

## Introduction

### Un contexte mondial favorable au développement du stockage d'énergies

Depuis le Protocole de Kyoto, signé en 1997 lors de la COP3, et l'Accord de Paris, signé par 196 parties en 2015 lors de la COP21, les plans élaborés par les différents pays pour leur transition énergétique montrent une prise de conscience de plus en plus affirmée de l'enjeu climatique. Dans le même temps, la crise provoquée en février 2022 par l'invasion de l'Ukraine a remis la sécurité énergétique à l'agenda des politiques publiques, notamment en Europe. Dans un monde où l'accès à une énergie décarbonée et produite localement est devenu un enjeu géopolitique, l'association du stockage et des énergies renouvelables est appelée à se développer de plus en plus rapidement au cours de la décennie à venir.

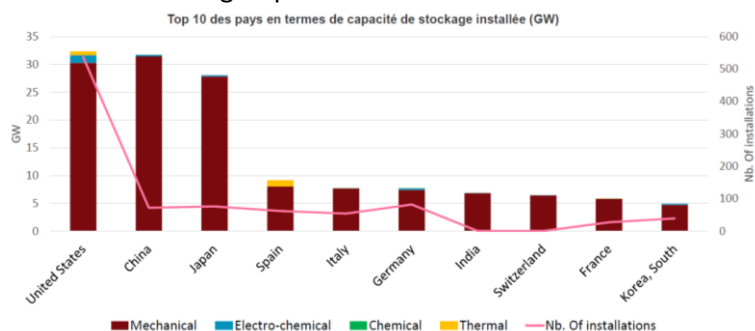
En réponse à l'invasion de l'Ukraine, la Commission européenne a proposé le plan de 300 milliards d'euros, REPowerEU, aux Etats membres qui va au-delà de la feuille de route européenne « Fit for 55 » approuvée en juin 2022 par le Conseil européen. La Commission propose en effet de faire passer de 40 % à 45 % l'objectif actuel de l'UE à l'horizon 2030 en matière d'énergies renouvelables. Le plan REPowerEU porterait ainsi la capacité totale de production d'énergies renouvelables à 1 236 GW d'ici à 2030, et non plus à 1 067 GW d'ici à 2030, comme envisagé dans la feuille de route «Fit for 55», notamment en doublant la capacité solaire PV d'ici 2025 et en installant 600 GW de PV pour 2030. En outre, REPowerEU propose un nouvel objectif d'efficacité énergétique avec une diminution des consommations de 13% au lieu de 9% par rapport aux projections du scénario européen de référence 2020 qui prévoyait une consommation d'énergie primaire de 1 023 Mtep et d'énergie finale de 787 Mtep en 2030.

### Perspectives de développement de la filière du stockage d'énergies

De nombreuses études d'experts permettent d'identifier les besoins des pays pour assurer leurs transitions dans l'ensemble des domaines. Ces études se complètent pour donner une vision prospective des enjeux énergétiques et du rôle des différentes filières :

- au niveau mondial plusieurs études offrent des projections globales sur les besoins dans les années à venir, notamment le *Climate Change 2022* qui est le 6<sup>e</sup> rapport d'évaluation du GIEC, mais aussi le *World Energy Outlook 2022*, *Renewables 2022* et *The Role of Critical Materials in Clean Energy Transitions*, publiés par l'International Energy Agency ou bien *New Energy Outlook 2022*, publié par le groupe BloombergNEF (BNEF) ;
- au niveau européen les études qui présentent les perspectives les plus détaillées sont *Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050*, publiée par la Commission européenne, ou encore *Energy Storage Targets 2030 and 2050*, publiée par EASE (European Association for Storage of Energy) ;
- à l'échelle de la France, *Futurs énergétiques 2050* de RTE et *Transition(s) 2050* de l'ADEME offrent une vision prospective nationale.

Les études PEPS, et en particulier PEPS5, viennent compléter cette liste non-exhaustive d'études en se concentrant sur le stockage d'énergies, un domaine qui semble aujourd'hui plus que jamais crucial à la réussite de la transition énergétique.



Source : DOE (2020)

(\*) Installations en opération, en construction, annoncées ou contractualisées

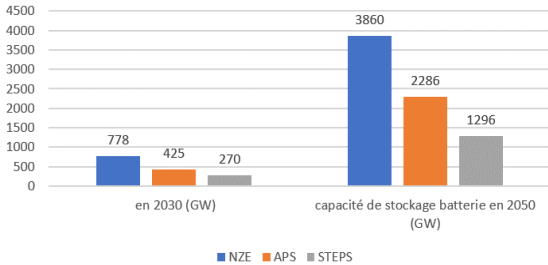
Dans la très grande majorité des scénarios, la filière du stockage d'énergie va avoir un rôle important à jouer.

Selon les bases de données DOE (US) et CNESA (China), on observe en 2020 de près de 200 GW de capacités mondiales de stockage d'électricité, dont 92,6% est couvert par des stations de transfert

d'énergie par pompage. Le reste des capacités est surtout constitué par les batteries électrochimiques à hauteur de 5,2% du total, représentées elles-mêmes à près de 90% par les batteries Li-ion.

L'IEA a recensé pour sa part près de 27 GW de batteries installées à la fin de l'année 2021. Les projections relatives à cette filière de stockage sont optimistes dans les trois scénarios élaborés par l'IEA, à savoir *Stated Policies Scenario (STEPS)*, *Announced Pledges Scenario (APS)* et *Net Zero Emissions Scenario (NZE)*.

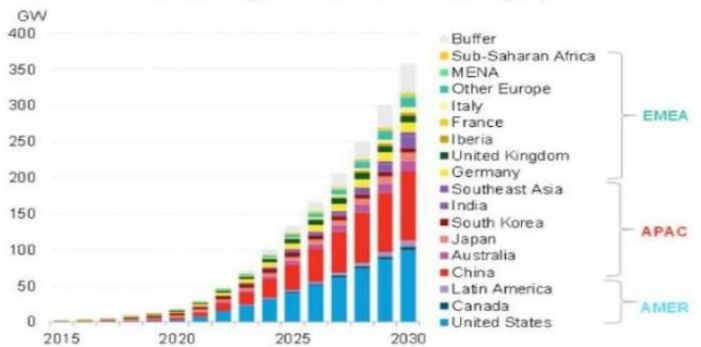
capacité de stockage batterie en fonction des scénarios IEA



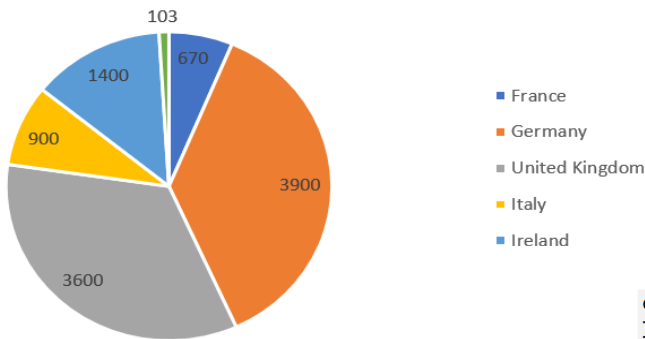
On constate que d'ici 2030, les capacités de stockage ne comptabilisant que les batteries vont être multipliées par un facteur entre 10 et quasiment 30.

Ce qui semble en accord avec l'ordre de grandeur qu'annonce le New Energy Outlook 2021 de BloombergNEF qui prévoit près de 350 GW de batteries installées d'ici 2030.

Installation globale cumulée de batteries (GW)

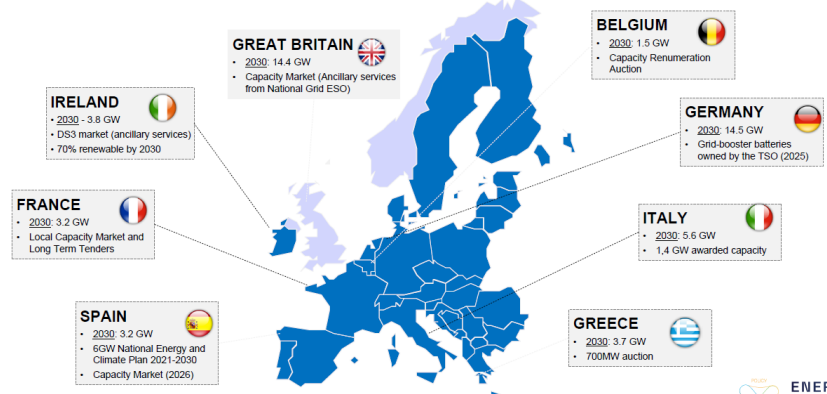


Capacité batteries installée fin 2022 (MW)



En Europe, Delta-EE comptabilise pour EASE environ 10,5 GW de batteries installées fin 2022.

Et prévoit quelque 50 GW de batteries pour 2030. Ce à quoi s'ajouteront 50 GW de STEPs ainsi que plusieurs dizaines de GW de Power-to-X-to-Power.



Delta-ee "EUROPEAN MARKET MONITOR ON ENERGY STORAGE 6.0" - June 2022

A l'échelle de la France, RTE projette dans *Futurs énergétiques 2050* entre 1 GW de batteries pour le scénario N03 (ENR+nouveau nucléaire 3) et 26 GW de batterie pour le scénario M0 (100% ENR). De même, les scénarios de l'ADEME planifient de quelques centaines de MW à presque 30 GW de batteries installées d'ici 2050.

Tous s'accordent à dire qu'il faut développer les STEPs au maximum, malgré un gisement limité, et les projections se rapprochent de 8,5 GW contre 5 GW aujourd'hui.

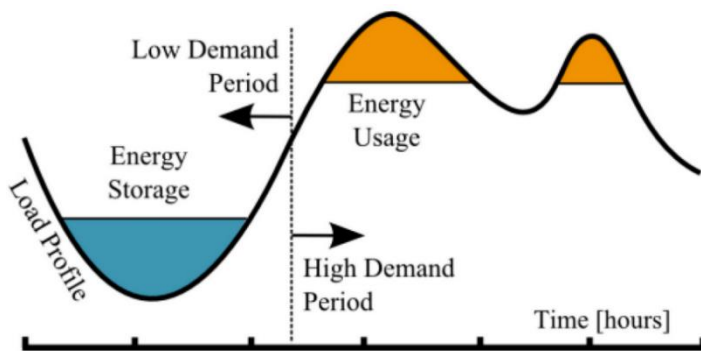
Le stockage thermique est d'ores et déjà une source de flexibilité conséquente puisque qu'à eux seuls, les ballons d'eau chaude représentent plus de 18 GW de puissance installée. Les industriels commencent aussi à s'équiper de systèmes de stockage thermique afin de valoriser la chaleur fatale.

Le stockage Power-to-Gas est destiné lui aussi à se développer car à la différence des batteries qui stockent sur quelques heures, le gaz peut être stocké sur des temps plus longs et peut assurer une stabilité hebdomadaire voire même infra-saisonnière.

### L'utilité des technologies de stockage d'énergie pour les réseaux électriques et les systèmes énergétiques

Le développement exponentiel de l'ensemble de la filière s'explique par les besoins de la transition énergétique. La forte pénétration des énergies renouvelables dans les mix énergétiques engendre des difficultés pour la gestion des réseaux auxquelles peuvent pallier les différentes technologies de stockage d'énergies.

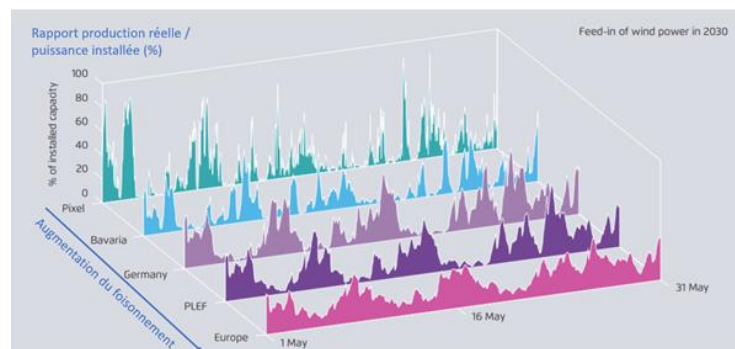
Le principal inconvénient des productions éoliennes et photovoltaïques est d'être intermittentes. Soumises aux aléas météorologiques, ces productions peuvent être trop faibles pour assurer les pics de consommation



Source : Peak power reduction for electrified Rubber-Tyred Gantry (RTG) cranes using energy storage

ou trop fortes par rapport à la demande. Le stockage permet de déplacer cette production au moment où le besoin est important. En fonction du système de stockage qui est mobilisé, il est possible de déplacer ces productions sur différents pas de temps selon que l'on mobilise une batterie, une STEP ou une installation Power-to-Gas.

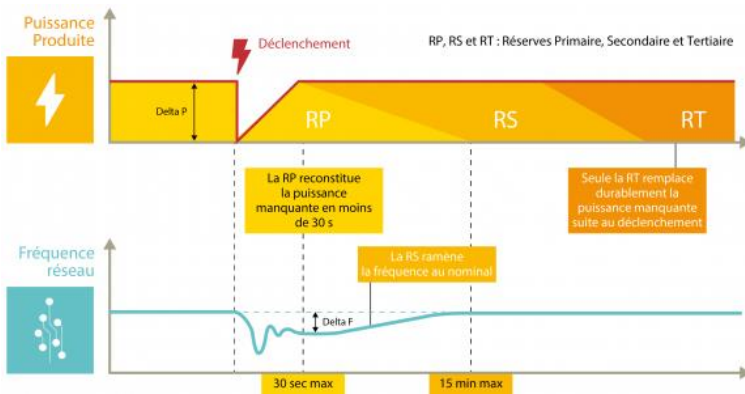
En appui du foisonnement des renouvelables sur le réseau, le stockage d'énergie permet de lisser la production intermittente, ce qui est fondamental car le réseau est dimensionné en puissance ce qui permet d'éviter des investissements coûteux dans le réseau.



Source : Le Réveilleur ; Fraunhofer IWES

Assurer la sécurité du réseau consiste à maintenir constamment l'équilibre entre l'offre et la demande, ce qui revient à maintenir la fréquence à 50Hz. Les sources de production pilotable, qu'elles soient des centrales nucléaires, à gaz ou au charbon comportent des alternateurs dans leur mécanisme de production qui assurent, grâce aux propriétés d'inertie du rotor, une stabilisation mécanique à 50Hz. Plus la part du renouvelable est importante dans le mix énergétique, spécifiquement avec le photovoltaïque, plus grande est la perte d'inertie. Cette perte peut être compensée par les systèmes de stockage, et plus particulièrement avec des batteries en raison de l'échelle de temps considérée.

**Les batteries démontrent déjà leur efficacité pour assurer la sécurité du réseau**, car elles participent au mécanisme de réserve. Lorsqu'il y a un déséquilibre offre-demande et que la fréquence du réseau se décale, à la hausse ou à la baisse, de 50 Hz, la réserve primaire intervient en 15 à 30 secondes maximum pour limiter le décalage. Puis la réserve secondaire rétablit la fréquence en moins de 15 minutes à 50 Hz.

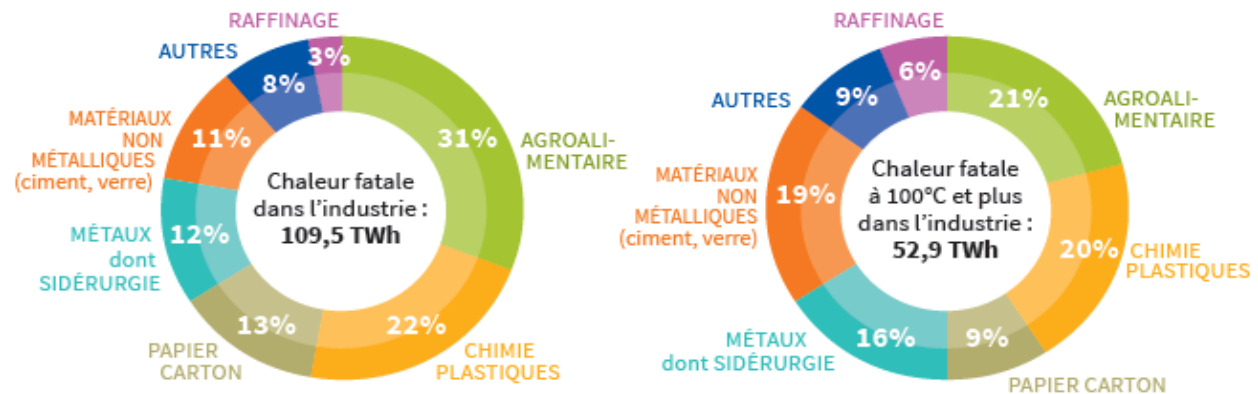


Ce mécanisme est fondamental pour le réseau puisque l'ensemble des machines qu'il alimente ont été dimensionnées pour fonctionner sur cette fréquence et qu'un décalage trop important ou trop long risque de les endommager. Sur les 540 MW disponibles pour la réserve primaire, 50% sont assurés par des batteries. La réserve secondaire n'est pas encore ouverte aux batteries, mais les discussions sont en cours car la filière estime que ces technologies sont

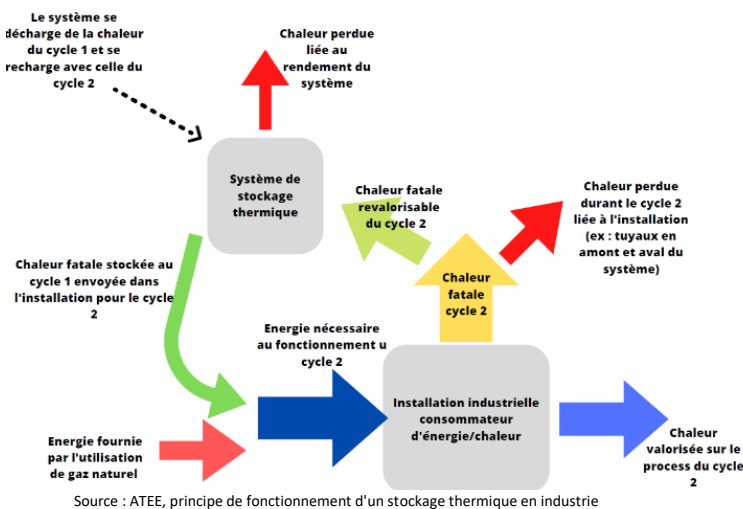
assez matures pour ce type de service.

**Un autre élément à prendre en compte pour l'avenir des réseaux est l'essor des véhicules électriques,** voués à remplacer les véhicules thermiques, dont la vente neuve a été interdite à l'horizon 2035. Une étude faite par RTE et l'Avere-France montre qu'en 2035 la consommation annuelle d'électricité des véhicules électriques représentera jusqu'à 8% de la production totale d'électricité en France avec près de 40 TWh consommés chaque année répartis sur les 15,6 millions de véhicules. Les batteries portées par les véhicules, à travers notamment le pilotage de leurs périodes de chargement ou la mise en service au réseau de leurs batteries (vehicule-to-grid), contribueront d'une façon non négligeable aux besoins de flexibilité du réseau électrique.

**Une quantité importante de la chaleur produite dans les différents procédés industriels est aujourd'hui perdue alors qu'elle pourrait être valorisée grâce au stockage.** Désignée comme chaleur fatale cette énergie n'est pas valorisée. L'ADEME estimait en 2015 la quantité d'énergie perdue ainsi à 109,5 TWh, estimation actualisée en février 2022 à 99,6 TWh.



Source : ADEME, Gisements de chaleur fatale dans l'industrie en 2015 (non actualisé dans la mise à jour de février 2022)



Source : ATEE, principe de fonctionnement d'un stockage thermique en industrie

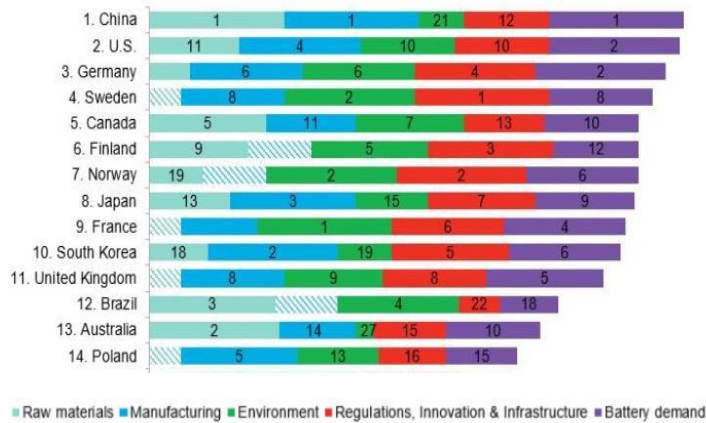
La chaleur fatale peut être valorisée par le stockage thermique qui consiste à capter les gisements de chaleur fatale continus (variables) et discontinus afin de les stocker et de les convertir en une source de chaleur maîtrisée, décarbonée et surtout compétitive donc à haute valeur ajoutée.

En stockant une partie de la chaleur fatale produite lors d'un cycle d'une installation industrielle grâce à du stockage thermique sensible, latent ou chimique, l'industriel a la possibilité de l'utiliser de manière différée en fonction de son besoin et du marché. L'étude PEPS4 a montré la pertinence de ces technologies qui s'installent de plus en plus dans les sites industriels.

## Les contraintes pesant sur la mise en place des technologies pour la transition énergétique

Le besoin de stockage est avéré, mais faut-il encore s'assurer de la capacité des acteurs de mettre en place ces technologies.

Figure 1: BNEF 2021 global lithium-ion battery supply chain ranking



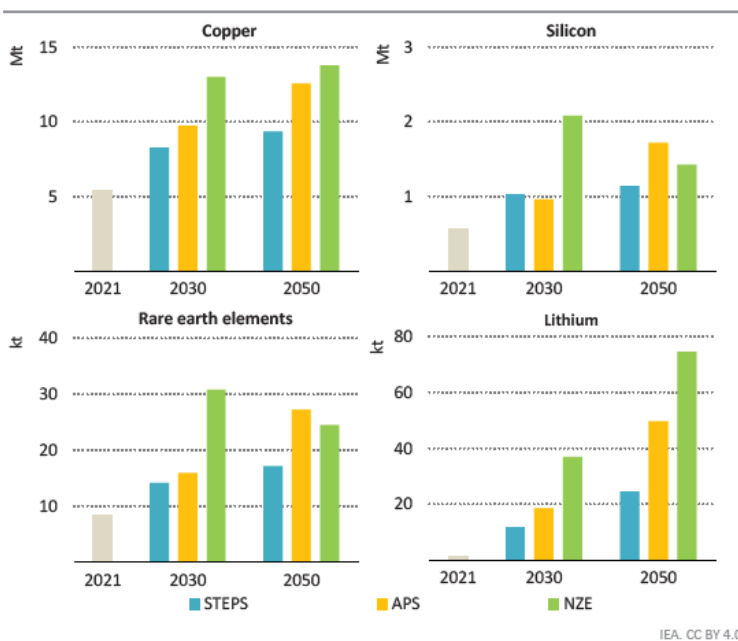
Le BNEF 2021 a réalisé un classement estimant la capacité de chaque pays à développer une chaîne de valeur complète pour les batteries. Les chiffres représentent la position du pays dans le classement dans chacune des catégories. La taille de chaque barre représente la valeur que vaut graphiquement cette place (plus le chiffre est bas plus la barre de couleur est large).

En France, le mix est fortement décarboné grâce à la part importante du parc nucléaire, mais le pays ne possède aucune capacité de manufacture ni d'extraction de matières premières.

Une tendance qui semble s'inverser puisque plusieurs projets sur le territoire français, y compris dans le domaine minier, ont été annoncés pendant l'année 2022. Bien que les pays européens soient classés individuellement dans le rapport BNEF, l'Europe, en tant que continent, voit sa demande de batteries classée deuxième après celle de la Chine. Et la capacité de l'Europe à mettre en place une chaîne de valeur, grâce à la facilité de ses échanges commerciaux, la classe finalement en tête, devant la Chine.

Au-delà de la capacité de produire l'ensemble des technologies nécessaires à transition énergétique, la disponibilité des ressources naturelles nécessaires n'est pas assurée. Des organismes comme l'IEA annoncent en effet le passage d'un monde intensif en énergies fossiles à un monde intensif en matériaux.

Figure 6.23 ► Annual demand for selected critical minerals used in low-emissions electricity supply, storage and networks by scenario, 2021-2050



More copper for grids, rare earth elements for wind turbine motors, silicon for solar panels and lithium for battery storage are required to transition to low-emissions power systems

IEA, CC BY 4.0.

Les besoins explosent dans tous les scénarios, mais dans ceux qui respectent les objectifs de développement durable, les besoins en lithium sont multipliés par 42, en graphite par 25, en cobalt et nickel par 20 et en terres rares par 7.

Ces chiffres sont à mettre en parallèle avec les potentielles difficultés géopolitiques auxquelles devront faire face les approvisionnements en matériaux puisque ces ressources sont concentrées dans quelques régions dans le monde.

Par exemple, la Chine représente 60% de l'extraction des terres rares et 85% du raffinage de ces dernières. 20% du lithium et 30% du cuivre sont extraits au Chili et la Chine raffine 60% du lithium et 40% du cuivre. Dans ces mêmes scénarios, les mines existantes ainsi que celles annoncées ne seront en mesure d'approvisionner seulement 50% des projets ayant besoin de lithium et cobalt et 80% de ceux ayant besoin de cuivre.

soin de lithium et cobalt et 80% de ceux ayant besoin de cuivre.

## Conclusion

Au regard de la situation actuelle et de l'ensemble des prévisions, il semble fondamental d'établir un état des lieux clairs des technologies de stockage d'énergies, qu'elles soient encore au stade de recherche ou déjà commercialisées, car ce sont elles qui vont nous permettre d'atteindre les objectifs de transition énergétique que nous nous sommes fixés.

C'est pourquoi dans le cadre de l'étude PEPS5, le Club Stockage de l'ATEE, avec l'appui du CEA Liten, a développé un catalogue de fiches technologiques qui passent en revue les différentes applications du stockage d'énergie en recensant donc une soixantaine de technologies. Le Club espère que ce travail de référence contribuera à une meilleure connaissance de ces technologies, de leurs avantages et de leurs contraintes et favorisera *in fine* leur mise en œuvre.

Introduction rédigée par Sébastien ABDELNOUR, *chargé de missions au Club Stockage d'Énergies* et Xavier ROMON, *Délégué Général du Club Stockage d'Énergie*

## Le Club Stockage d'Énergies



Créé en 2010, le Club Stockage d'Énergies de l'ATEE a pour vocation de rassembler tous les acteurs impliqués dans la mise en œuvre des technologies et systèmes de stockage d'énergies stationnaires (électricité, chaleur, froid, H2, P2G, P2H, etc.).

### >>> Les missions du Club

- . Aider les membres à mieux appréhender les multiples enjeux fiscaux, réglementaires, économiques, technologiques du stockage d'énergies et les marchés associés, pour en saisir les opportunités à court et moyen termes ;
- . Proposer aux membres une structure de concertation et de réflexion sur la R&D, les technologies, les services, les différents marchés, la réglementation, etc. ;
- . Constituer une force de proposition reconnue par les pouvoirs publics afin de favoriser le déploiement des technologies et systèmes de stockage les plus pertinents ;
- . Réaliser des expertises et des études technico-économiques reconnues par les pouvoirs publics.

### Réflexions et travaux du Club

Le club réalise régulièrement des expertises et études sur le stockage d'énergies telles que l'étude du potentiel de stockage d'énergies en France PEPS5 réalisée en 2022, le potentiel de stockage sur une maille européenne interconnectée ou des études sur le potentiel de batteries de véhicules électriques en seconde vie.

Le club contribue aux enquêtes et consultations publiques sur la filière et met à la disposition de ses membres une plateforme de travail collaboratif sur le site [atee.fr](http://atee.fr) dédiée au stockage d'énergies et support d'une veille active. Il s'agit de développer les synergies entre tous les acteurs et contributeurs à la chaîne de valeur et de multiplier les expertises et les études communes.

Avec ses différents groupes de travail : GT « Technologies » ; « Réglementation » ; « Prescription Sécurité des systèmes de Batteries ESS » ; « Économie » ; « Stockage thermique » ; « Mobilités » et « ACV – EC » (Analyse du Cycle de vie – Économie Circulaire), le Club Stockage regroupe des énergéticiens, des constructeurs et intégrateurs de systèmes de stockage d'énergies, les gestionnaires de réseaux, l'ADEME, des organismes de recherche, des associations et fédérations professionnelles du stockage de chaleur ou de froid, des exploitants de systèmes de stockage, des bureaux d'étude, ingénierie, PME, PMI, ETI qui conçoivent ou mettent en œuvre des solutions de stockage d'énergies, et les autres acteurs intéressés par le développement d'une filière performante et ambitieuse du stockage en France et en Europe.

Enfin, le Club Stockage d'Énergies organise des colloques nationaux et régionaux, participe aux manifestations et groupes de réflexions sur le sujet du Stockage et communique largement sur les actions menées avec ses membres.

Contact Délégué Général : Xavier ROMON  
tel : +33 (0)1 46 56 41 47 – [x.romon@atee.fr](mailto:x.romon@atee.fr)