

Stockage d'énergie par Batterie dans les systèmes électriques en transition

Sibi Bonfils, GSI

Les batteries ont pris au cours des dernières années une place importante dans le système énergétique mondial. Elles sont aujourd'hui devenues l'une des principales composantes de la transition de ce système vers la carboneutralité, notamment comme solutions pour la décarbonation massive du transport routier.

Elles connaissent, dans le secteur électrique, un déploiement soutenu et à grande échelle permettant d'apporter une réponse appropriée à l'intégration de parts plus élevées des énergies renouvelables variables (ERV - solaires et éoliennes) dont il est besoin pour sortir ce secteur de sa dépendance des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon).

Elles donnent par la même occasion un nouveau souffle, avec une plus grande portée et beaucoup de flexibilité, à toute la gamme des services que procure le stockage de l'énergie dans le système électrique, modifiant de ce fait, en profondeur, les dynamiques en jeu dans son exploitation et son développement. Ces services, qui améliorent de façon générale sa fiabilité, vont du transfert d'énergie, à l'adéquation des ressources et à différents services auxiliaires qui contribuent avantageusement au renforcement de sa stabilité et de sa résilience.

Ce numéro du bulletin porte sur ces services. Il s'appuie principalement sur le rapport spécial **Batteries and Secure Energy Transitions**¹ de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE-IEA) pour donner un aperçu de ces services et de leur portée, avec, en amont, une présentation succincte du rapport et un bref rappel du niveau de déploiement des batteries dans le système électrique mondial.

1. Le rapport de l'AIE

Le rapport spécial **Batteries and Secure Energy transitions** (Batteries et transitions énergétiques sécurisées) a été publié en avril 2024 par l'Agence Internationale de l'énergie (AIE). Il comprend trois principaux chapitres :

- ✓ **Le chapitre 1, *État de la demande et de l'offre de batteries*** revient sur un siècle de recherche, développement et mise en œuvre dans le domaine des batteries, un siècle marqué, au cours des dernières décennies, par des baisses spectaculaires de coûts, l'augmentation des densités énergétique et des durées de vie, et conséquemment, l'extension tout aussi spectaculaire de la place des batteries, notamment dans le domaine du transport et dans le secteur électrique qu'elles sont en train de transformer en profondeur.
- ✓ **Le chapitre 2, *Perspectives pour la demande et l'offre de batteries*** traite du rôle que doivent jouer les batteries dans la réalisation des objectifs mondiaux en matière d'énergie et de climat, que sont la sortie des combustibles fossiles, le triplement des

¹ International Energy Agency (IEA), *Batteries and secure energy transitions*, Avril 2024, <https://www.iea.org/reports/batteries-and-secure-energy-transitions>

puissances mondiales renouvelables installées et le doublement du rythme d'amélioration de l'efficacité énergétique.

- ✓ **Le chapitre 3, *Implications politiques et recommandations*** propose une série de mesures clés susceptible de favoriser le déploiement des batteries aux échelles requises pour atteindre la carboneutralité en 2050. Des réformes institutionnelles et réglementaires propices à leur déploiement ainsi que la mise en place de chaînes d'approvisionnement sûres, résilientes et durables pour les minéraux critiques, participent de ces mesures.

Dans chacun de ces chapitres, l'état du stockage de l'énergie par batterie dans le secteur électrique et ses perspectives d'évolution ont été exposés en détail. Le bulletin ne porte pas sur ces éléments dont il s'inspire cependant. Il se concentre sur les multiples rôles des batteries dans les réseaux électriques tel qu'ils sont exposés dans le premier chapitre du rapport spécial.

2. Déploiement des batteries dans le système électrique mondial

On a assisté, au cours de la dernière décennie, à une augmentation exponentielle de la capacité installée de stockage par batterie dans le système électrique mondial, indique l'AIE. Elle est passée de 1 GW en 2013, à plus de 85 GW en 2023, année qui a vu un ajout de 42 GW, plus du double de la quantité ajoutée en 2022. Près de 90% des augmentations de capacité des 5 dernières années sont imputables à la Chine, à l'Union Européenne et aux États-Unis. Ces ajouts se répartissent entre **batteries à échelle de réseau** (65%) et **batteries en aval des compteurs** (35%).

Les **batteries à échelle de réseau** (Grid-Scale Batteries ou Utility-Scale batteries) sont des Systèmes de stockage d'énergie par batterie à grande échelle directement connectés aux réseaux de transport et de distribution d'électricité. Leurs capacités de stockage vont de plusieurs centaines de kWh à des multiples de GWh.

Les systèmes de stockage **par batteries en aval du compteur** sont généralement installés chez les utilisateurs finaux résidentiels, commerciaux ou industriels, sans connexion dédiée au réseau. Leurs capacités de stockage vont de quelques kWh à plusieurs dizaines.

Source : AIE, Battery and secure energy transitions, 2024

Le graphique ci-dessous donne un aperçu de l'évolution des ajouts de capacité de stockage depuis 2013, tant au niveau mondial que régional.

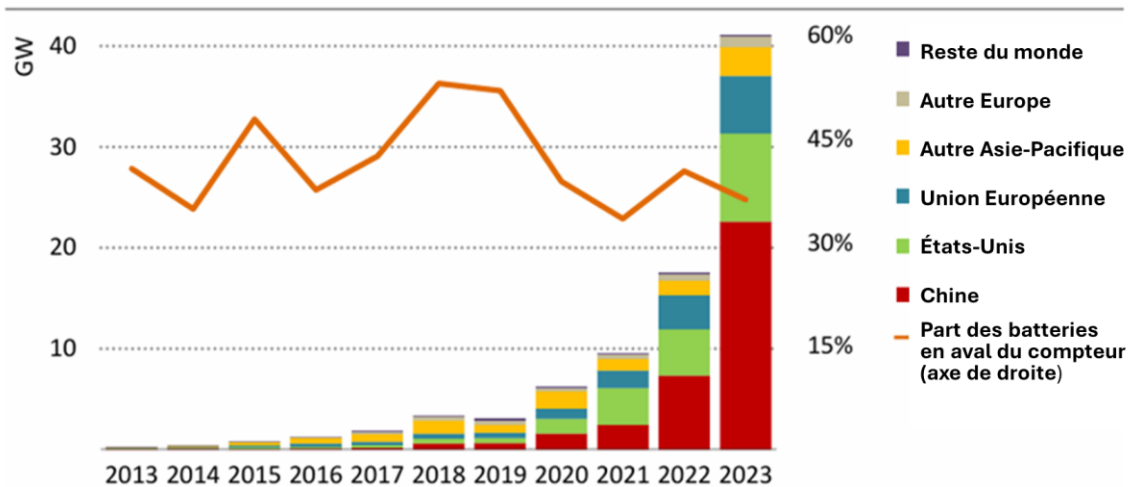
La Chine a pris la tête du marché mondial de stockage au début des années 2020. Sa part dans les ajouts est passée de 20% en 2019 à 55% en 2023, lesquels ont triplé pour atteindre 23 GW à cette date. Deux tiers de ces ajouts sont à échelle de réseau. Les grands utilisateurs commerciaux plutôt que résidentiels sont les bénéficiaires des stockages en aval des compteurs qui ont eux aussi connu une forte croissance grâce à des réformes tarifaires dédiées.

Aux **États-Unis**, les ajouts ont presque doublé pour atteindre 8 GW, faisant de ce pays le deuxième marché mondial de stockage d'énergie par batteries. 90% de ces ajouts se sont faits à échelle de réseau. La baisse des coûts et des politiques d'incitation comme les

crédits d'impôt pour investissement ont permis aux batteries à échelle de réseau de pénétrer les marchés des services auxiliaires (réserve tournante, générateurs de secours...)

L'Union européenne occupe la troisième place du marché avec des ajouts annuels de 6 GW ayant permis une augmentation de 70% de sa capacité de stockage. 90% de cette croissance est associée aux stockages en aval du compteur, principalement en Allemagne et en Italie où des prix de détails élevés, des réductions fiscales et des prêts à faibles taux ont favorisé le développement du photovoltaïque sur toit associé au stockage par batterie. La tendance y haussière en ce qui concerne le stockage à échelle de réseau

Ajouts de capacité de stockage par batterie dans le monde, 2013-2023



Les ajouts de capacité qui ont doublé en 2023, sont menés par la Chine, les États-Unis et l'Union européenne

Note: GW = Gigawatts

Source: IEA, Batteries and Secure Energy Transitions, 2024

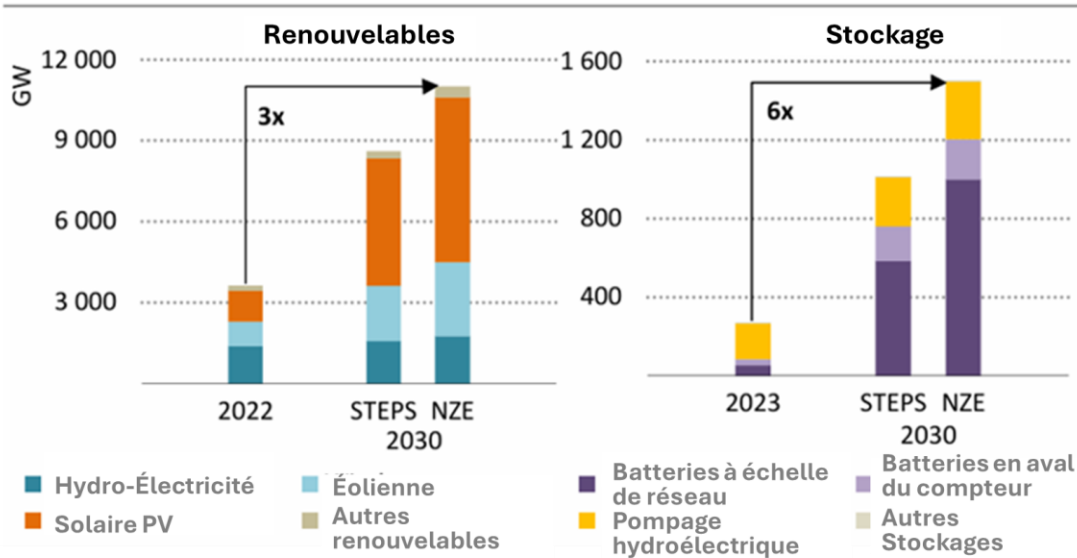
Des pays comme l'Australie, le Japon, la Corée du Nord, le Royaume Uni ou le Chili se distinguent avec cependant de relativement faibles niveaux d'ajouts de capacité allant de 250 MW pour le Chili, à 1,3 MW pour l'Australie en 2023.

La baisse tendancielle de la part du stockage en aval des compteurs tel que le montre la figure ci-dessus est le reflet de l'importance que sont en train de prendre les batteries de stockage à échelle de réseau.

Cette tendance est appelée à se renforcer si l'on veut réaliser, d'ici 2030, les objectifs mondiaux en matière d'énergie et de climat, que sont la sortie des combustibles fossiles, le triplement des puissances mondiales d'énergies renouvelables variables (ERV) installées et le doublement du rythme d'amélioration de l'efficacité énergétique, d'ici 2030.

Le graphique ci-dessous donne un aperçu des besoins de croissance des capacités de stockage nécessaires pour répondre à ces objectifs, en ce qui concerne notamment les ERV. Dans le scénario zéro émissions nettes d'ici 2050 (NZE2050) de l'AIE, qui s'inscrit dans la perspective de la carboneutralité d'ici 2050 et le respect de la limite de 1,5°C pour l'augmentation de la température moyenne mondiale d'ici 2100, le triplement de la capacité mondiale en énergies renouvelables s'accompagne d'une multiplication par six du stockage total d'énergie qui atteindrait, en 2030, 1 500 GW. Le facteur multiplicateur est de 14 pour les batteries dont la capacité installée passerait de 85 GW en 2023 à 1 200 GW en 2030.

Capacité mondiale installée d'énergie renouvelable et de stockage d'énergie par scénario, 2022 et 2030



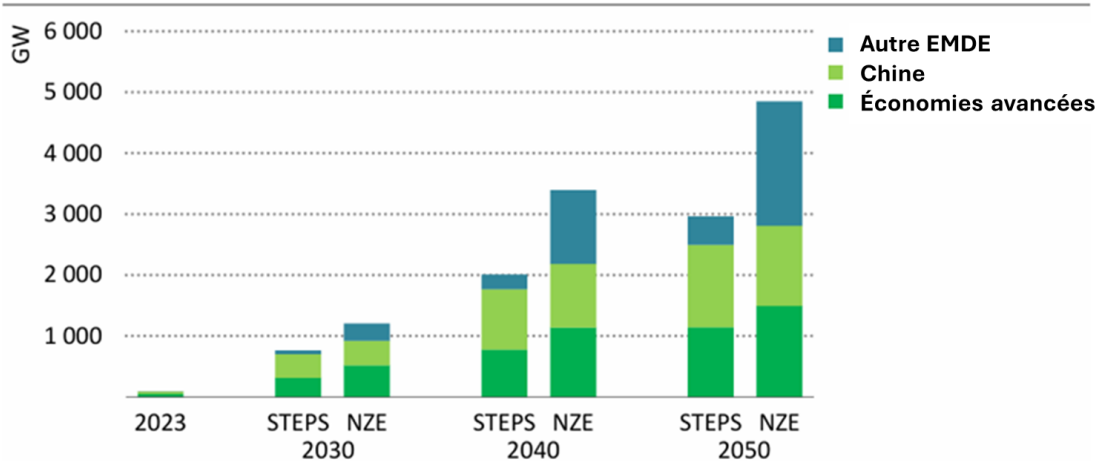
La capacité de stockage d'énergie, dominée par le stockage par batteries, augmente six fois d'ici 2030 dans le scénario NZE et soutient l'objectif de triplement de la capacité des énergies renouvelables.

Remarques : GW = gigawatts ; PV = photovoltaïque ; STEPS = Scénario des politiques déclarées ; NZE = Scénario Zéro Émission Nette d'ici 2050. Les autres énergies renouvelables comprennent la bioénergie, la géothermie, l'énergie solaire concentrée et l'énergie marine. Les autres types de stockage incluent le stockage d'énergie par air comprimé, les volants d'inertie et le stockage thermique. Les électrolyseurs à hydrogène ne sont pas inclus.

Source: IEA, Batteries and Secure Energy Transitions, 2024

La croissance des capacités de stockage par batteries à échelle de réseaux et en aval des compteurs devrait se poursuivre après 2030 avec la baisse attendue des coûts de ce mode de stockage d'énergie ainsi que le montre le graphique ci-dessous.

Capacité mondiale installée de stockage par batteries par scénario, 2023-2050



IEA. CC BY 4.0.

La capacité totale installée de stockage par batteries augmente considérablement dans les deux scénarios, avec une forte croissance dans les marchés émergents et les économies en développement hors de Chine dans le scénario NZE.

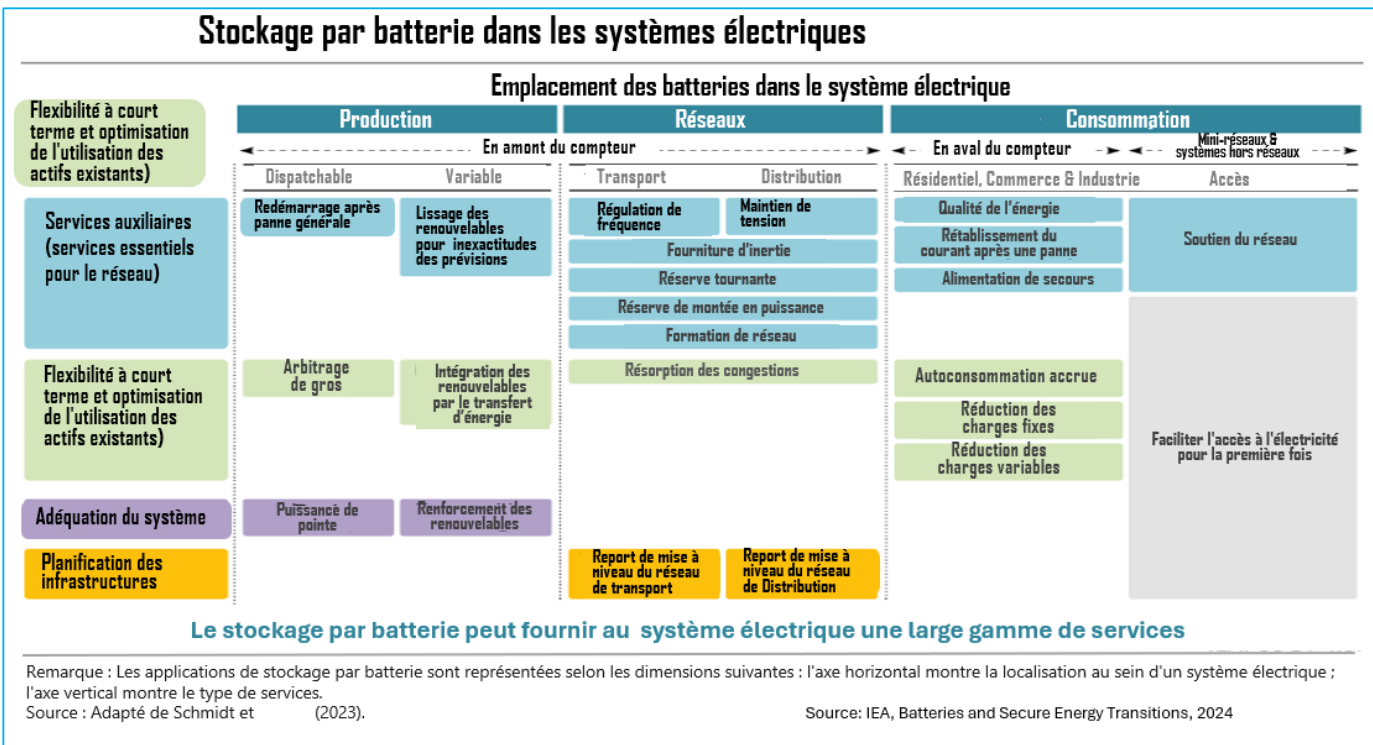
Remarque : GW = gigawatts ; STEPS = Scénario des Politiques Déclarées ; NZE = Scénario des Émissions Nettes Zéro d'ici 2050 ; Autres EMDE = Économies de marché émergentes et en développement autres que la Chine.

Source: IEA, Batteries and Secure Energy Transitions, 2024

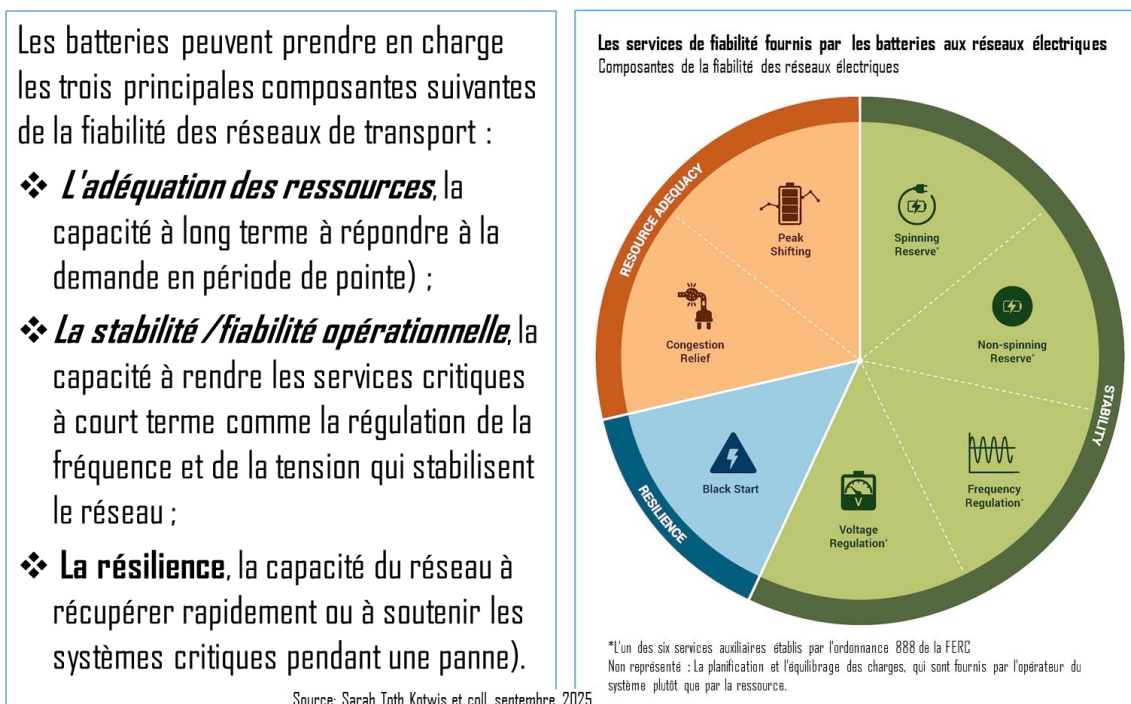
Les multiples autres services que ce mode de stockage d'énergie peut fournir aux réseaux électrique, au-delà de l'intégration de plus grandes parts d'ERV, participent encore d'avantage des dynamiques qui poussent à cette nécessaire croissance, laquelle porterait sa capacité de 1,2 TW en 2030 à près de 5 TW en 2050 dans le scénario NZE2050

3. Les batteries procurent aux systèmes électriques de multiples services

Les stockages d'énergie par batterie à **échelle de réseau** et en **aval des compteurs** ont été introduits dans les systèmes électriques avec les énergies renouvelables variables (solaires, éoliennes), principalement pour en palier l'intermittence. Ils complètent, avec plus de flexibilité et de rapidité, les systèmes traditionnels de stockage d'énergie propre à grande échelles comme le pompage-turbinage hydroélectrique. Ces caractéristiques (flexibilité et rapidité) sont en train de les imposer dans les systèmes électriques en transition grâce à la variété des services qu'ils peuvent rendre et qu'ils rendent déjà. Le tableau ci-dessous nomme ces services dans les différents compartiments des systèmes électriques, la production, le réseau (transport et distribution) et la consommation.



Dans le cas particulier des réseaux de transport, Sarah Toth Kotwis et ses collègues² proposent le schéma ci-dessous qui regroupe, en 3 catégories, les services rendus par les batteries à ces réseaux.



Dans son rapport spécial, l'AIE détaille l'ensemble de ces services en distinguant le stockage par batteries à échelle de réseau, du stockage par batteries en aval du compteur

3.1 Au niveau du stockage par batteries à échelle de réseau, le déplacement d'énergie est le principal service, notamment dans les systèmes électriques intégrant de fortes proportions d'énergies renouvelables variables (ERV) avec des coûts marginaux proches de zéro. Les batteries se chargent aux heures creuses quand la demande est faible, par exemple lorsque la production photovoltaïque solaire atteint son maximum pendant la journée, et se déchargent aux heures de pointe lorsque la demande est élevée, par exemple le soir lorsque les panneaux solaires ne produisent pas d'électricité. Le déplacement d'énergie peut être directement monétisé et l'est déjà dans les marchés d'électricité concurrentiels.

En raison de leur réactivité quasi-instantanée, les batteries se sont révélées idéales pour la **fourniture de services auxiliaires**, tels que la régulation de fréquence, le maintien de la tension et les réserves opérationnelles. Elles constituent un excellent substitut aux générateurs diesel pour le **rétablissement de service** après un déclenchement général. Équipées **d'onduleurs à formation de réseau**, elles peuvent fournir aux réseaux à forte proportion d'ERV de **l'inertie et de la puissance de court-circuit**, en lieu et place des

² Sarah Toth Kotwis, Ashtin Massie, Abigail Araya, Drew Beyer, Batteries: The Workhorse of an Affordable, Reliable Grid, September 10, 2025, <https://iea.blob.core.windows.net/assets/cb39c1bf-d2b3-446d-8c35-aae6b1f3a4a0/BatteriesandSecureEnergyTransitions.pdf>

centrales thermiques conventionnelles mises hors services. « *La fourniture de services auxiliaires est devenue ces dernières années une source de revenus importante pour le stockage par batterie sur plusieurs marchés dans le monde. Elle représente plus de 15 % des nouveaux déploiements de projets de batteries chaque année, en particulier pour les batteries offrant une capacité de stockage d'une à deux heures* », indique l'AIE.

Onduleur à formation de réseau

Un onduleur à formation de réseau (grid-forming inverter) fonctionne de manière à créer et à maintenir une tension et une fréquence stables sur un réseau électrique, même en l'absence d'une source d'alimentation principale. Voici les étapes clés de son fonctionnement :

1. **Détection de la tension et de la fréquence** : l'onduleur détecte la tension et la fréquence du réseau électrique pour déterminer si elles sont dans les limites acceptables.
2. **Génération de la tension et de la fréquence** : si le réseau électrique est absent ou instable, l'onduleur génère une tension et une fréquence stables pour former un réseau électrique stable.
3. **Contrôle de la puissance** : l'onduleur contrôle la puissance active et réactive injectée dans le réseau électrique pour maintenir la stabilité et la qualité de l'énergie.
4. **Synchronisation avec le réseau** : lorsque le réseau électrique principal est rétabli, l'onduleur se synchronise avec celui-ci pour assurer une transition transparente.
5. **Fonctionnement en mode îloté** : l'onduleur peut fonctionner en mode îloté, c'est-à-dire qu'il peut alimenter un réseau électrique isolé sans être connecté au réseau principal.

Les onduleurs à formation de réseau utilisent des algorithmes de contrôle avancés et des composants électroniques de puissance pour assurer une stabilité et une qualité de l'énergie élevées. Ils sont essentiels pour l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux électriques et pour améliorer la résilience des systèmes énergétiques.

Source : Meta AI

Les batteries à échelle de réseau fournissent les capacités nécessaires pour **assurer l'adéquation des ressources**, soit un approvisionnement suffisant en permanence pour répondre à la demande tant en régime normal que de pointe. Sur les marchés concurrentiels, comme en Grande Bretagne, des contrats à moyen et long terme de fourniture de capacité sont devenus des sources de revenus pour les stockages par batteries. Ailleurs dans le monde ces actifs de stockage sont monétisés grâce à des accords d'achat d'électricité qui rémunèrent leur disponibilité pour soutenir le fonctionnement des réseaux, indique l'AIE citant le cas du projet de batterie de Boulouparis en Nouvelle-Calédonie qui a reçu de l'opérateur de réseau local un contrat de ce type sur 12 ans.

Elles peuvent être et sont mises à contribution dans la **gestion des congestions** sur les réseaux de transport et de distribution, ce qui permet de minimiser le besoin d'investissement dans ces réseaux. Elles agissent comme des «**boosters**» **de réseau** (grid-booster) permettant de résorber les congestions en augmentant les capacités des réseaux

dans les goulots d'étranglement. Cette utilisation du stockage par batterie à échelle de réseau a commencé à prendre sa place dans le système électrique allemand dont le régulateur vient d'approuver 950 MW d'installations de stockage dans le cadre du plan de développement du réseau national, indique l'AIE. Un total de 450 MW de ces installations sont déjà en cours de construction

Booster de réseau

Un booster de réseau est un système de stockage d'énergie par batterie à échelle de réseau qui stabilise rapidement le réseau électrique en absorbant ou en injectant de l'énergie pendant les fluctuations. Son objectif principal est d'accroître la capacité et la fiabilité des lignes électriques existantes, de prévenir les congestions et de réduire les coûts liés à la gestion du réseau. Les amplificateurs ou booster de réseau contribuent également à l'intégration d'énergies renouvelables. Voici comment fonctionne un booster de réseau

- **Gère les goulots d'étranglement** : Lorsqu'une surcharge se produit sur une ligne de transmission, le surpresseur de réseau injecte de l'énergie derrière le goulot d'étranglement pour éviter un déclenchement et maintenir la stabilité du réseau.
- **Se charge et se décharge instantanément** : Il peut stocker rapidement l'excès d'énergie et le libérer en cas de besoin, ce qui en fait un outil dynamique et réactif pour équilibrer le réseau.
- **Améliore l'efficacité** : En utilisant mieux les lignes électriques existantes, les amplificateurs de réseau peuvent réduire le besoin de nouvelles infrastructures de transmission et diminuer les coûts de gestion de la congestion et de « redispatching »

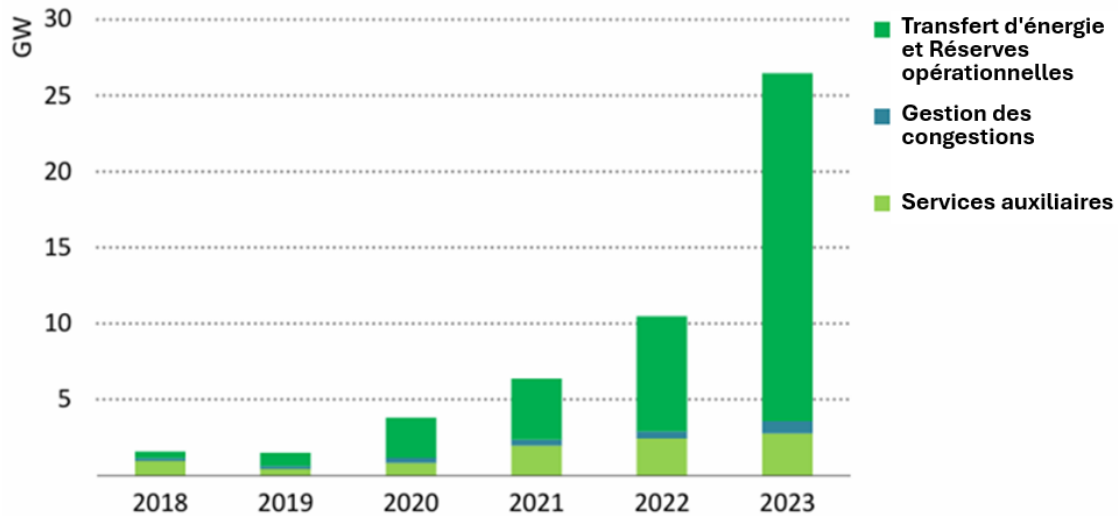
Source : Meta IA

L'AIE signale que dans les marchés concurrentiels où les monopoles de production, de transport et de distribution sont séparés (unbundling), ces dispositifs de gestion de la congestion doivent être fournis par des tierces parties. La comparaison de leurs coûts et bénéfices à ceux des renforcements de réseau détermine les choix des opérateurs de réseau. En 2022-23, au Royaume Uni, ces dispositifs représentaient plus de 30 % des contrats attribués, soit près de 600 MW de capacité de stockage. Aux États-Unis et notamment à New York et en Californie, des opérateurs de systèmes de distribution y recourent de plus en plus comme codétenteurs ou par des contrats d'achat auprès de tiers.

Les stockages par batteries de grande capacité sont de plus en plus mis à contribution par les régulateurs, en Australie et aux États-Unis notamment, dans le développement **de micro-réseaux destinés aux infrastructures critiques** comme les hôpitaux ou les grands consommateurs industriels, pour en augmenter la résilience. On y recourt aussi pour les services aux communautés à faible revenu ou défavorisées.

Plusieurs applications se sont développées et continuent de se développer autour des batteries à échelle de réseau. Les plus importantes, dans le contexte du déploiement rapide des ERV, restent cependant le déplacement d'énergie et l'adéquation de ressources ainsi que le montre le graphique ci-dessous.

Ajouts de capacité du stockage par batterie à échelle de réseau selon les services rendus, 2018-2023



Le transfert d'énergie et la fourniture de capacité de pointe sont les principales applications des batteries à échelle installées ces dernières années.

Source: IEA, Batteries and Secure Energy Transitions, 2024

3.1 Les systèmes de stockage par batterie en aval du compteur, rappelons-le, sont installés chez les utilisateurs finaux, résidentiels, commerciaux ou industriels. Ils sont directement connectés aux installations d'ERV locales, très souvent du solaire photovoltaïque, en aval des compteurs et sans connexion dédiée au réseau. Ils font partie, indique l'AIE, d'un ensemble de ressources énergétiques distribuées dont l'importance va croissant avec l'intégration des énergies renouvelables. Ils apportent tant aux consommateurs qu'au réseau électrique des avantages indéniables au niveau des coûts et de la sécurité d'approvisionnement.

3.1.1 Les avantages aux consommateurs sont multiples. Les batteries en aval du compteur leur permettent i) d'accroître leur autoconsommation et de réduire de la sorte les quantités d'électricité que leur fournit le réseau, ii) de bénéficier des avantages de la tarification dynamique avec effacement à la pointe et iii) de réduire la puissance souscrite et donc les coûts qui y sont liés. Toutes ces mesures contribuent à réduire notablement leur facture d'électricité. Par ailleurs les systèmes individuels de batterie en aval du compteur peuvent être regroupés pour former des centrales électriques virtuelles (VPPs – Virtual Power Plants) pouvant participer au marché de l'électricité et procurer des gains monétaires substantiels à leurs propriétaires. En plus de ces avantages économiques, ces systèmes renforcent la fiabilité de l'approvisionnement en électricité en fournissant une alimentation de secours en cas de panne de réseau, ce qui est particulièrement avantageux pour des installations qui ne peuvent tolérer les interruptions de courant (hôpitaux, industrie, clients vulnérables)

Les centrales électriques virtuelles (VPP)

Les centrales électriques virtuelles (VPP) regroupent des ressources énergétiques distribuées, notamment des batteries installées chez les consommateurs, des énergies renouvelables distribuées et des charges flexibles, et les exploitent comme une source d'électricité unique. Pour mettre en place une VPP, chaque ressource énergétique distribuée est connectée à un système de contrôle centralisé qui optimise leur fonctionnement collectif en réponse aux signaux des marchés et des gestionnaires de réseau. Contrairement aux batteries individuelles installées chez les consommateurs, dont l'interaction avec le réseau est limitée, les VPP fonctionnent comme des centrales électriques traditionnelles en termes de services qu'elles peuvent fournir et de marchés auxquels elles participent. Si la réglementation le permet, elles peuvent vendre de l'électricité sur les marchés de gros et fournir des services auxiliaires, contribuant ainsi à la sécurité d'approvisionnement en électricité. Cependant, elles se distinguent des grandes centrales électriques traditionnelles par leur capacité à réagir avec flexibilité aux contraintes des réseaux locaux en ajustant la production de chaque ressource énergétique qui les compose. Cela en fait une ressource potentiellement précieuse pour la gestion de la congestion des réseaux de transport et de distribution.

Les VPP offrent aux propriétaires de batteries installées chez les consommateurs une opportunité supplémentaire de monétiser leur capacité de stockage d'énergie. Selon les prix du marché et les structures tarifaires, la participation à une VPP peut être plus avantageuse financièrement que la simple maximisation de l'autoconsommation.

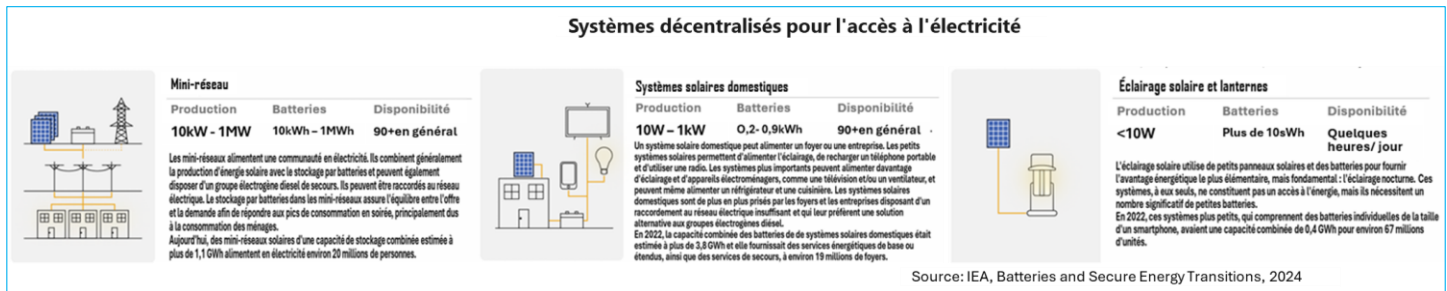
Source : AIE, Battery and secure energy transitions, 2024

3.1.2 Vu du réseau électrique, les batteries en aval du compteur peuvent fournir plusieurs des services que procurent les batteries à échelle de réseau. Avec les bons signaux prix et les incitatifs appropriés, elles peuvent contribuer à i) réduire la demande sur l'ensemble du réseau ii) atténuer les contraintes sur le réseau en écrêtant les pointe de charge et iii) fournir de la réserve de puissance, indique l'AIE. Leur impact, surtout local, permet de différer les investissements de renforcement ou de modernisation des réseaux de distribution. Lorsqu'elles sont regroupées en VPP, elles peuvent fournir les différents services auxiliaires comme la régulation de fréquence, le maintien de la tension et les réserves opérationnelles. Tout dépend cependant des cadres réglementaires en place, des structures tarifaires en vigueur pour les utilisateurs finaux, ainsi que des règles régissant l'accès au marché pour les agrégateurs. Le déploiement des compteurs intelligents fait aussi partie des conditions de base pour tirer avantage de tous les services que peuvent fournir au réseau les batteries en aval des compteurs.

4. Les batteries facilitent l'accès à l'électricité

L'accès universel aux services énergétiques modernes est l'une des principales composantes de la transition en cours dans le système énergétique mondial et, partant, dans la transition économique et sociale. L'Accès pour tous à l'électricité et à la cuisson propre participe des stratégies déployées pour réaliser cet objectif.

En ce qui concerne l'électricité, 80% des personnes qui n'y ont pas encore accès vivent dans des zones éloignées des réseaux électriques nationaux. Dans ces zones généralement peu peuplées avec des niveaux de demande d'électricité faibles, l'extension des réseaux est souvent très coûteuse et nécessite de longs délais. Les systèmes hors réseau, bâtis autour du stockage par batteries, offrent une solution pragmatique. Le schéma ci-dessous propose les trois modèles développés et en cours de déploiement dans toutes les régions concernées du monde, et notamment en Afrique subsaharienne.



L'utilisation de ces systèmes s'est rapidement et largement répandue. En 2023, indique l'AIE, ils ont représenté 50% des nouveaux raccordements en Afrique. Plusieurs facteurs concourent au renforcement de leur attractivité, précise-t-elle, la baisse soutenue des coûts des modules photovoltaïques solaires et des technologies de batteries, la mise au point de systèmes modulaires faciles à installer et de modèles de financement innovants tels que PayGo. Ils ont de ce fait, largement supplanté des alternatives telles que les générateurs à combustibles fossiles, comme les centrales diesels.

PayGO

Les modèles de financement PayGo, ou « Pay-as-you-go » (payer à l'usage), permettent aux clients de payer pour un produit ou un service en petites sommes, souvent à la demande, plutôt qu'un coût initial élevé ou un abonnement fixe. Ils ont été popularisés dans les pays en développement pour l'accès à des biens comme l'énergie solaire, et aussi pour des services de télécommunications, de transports ou d'assurance. Leurs principales caractéristiques sont les suivantes :

Paiements fractionnés et flexibles : Les clients paient à l'usage, souvent en petites sommes qui s'accumulent en fonction de leur utilisation réelle du service ou du produit.

Paiements différés : Il s'agit généralement d'un acompte à l'achat, suivi de paiements fractionnés jusqu'à ce que le coût total soit couvert.

Accessibilité : Il permet à des personnes n'ayant pas accès au crédit traditionnel ou aux grandes sommes d'acheter des biens de valeur, comme des kits solaires ou des smartphones.

Technologie mobile : La technologie mobile est essentielle pour le suivi des paiements et le fonctionnement du système.

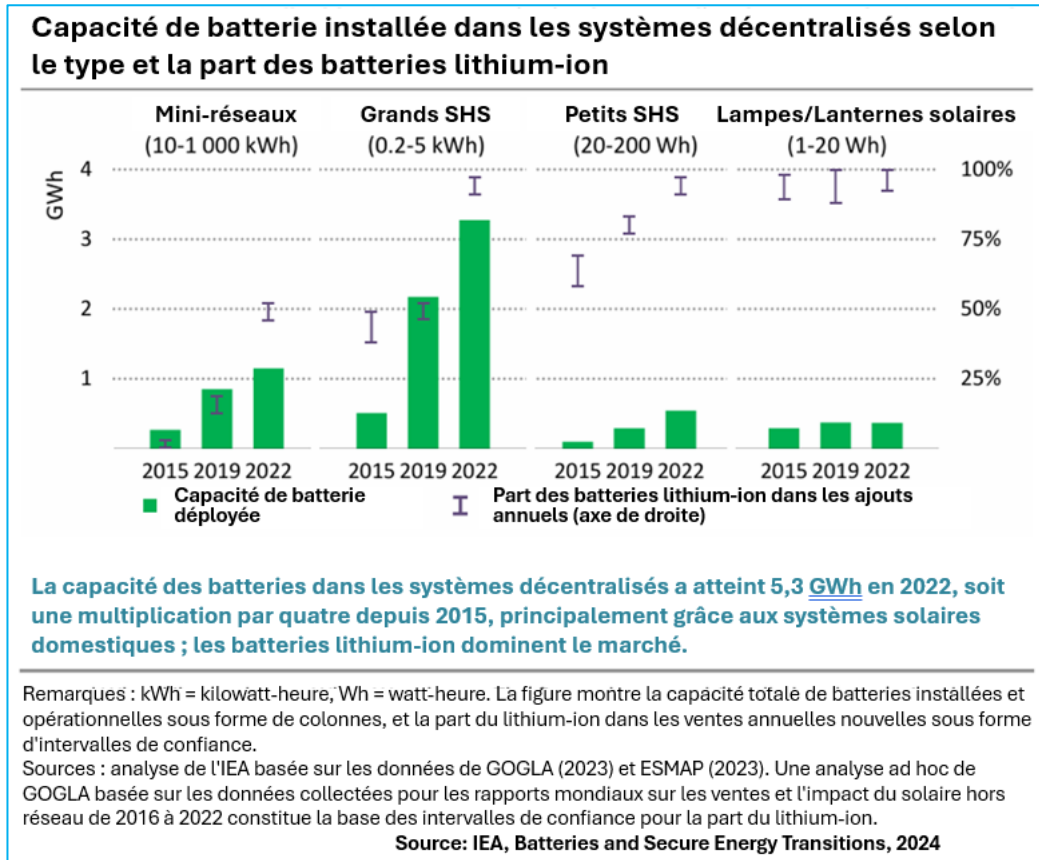
Paiement à l'usage : Le modèle est basé sur la valeur réelle d'un service, sans abonnement fixe ou engagement à long terme.

Fermeture à distance du service : Les entreprises peuvent bloquer à distance le service (par exemple, l'énergie solaire) en cas de non-paiement, minimisant le risque d'investissement pour l'entreprise.

Source : Meta IA

Les enjeux de continuité de service et de qualité de l’approvisionnement sont en train d’imposer ces systèmes comme alimentation de secours, en lieu et place des centrales diésels, dans plusieurs grandes villes d’Afrique subsaharienne et même dans les zones rurales connectées au réseau national. Au Nigeria, on estime que trois systèmes solaires domestiques sur quatre vendus sont utilisés dans cette perspective.

Le graphique ci-dessous donne une bonne idée des capacités des types de batteries installées dans les différents systèmes décentralisés. Les batteries lithium-ion dominent le marché.



Les défis à relever pour que ces systèmes jouent pleinement leur rôle dans la transition en cours restent importants. La baisse des coûts, ceux des batteries notamment, est essentielle pour que les prix restent abordables. Les défaillances pour composants défectueux, non testés ou à faible coût, ainsi qu'une mauvaise exploitation ou une maintenance pas à la hauteur restent des défis de taille.

5. Conclusion

Ce numéro du bulletin porte sur le stockage d'énergie par batterie dans le système électrique et sur la variété des services qu'il lui procure. Il s'appuie principalement sur le rapport spécial Batteries and Secure Energy Transitions de l'Agence Internationale de l'énergie (AIE-IEA) pour donner un aperçu de ces services et de leur portée, avec, en amont,

une présentation succincte du rapport et quelques indications sur le niveau de déploiement actuel et futur des batteries dans le système électrique mondial.

Le stockage d'énergie par batterie a été introduit dans le système électrique avec les énergies renouvelables variables (ERV – solaires photovoltaïques, éoliennes), principalement pour en palier l'intermittence. Il y est venu compléter les systèmes traditionnels de stockage d'énergie propre à grande échelle comme le pompage-turbinage hydroélectrique. On distingue, dans ce contexte, les batteries à échelle de réseau (connectées directement aux réseaux de transport et de distribution), les batteries en aval du compteur et les batteries pour mini-réseaux et systèmes domestiques dédiés aux projets d'accès universel aux services énergétiques modernes.

Les capacités installées de ces batteries ont évolué avec la part des ERV dans le système. Selon l'AIE, elles ont connu une croissance exponentielle au cours de la dernière décennie. Elles sont ainsi passées de 1 GW en 2013, à plus de 85 GW en 2023, année qui a vu un ajout de 42 GW, plus du double de la quantité ajoutée en 2022. Ce rythme de croissance est appelé à se poursuivre et même à s'accroître, selon l'AIE, pour mettre les capacités de stockage par batterie au niveau des puissances installées d'ERV que requiert la réalisation de la carboneutralité d'ici 2050. Selon le scénario Zéro Émissions Nettes d'ici 2050 (NZE2050) de l'AIE, ces capacités doivent être multipliées par 14 pour atteindre 1 200 GW d'ici 2030, et par environ 60 pour atteindre 5 000 GW d'ici 2050.

Le stockage d'énergie par batterie procure au système électrique les services traditionnels i) de déplacement d'énergie dans le temps, ii) de fourniture de services auxiliaires, tels que la régulation de fréquence, le maintien de la tension et les réserves opérationnelles, et iii) d'adéquation de ressources, avec cependant plus de flexibilité et de rapidité. Au-delà de ces services, il a permis d'introduire dans le système électrique des fonctions nouvelles, comme celles de booster de réseau pour la résorption des congestions ou de formation de réseau à travers des onduleurs conçus pour maintenir la stabilité du réseau. Avec le déploiement des systèmes individuels de stockage en aval des compteurs, il a permis de démultiplier les ressources énergétiques réparties et de donner au consommateur le pouvoir de s'autoalimenter, de tirer avantage de la tarification dynamique ou de limiter sa puissance souscrite et, partant, de réduire, voire d'annuler sa facture d'électricité. La possibilité de se regrouper en centrales électriques virtuelles (VPP – Virtual Power Plants) qu'offrent ces systèmes individuels, ouvre à leurs propriétaires des perspectives d'accès au marché de l'électricité et à des gains monétaires substantiels.

Pour tirer avantage de tous ces services que les batteries peuvent fournir au réseau et de la sorte réussir la transition en cours, les cadres réglementaires en place, les structures tarifaires en vigueur pour les utilisateurs finaux, les règles régissant l'accès au marché pour les agrégateurs, doivent être portés aux niveaux requis. Le déploiement des compteurs intelligents participe aussi de cette mise à niveau.

La série de mesures clés que propose l'AIE dans le dernier chapitre de son rapport spécial, s'agissant notamment des réformes institutionnelles et réglementaires, et des investissements nécessaires, s'inscrit pleinement dans cette perspective.