



Climat, environnement et économie circulaire

Stockage d'énergie



## STOCKAGE D'ÉNERGIE

### NOS SOLUTIONS

La transition énergétique passe par un accroissement important de la **production d'électricité renouvelable**, notamment en provenance d'éoliennes et de panneaux photovoltaïques. Ces deux technologies ont la particularité de dépendre des conditions météorologiques, et donc d'afficher une **production variable et non pilotable**. D'où une **possible non concomitance entre la production et la demande d'électricité**. Afin de maximiser le taux d'énergies renouvelables dans le mix électrique, IFPEN propose des innovations technologiques pour l'insertion des renouvelables variables sur les réseaux, accompagnant ainsi le développement des **filières de stockage d'énergie techniquement et économiquement viables**.

### LES SYSTÈMES DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Un stockage d'énergie peut fournir des services de natures diverses au réseau (arbitrage ou effacement des pics notamment) : en fonction de leurs caractéristiques propres (coûts d'investissement et d'opération, rendement, profondeur de décharge admissible, etc.), les diverses technologies de stockage sont donc plus ou moins aptes à répondre à ces besoins. IFPEN développe une **analyse multicritère** capable d'identifier les meilleures solutions techniques au regard de leurs enjeux économiques et environnementaux. Ses travaux intègrent la **simulation** du système concerné tout au long de sa durée de vie et reposent notamment sur la capacité à mettre au point des **systèmes de gestion de l'énergie (Energy Management System ou EMS)**.

« Les **EMS** sont des **systèmes informatiques et matériels** destinés à **piloter** au mieux des systèmes énergétiques, en appliquant des stratégies permettant de tirer le meilleur parti d'un système de stockage au sein d'un réseau particulier. Ils sont intéressants dans des contextes aussi différents que :

- les **Smart Cities**, où ils interviennent à différentes échelles (bâtiment, quartier, ville). Les EMS agrègent des données historiques et effectuent des **prévisions** de la production et de la consommation afin de **piloter au mieux** le stockage et la demande (bornes de charge par exemple). Associés aux réseaux intelligents, les EMS permettent une gestion optimale des situations complexes.
- les sites isolés où il est nécessaire de gérer un système de stockage pour créer un réseau électrique ou supporter un réseau électrique fragile.

Notre expertise en optimisation, **data science** et contrôle de systèmes, et la **performance de nos moyens de tests** nous permettent de développer des EMS pour proposer trois types de services :

- orienter l'intégration d'ENR et de stockage dans la consommation d'électricité et identifier les investissements associés. Notre objectif est de proposer **des méthodes et outils d'optimisation de projets** qui intègrent des possibilités de production d'électricité par ENR, selon différents modèles d'achat/vente d'électricité ou d'objectif d'autoconsommation. Notre compétence historique en **modélisation de batterie** nous permet d'intégrer dans le cœur de calcul la **prise en compte du vieillissement des batteries de stockage**.
- favoriser l'émergence et la rentabilité de projets d'autoconsommation ou de communautés énergétiques. Nous travaillons sur les services distants de prévisions de la flexibilité et le pilotage des systèmes de stockage. Pour prédire la consommation électrique et la production, nous nous basons sur des historiques de données et sur une collection de méta-données, et développons des **modèles intelligents (machine learning)**. Notre **équipement microréseau** sur notre site de Lyon nous permet de tester et de valider nos développements.

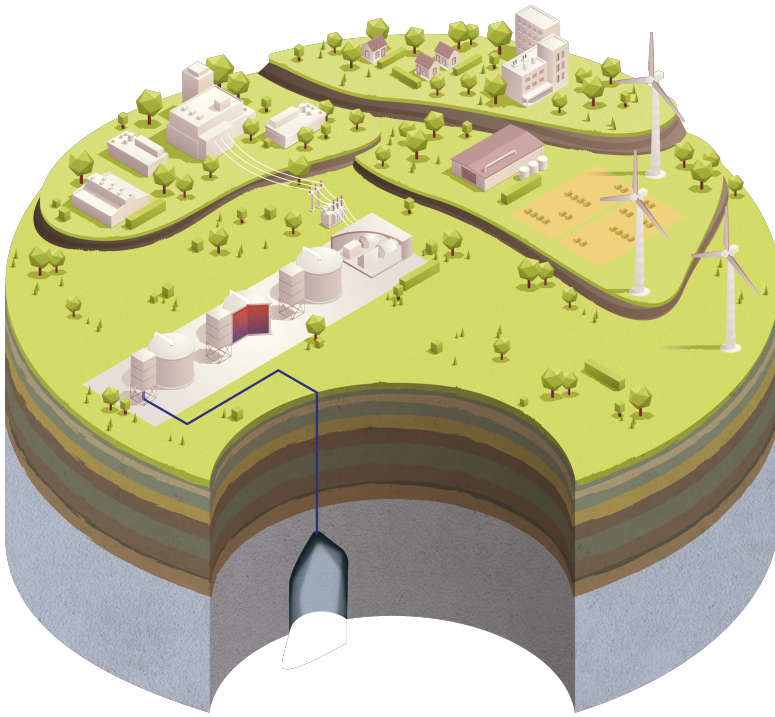
- *accéder aux données opérationnelles des projets, les traiter, afficher les marges de flexibilité, piloter la demande. La plateforme EMS-lab@ifpen assure le monitoring temps-réel de sites équipés de moyens de production renouvelables en autoconsommation, de systèmes de stockage, de bornes de charge. A travers un compte utilisateur, les prévisions de production et de consommation d'un collectif de bâtiments (résidentiels, tertiaires) sont représentés ainsi que le bénéfice des moyens de pilotage. »*



***Philippe Pognant-Gros, chef de projet EMS, IFPEN***

## **LE STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR AIR COMPRIMÉ AA-CAES**

Le stockage d'énergie par air comprimé existe depuis 1978 (centrale de Huntorf en Allemagne) sous la forme de centrales à gaz améliorées dont le rendement énergétique se limite à 50 %. Dans ces anciens systèmes CAES (*Compressed Air Energy System*), la chaleur produite par la compression est perdue. Un concept plus évolué est le **stockage d'énergie par air comprimé AA-CAES** (*Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage*) : il permet de stocker la chaleur de la compression et d'atteindre un rendement bien plus important.



### Stockage Energie par Air Comprimé - Adiabatique Avancé

« Sur le principe de l'AA-CAES, nous développons un système :

- reposant sur un maximum de composants sur étagère, comme les compresseurs et les turbomachines,
- proposant des solutions innovantes, pour les composants qui n'existent pas encore comme les systèmes de stockage de chaleur TES (Thermal Energy Storage).

Son fonctionnement est le suivant :

- le stockage est réalisé par la compression de l'air et le stockage de la chaleur,
- le déstockage est réalisé par le turbinage de l'air après son réchauffage.

Le stockage est réalisé en cavité, ce qui présente l'avantage d'offrir à la fois un bon rendement et un coût modéré par rapport à un stockage en surface qui nécessiterait des équipements plus conséquents.

Nous concentrons nos développements principalement à deux niveaux :

- Choix de systèmes de stockages de chaleur performants
- Optimisation du procédé
  - Amélioration de la gestion des transferts de chaleur lors des phases de compression et de détente de l'air
  - Choix des paliers de pression
  - Utilisation de matériaux innovants »



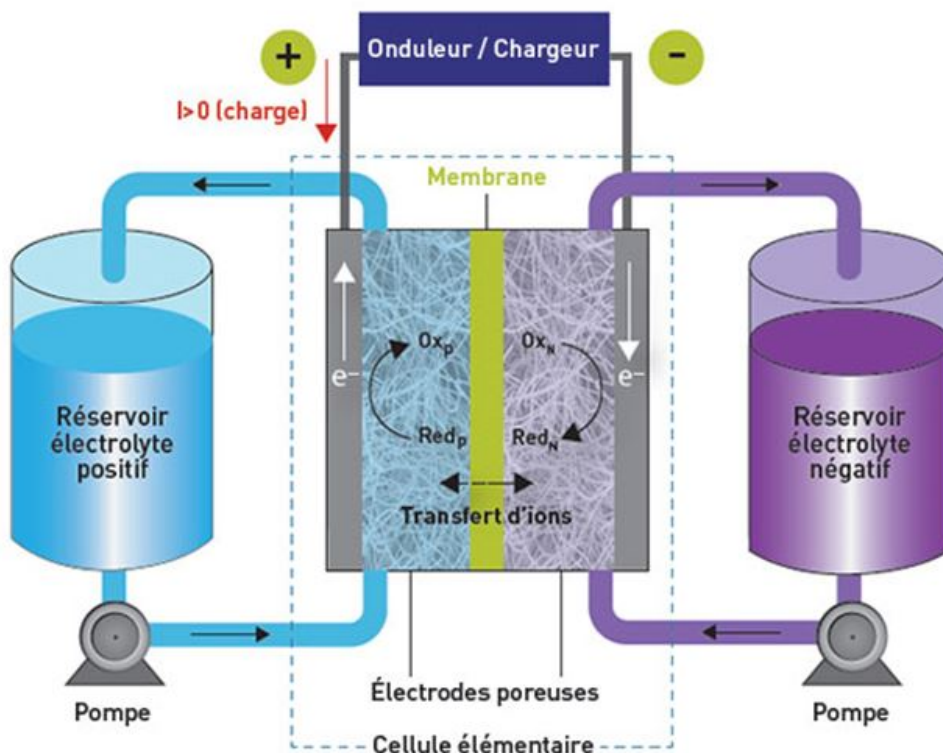
David Teixeira, chef de projet Stockage de l'énergie par air comprimé, IFPEN

## LE STOCKAGE ÉLECTROCHIMIQUE PAR BATTERIES REDOX À FLUX

Le **stockage électrochimique**, en particulier via les **batteries à circulation (Redox Flow Batteries)**, est particulièrement adapté pour les applications nécessitant le stockage de quantités importantes d'énergie, notamment parce qu'il permet de diminuer les coûts à grande échelle.

Les batteries Redox à flux sont des accumulateurs rechargeables qui ont la particularité de **stocker l'énergie en phase liquide** :

- deux électrolytes liquides contenant des espèces électro-actives en solution circulent dans les deux compartiments positif et négatif d'un réacteur électrochimique, compartiments séparés par une membrane échangeuse d'ions,
- les électrolytes sont stockés dans des réservoirs.



Les principaux composants d'une batterie à circulation sont:

- les *stacks* : les cellules élémentaires sont associées mécaniquement entre elles et connectées électriquement en série pour atteindre les tensions usuelles des courants continus,
- les réservoirs d'électrolyte,
- les pompes et les conduites nécessaires à la circulation des électrolytes,
- le système de contrôle de la batterie (BMS / *Battery management system*),
- le système de conversion de puissance continue-alternatif (PCS / *Power conversion system*)

« La caractéristique des batteries Redox à flux réside dans le découplage, en termes de conception, entre :

- la puissance, régie par la section active des électrodes et de la membrane (taille du réacteur) et par le flux d'électrolyte circulant (débit de pompage)
- et la quantité d'énergie stockée, qui dépend de la quantité des électrolytes présente dans les réservoirs.

Cette technologie offre donc une **modularité** unique, puisque les batteries peuvent être dimensionnées en puissance et en énergie, et donc répondre à un grand nombre de cas d'applications. La densité d'énergie relativement faible des électrolytes induit cependant un encombrement important : les domaines d'application préférés pour ces batteries sont donc dans des gammes de puissance intermédiaires de la dizaine de kW à plusieurs MW, et des temps de stockage de deux à dix heures.

Pour aider au déploiement de la technologie, nous concentrons nos recherches sur trois axes principaux :

- mettre au point de **nouveaux matériaux (électrolytes)** moins coûteux et plus performants que les systèmes actuels, tels que le vanadium, notamment en développant des systèmes à base de molécules organiques solubles dans l'eau,
- optimiser la **gestion du système** en utilisant la modélisation multiphysique et multi-échelle,
- comprendre les **mécanismes élémentaires** (réactions électrochimiques, transfert de matière) via une caractérisation multi-échelle (laboratoire, pilote et démonstrateur) et des dispositifs d'analyse en ligne. »



**David Pasquier, chef de projet Stockage d'énergie, IFPEN**

Découvrir la [batterie Redox à flux en images](#) avec David Pasquier

---

## CONTACT



**Yannick Peysson**

Responsable de programme

[yannick.peysson@ifpen.fr](mailto:yannick.peysson@ifpen.fr)

Nos solutions

Lien vers la page web :