utilisateur, un producteur, en autoconsommation, ...
- Beaucoup plus rapide à installer
- Modulaire, peut être augmenté facilement
- Bénéficie des évolutions technologiques, des baisses de prix

2018

LE PLAN
stockage
électrique

10 GW

de nouveaux moyens de stockage dans le monde d'ici à 2035

8 Mds €

d'investissement sur la période 2018-2035

Enjeux



+27 GW flexibilités
entre 2024 et 2035



Les durées de stockage augmentent

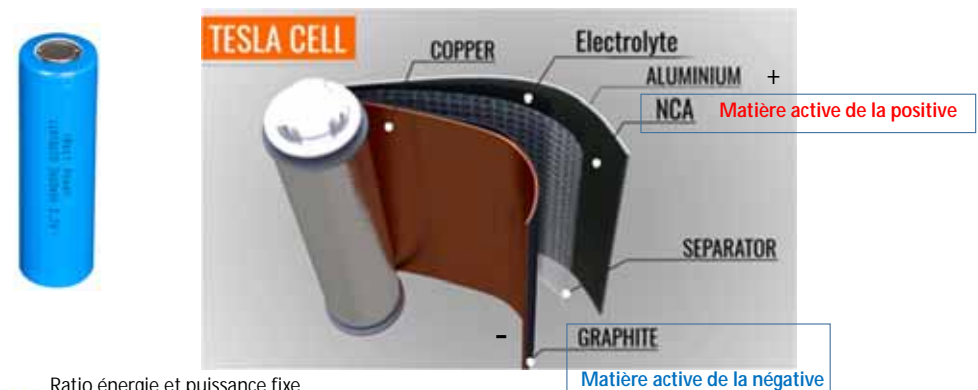


Usage du stockage stationnaire



Une batterie

- Quantité matière active = énergie kWh
- Surface d'électrode = puissance kW

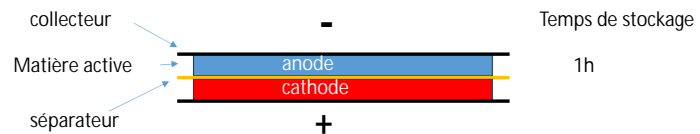


Ratio énergie et puissance fixe

Matière active de la négative



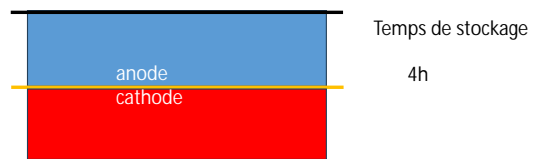
Temps de stockage



Temps de stockage



Temps de stockage



Conductivité ionique

Densité de courant 2 mA/cm²
Chute ohmique 20 mV (98% voltage efficiency)

	Distance entre electrodes
Aqueous electrolyte : $\sim 10^{-1} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ (S.cm ⁻¹)	1 cm
Organic electrolytes : $10^{-3} - 10^{-2} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	10-100 μm (Cellgard separator = 25 μm)
Polymer electrolytes : $10^{-7} - 10^{-3} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	< 10 μm
Inorganic solid electrolytes : $10^{-7} - 10^{-2} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	< 100 μm

- Aqueous electrolytes, tolerance on the mm scale
→ Organic electrolytes, tolerance on the μm scale



Plus d'énergie

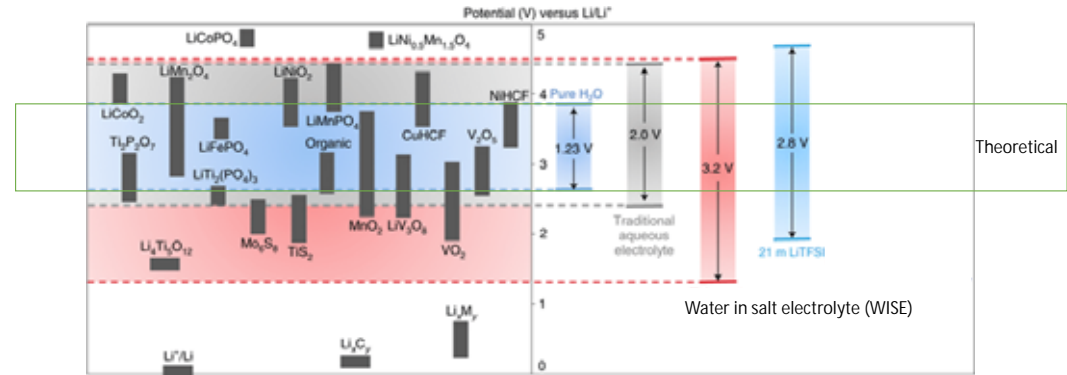
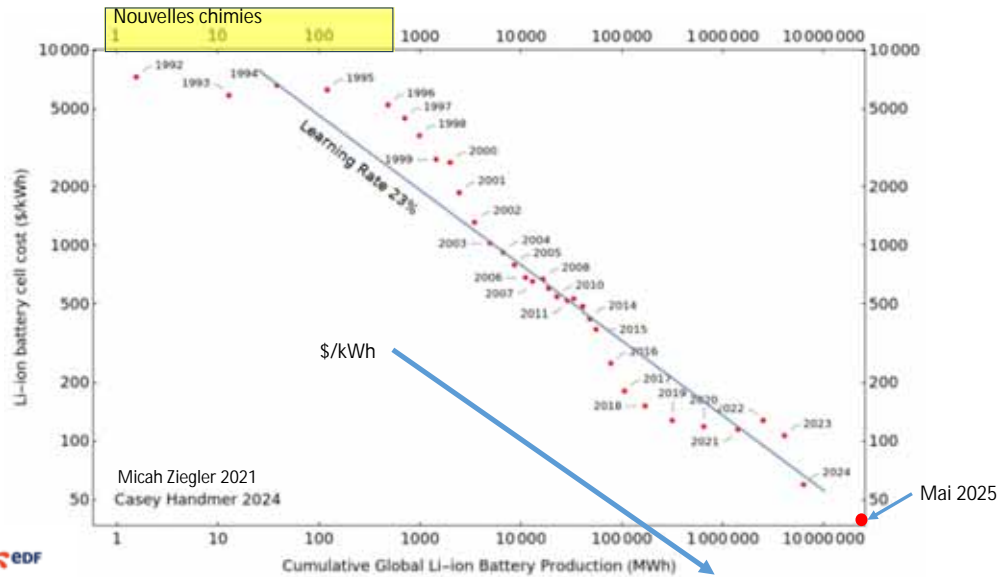


Ratio énergie et puissance fixe



Les batteries aqueuses

- Electrolyte aqueux non inflammable 👍
- Matière active abondante, moins onéreuse 👍
- Moins de contraintes géopolitiques 👍
- Plus facile à fabriquer, CAPEX usine plus faibles 👍
- Plus facilement recyclable 👍
- Empreinte CO₂ plus faible 👍



La part des coûts de la matière active dans les coûts des différentes chimies de batteries permet d'estimer le potentiel de baisse des technos



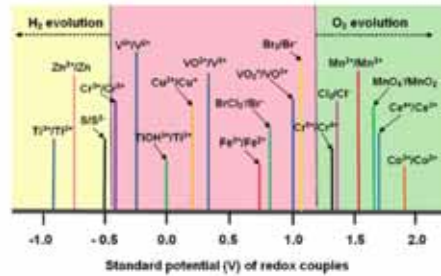
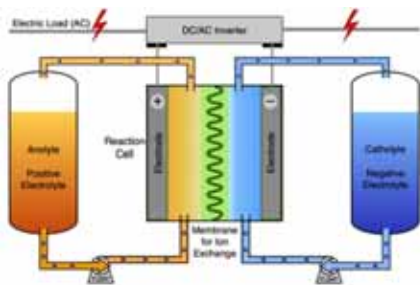
Source : Li et al., Joule 1, 306-327 (2017)

Batteries aqueuses

3 familles de technologies



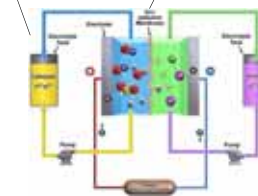
1. Batteries à circulation



- Nombre de cycles illimité
- Durée de vie > 20 ans
- Très grande variété de couples électrochimiques possibles



Batterie à circulation



Une variété de Batteries à circulation



- Batteries Vanadium
 - Technologie la plus avancée (175 MW/700 MWh en Chine)
 - Sensible au prix du vanadium
 - Anolyte et catholyte à base de vanadium
- Batterie Hybride
 - Anode métallique (Fer, Zinc, ...)
 - Technologie Fer-Fer ESS Inc aux USA
- Batterie aqueuse à matière active organique
 - Moins ou pas de dépendance aux minéraux
 - Une startup Française : Kemiwatt



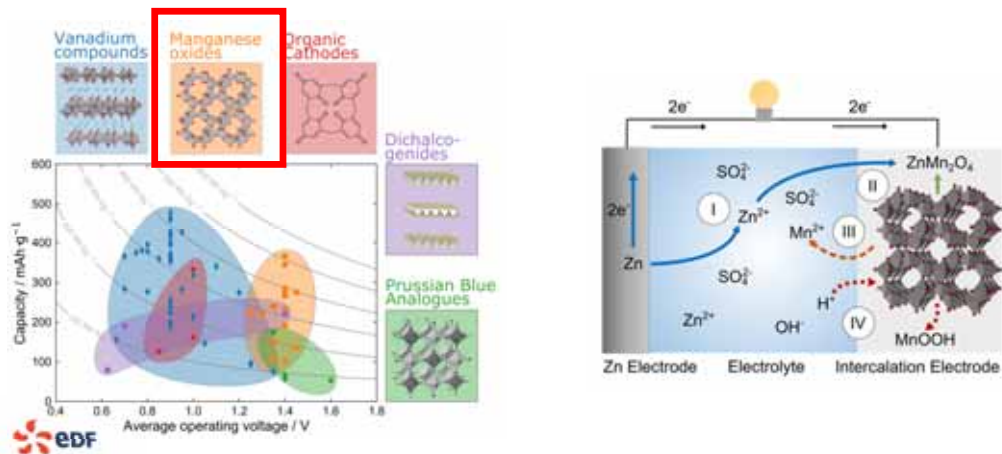
Batterie Zinc-Brome étanche



Usine EOS



Nouvelles génération de batteries aqueuses Zinc « ion »



« Innovative zinc-based batteries » (2021), Ph Stevens et al, Journal of Power Sources, Volume 484, 2021, 229309, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.229309>

Zn/MnO₂



- Rated power: 10 kW
- Maximum power: 20 kW
- Rated energy: 40 kWh
- Maximum energy: 60 kWh
- Operating voltage range: 600-350 VDC



Zn/MnO₂



Dimensions (Standard)
400 x 120 x 14 mm

Weight
1.5 KG

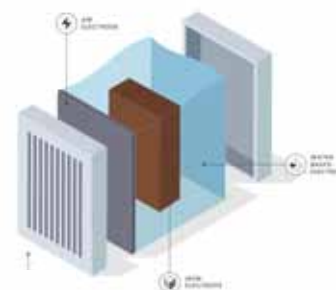
FEATURES

Standard voltage	Standard capacity	Efficiency
24 VDC	6.35 Ah	90%

CAPABILITIES

Max. charge power	Max. discharge power	SoC Window
145 W	145 W	0-100%

2 Batteries métal-air



Batteries métal-air

Zinc-air



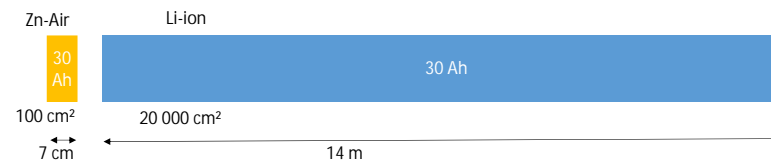
Pile zinc-air + générateur de zinc



Capacité surfacique (mAh/cm²)

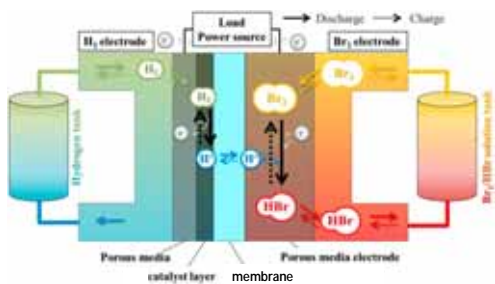
Batterie Li-ion : 2 mAh/cm²

Batterie Zn-Air EDF : 400 mAh/cm²



Projet FLOWBOX

150 kW



AREVA, EnStorage, EDF, CEA, KEM ONE, Schneider Electric, TÜV SÜD



Primus Power



Peak Power	25 kW
Energy Storage	125 kWh
Lifetime Cycles	30,000
Efficiency	70%

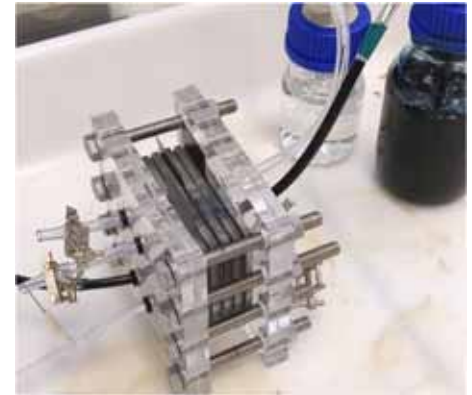




5MWh/2MW Vanadium Redox Flow



Projet REDZIM



TOUCAN PROJECT
FRENCH GUYANA (SOUTH AMERICA)

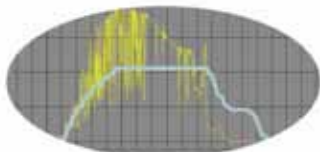
- 5 MWp photovoltaic plant with 2.5MWh / 4.5MWh storage
- Yearly production 5,300 kWh (4,000 households in Guyana)
- 20-year project life
- Operational December 2018

3h storage

Makes solar production-grid friendly:

- Specific intermittent production into fluctuations due to the weather
- Shifts energy to meet evening peak demand
- Provides auxiliary services (frequency and voltage regulation)
- Forecasts production (day ahead and hour ahead)

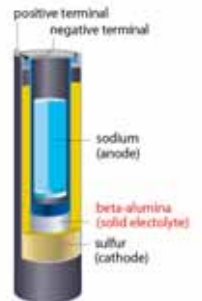
Zebra battery



Batterie Sodium-Soufre à l'île de la réunion

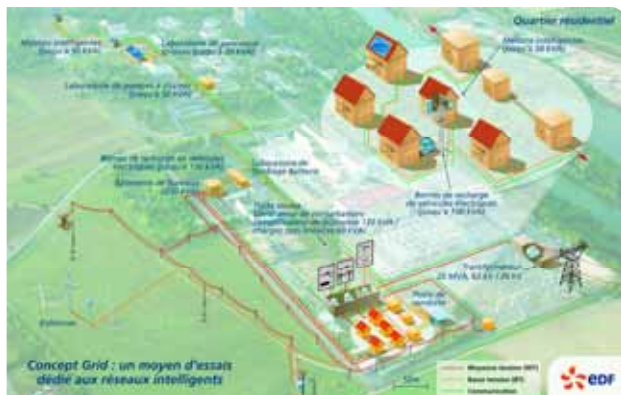


Stockage 6h



Moyen d'essai Concept grid

- Positionnement entre les labos et les démonstrateurs
 - labos : très souples, mais peu représentatifs
 - démonstrateurs : bien représentatifs, mais peu souples



Projet Réglage de fréquence par batterie



Conclusions

Les besoins en stockage sont croissants

Le stockage réseau électrochimique (BESS) prend de l'importance grâce au Li-ion et les volumes de production de VE

Mais

- Tout miser sur le Li-ion serait dangereux
- Les techno aqueuses ont de nombreux avantages pour le stockage stationnaire
- Elles peuvent bénéficier d'un tissu de recherche Française solide
 - Moins visible mais existant
- Des startup Européennes et Françaises qui émergent

