

**Commission économique pour l'Europe****Comité de l'énergie durable****Groupe d'experts de l'efficacité énergétique****Dixième session**

Genève, 5 et 6 octobre 2023

Point 8 de l'ordre du jour provisoire

Améliorer l'efficacité énergétique dans l'industrie**Faire progresser la résilience énergétique et la décarbonisation dans la région de la CEE : exploiter le potentiel du stockage de l'énergie et de la flexibilité de la demande*****Note du secrétariat***Résumé*

Le Comité de l'énergie durable et ses organes subsidiaires ont présenté un large éventail de recommandations techniques (CSE-31/2022/INF.2) et de mesures à prendre (ECE/ENERGY/146) pour mettre en place des systèmes énergétiques résilients dans la région de la CEE.

Compte tenu du recours croissant aux énergies renouvelables à production intermittente, le stockage est considéré comme un moyen intéressant de stocker de grandes quantités d'énergie afin de faire le meilleur usage de ressources faiblement carbonées et de préserver la sécurité énergétique. L'interconnexion des systèmes énergétiques et le stockage de l'énergie au niveau du système ou du consommateur final favorisent à la fois la résilience énergétique et la résolution de nombreux problèmes relatifs à l'énergie. Il n'existe pas de solution universelle, mais un bouquet de solutions qui permet de faire face à n'importe quelle situation, de s'adapter à n'importe quel contexte ou d'atteindre n'importe quel objectif.

Mettre au point des ressources consacrées à la promotion du stockage de l'énergie et mieux en comprendre le potentiel, les exigences et les autres aspects fait par conséquent partie du plan de travail de la plateforme de la CEE sur les systèmes énergétiques résilients. Le présent document propose des pistes pour de futures recherches sur le sujet.

* Il a été convenu que le présent document serait publié après la date normale de publication en raison de circonstances indépendantes de la volonté du soumetteur.



I. Introduction

1. Le stockage de l'énergie peut devenir un élément essentiel dans la réalisation de multiples objectifs. Il peut notamment permettre de mettre en place un accès fiable à des sources d'énergie non polluantes, de combler les déséquilibres entre l'offre et la demande, de réduire l'incidence des coûts de l'énergie ou encore d'écarter les pics de demande. Les besoins et les motivations qui sous-tendent ces objectifs varient, au même type que les types, les formes et la nature du stockage de l'énergie. Il est par conséquent nécessaire de créer un socle qui donne aux acteurs les outils dont ils ont besoin pour prendre des décisions éclairées sur la façon d'obtenir les résultats souhaités tout en exploitant leur potentiel et en évitant de créer des effets de verrou. Il convient notamment de bien connaître les aspects qui doivent être pris en considération et les types de stockage qui sont adaptés à tel ou tel contexte.

2. Pour déterminer quelles sont les solutions adéquates, il est indispensable d'en comprendre les forces et les faiblesses, de discerner les possibilités et les risques inhérents à chaque type de stockage en fonction du cas d'utilisation ou du résultat attendu et de savoir quels sont les aspects à prendre en considération lors de l'évaluation de ces éléments. Il peut par exemple s'agir des éléments suivants : la densité énergétique, l'effet mémoire, la durabilité, le coût d'acquisition, la place nécessaire, les délais de décharge, la puissance, la température, les matériaux requis (matériaux essentiels ou autres), la réparabilité, la recyclabilité ou l'empreinte environnementale. Pour prendre des décisions éclairées concernant le stockage d'énergie, il importe en outre de connaître les taux d'utilisation nécessaires, les schémas temporels et les autres facteurs favorables ou limitants afin d'adapter le bouquet de solutions et de dimensionner les solutions de stockage en fonction des critères de viabilité économique.

3. Le potentiel qu'offre le stockage de l'énergie ne pourra être pleinement exploité que s'il est considéré dans un cadre plus général et en association avec des approches fondées sur la flexibilité de la demande dans les différents secteurs de consommation. C'est pourquoi, pour exploiter le potentiel du stockage de l'énergie et de la flexibilité de la demande, il convient de relier entre eux tous les domaines de travail de la CEE se rapportant à l'énergie durable (l'efficacité énergétique, les énergies renouvelables, les systèmes de production moins polluante d'électricité, le gaz, le méthane provenant des mines de charbon, la transition juste et la gestion des ressources) et des domaines thématiques tels que les transports, le développement urbain, le logement, l'aménagement du territoire et l'environnement.

4. Le présent document décrit brièvement ce qu'est le stockage de l'énergie, les formes qu'il peut prendre, les formes d'énergie qui peuvent être stockées et les conditions dans lesquelles il peut s'adapter à la flexibilité de la demande.

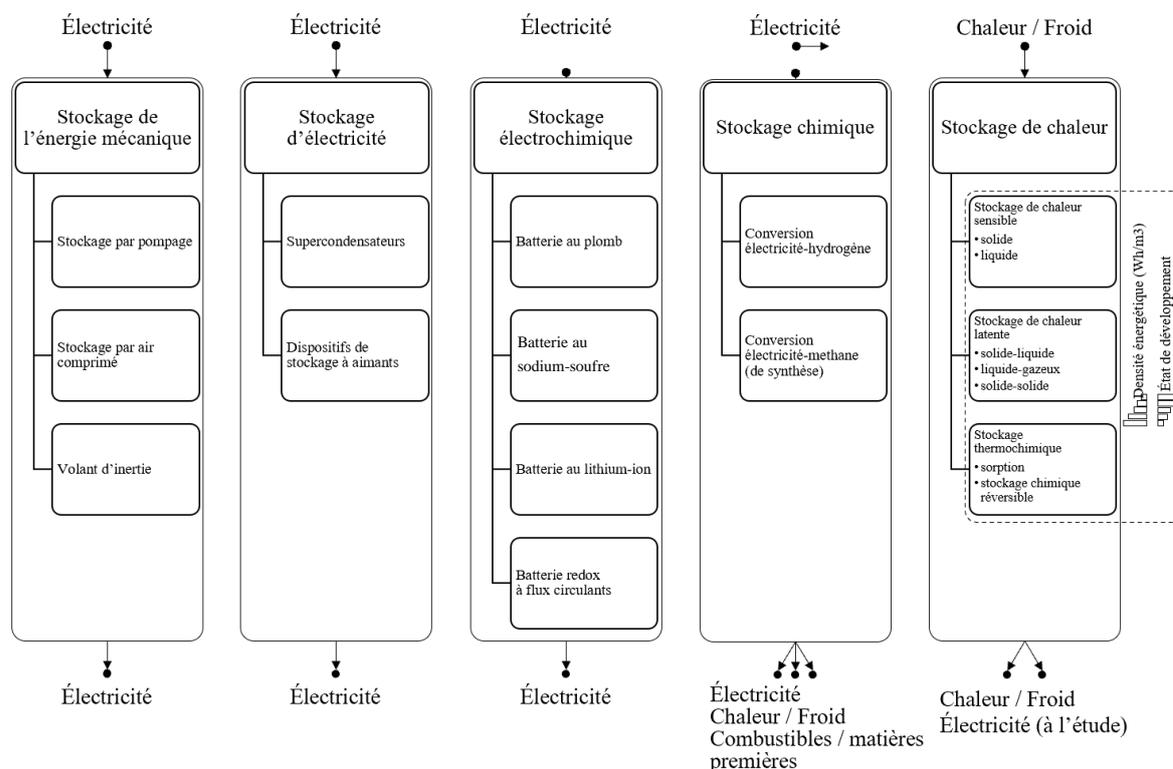
II. Stockage d'énergie

5. Le stockage d'énergie permet de stocker pour une utilisation ultérieure une énergie qui est disponible mais dont on n'a pas besoin actuellement. Il s'accompagne d'une conversion du type d'énergie et entraîne forcément des déperditions à la fois pendant le stockage et pendant la conversion, ce qui montre combien il importe de trouver des solutions adéquates permettant d'optimiser l'efficacité systémique et, donc, la performance énergétique globale.

Catégorisation par type d'énergie

6. Les installations de stockage d'énergie sont catégorisées en fonction du type d'énergie stockée (sous sa forme primaire). Toutefois, il est fréquent qu'un autre type d'énergie soit utilisé pendant que l'unité de stockage est chargée ou déchargée (fig. I).

Figure I
Aperçu des solutions de stockage d'énergie



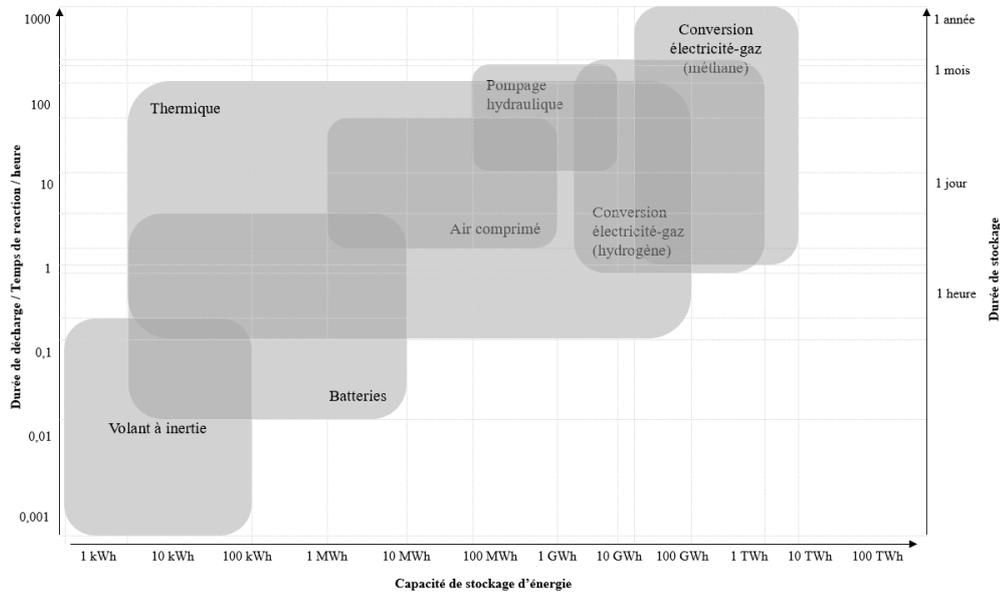
Source : Adapté de Michael Sterner et Ingo Stadler, « Energiespeicher im Wandel der Zeit », *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*, Michael Sterner et Ingo Stadler, eds. (Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017) ; Emde, « Techno-oekonomische Bewertung von energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeichern » (2023) ; BVES.

Catégorisation par durée de stockage

7. On peut distinguer le stockage de court terme et le stockage de long terme en fonction de la période sur laquelle l'énergie doit être stockée (fig. II). Différentes solutions sont employées en fonction des durées envisagées. On peut distinguer les durées suivantes :

- Quelques minutes au maximum (fluctuations de l'alimentation) ;
- Une journée au maximum (typique pour le photovoltaïque) ;
- Trois jours maximum (alimentation aléatoire) ;
- De une à deux semaines (période prolongée de vent fort ou faible) ;
- Équilibrage saisonnier.

Figure II
Comparaison des durées de décharge et des capacités de certaines solutions de stockage d'énergie



Source : Adapté de Bahman Shabani et Jason Moore, « A Critical Study of Stationary Energy Storage Policies in Australia in an International Context: The Role of Hydrogen and Battery Technologies », *Energies*, 9(9):674 (août 2016).

8. La connaissance de facteurs déterminants supplémentaires permet de mieux cibler les types de stockage réalisables en fonction de l'utilisation souhaitée, des formes d'énergie disponibles et de la forme d'énergie que l'on souhaite produire : puissance maximale (MW), durée de vie exprimée en nombre de cycles de charge, efficacité (en pourcentage), auto-décharge (en pourcentage par heure), coût de l'investissement par kWh de capacité de stockage, coût par kWh stocké, énergie spécifique (Wh/kg), densité énergétique (Wh/m³), temps de décharge typique pour une taille habituelle, limite de capacité inhérente au système, inflammabilité, toxicité, matières premières requises, réparabilité et recyclabilité, etc.

9. Le type de stockage retenu est pour une bonne part déterminé en fonction du domaine dans lequel on souhaite l'utiliser, les différents groupes de facteurs susmentionnés pouvant être un élément prioritaire ou, au contraire, un facteur limitant. On peut, pour l'essentiel, répartir les types de stockage en sous-catégories selon que le stockage s'effectue au niveau du système (infrastructures, y compris les systèmes d'éclairage public autonomes ou qui ne sont pas raccordés au réseau électrique), de la production d'énergie (stockage de l'excédent d'énergie produite par les parcs éoliens, les usines marémotrices, les centrales solaires, les installations de combustion et autres), les systèmes énergétiques (stabilisation des réseaux), ou le stockage au niveau du consommateur (bâtiments, installations industrielles ou véhicules).

10. L'utilisation de solutions de stockage d'énergie obéit à des objectifs divers :

a) Au niveau des systèmes, les objectifs recherchés peuvent notamment consister à éviter de perdre l'excédent d'énergie renouvelable qui ne peut pas être absorbé par le réseau (écrêtement), à réduire les goulots d'étranglement énergétiques, à éviter les pénuries régionales et à stabiliser le réseau (c'est-à-dire à réduire le besoin de recourir à des centrales électriques de réserve pour assurer l'alimentation de base et à stabiliser la volatilité de la production d'énergie renouvelable) ;

b) Côté offre, ces objectifs consistent notamment à éviter de vendre l'énergie à perte, à être en mesure de fournir de l'énergie supplémentaire pour pallier les brèves périodes de pénurie et, dans le cas des fournisseurs et des consommateurs locaux, à stocker l'excédent d'électricité ou de chaleur ;

c) Les objectifs des industriels et de la plupart des autres consommateurs peuvent se diviser en plusieurs catégories : optimisation (déplacement de la charge par le commerce de l'énergie, optimisation de la consommation, récupération, écrêtement des pics, intégration des ressources énergétiques renouvelables, utilisation de la flexibilité pour optimiser les coûts), sécurité de l'approvisionnement en énergie (réduction de la dépendance vis-à-vis des fournisseurs extérieurs, stabilisation de la production, continuité de l'approvisionnement) et création de revenus supplémentaires (délestages et augmentations de la charge, mise en place de dispositifs d'équilibrage ou de charges déconnectables).

11. Compte tenu des énergies disponibles (obtenues depuis l'extérieur ou gaspillées par ailleurs), du résultat souhaité (température, pression d'air, poids à soulever, luminosité), des buts et limitations des solutions techniques et de leurs cas d'utilisation, on considère que l'efficacité systémique, pour une combinaison d'éléments donnés, est atteinte lorsqu'une quantité minimum d'énergie est consommée pour atteindre les objectifs, à savoir le type d'énergie, la conversion nécessaire, le type de stockage remplissant les conditions souhaitées et le type de matériel utilisé (sous réserve qu'il assure les résultats techniques visés).

III. Flexibilité de la demande d'énergie

12. La résilience énergétique et la décarbonisation imposent de considérer les choses au-delà de la production d'énergie, de son acheminement et du stockage de l'énergie excédentaire. Les mesures qui permettent d'exploiter la flexibilité de la demande d'énergie contribuent à atteindre plus rapidement les objectifs recherchés, car elles consistent à s'adapter à un approvisionnement instable, intermittent, insuffisant ou sensible aux fluctuations des prix. Ce but peut être atteint en ajustant la demande d'énergie de quatre manières principales :

- a) En ajustant la consommation au fil du temps (en privilégiant la consommation en période de forte production d'énergie renouvelable) ;
- b) En encourageant la limitation des capacités (réduction de la consommation lors des pics de charge) ;
- c) En encourageant les hausses de la consommation (augmentation de la consommation pendant les périodes creuses) ;
- d) En faisant légèrement évoluer la consommation pour stabiliser le réseau (variation de la courbe de charge sur de courtes durées).

13. Beaucoup des exemples suivants de mesures permettant d'exploiter la flexibilité de la demande d'énergie dans l'industrie sont reproductibles pour d'autres cas d'utilisation de systèmes énergétiques fixes :

- a) Évolution dynamique de la source d'énergie : en fonction de la disponibilité de l'énergie ou du prix de plusieurs sources d'énergie disponibles ;
- b) Interruption de la production (pause) en fonction des variations des prix de l'énergie : si le prix de l'énergie (quelle que soit la source) dépasse un niveau donné, la production peut être interrompue afin d'optimiser les coûts (si le temps d'acheminement et la charge de travail le permettent) ;
- c) Réagencement de la séquence de production : la séquence des étapes de la séquence de production est modifiée afin d'optimiser les coûts ;
- d) Reprogrammation du lancement de la production ;
- e) Réorganisation de la charge des machines : mettre l'accent sur les processus de production les moins énergivores en période de prix élevés ;
- f) Stockage d'énergie : charger et décharger en fonction des fluctuations des prix de l'énergie au jour le jour ;
- g) Stockage virtuel : stocker l'énergie produite par un processus en cours (électrolyse ou chambres froides par exemple) ;

- h) Ajustement des paramètres de production en fonction d'un profil de charge optimal ;
- i) Ajustement des périodes d'alternance : faire en sorte de produire de l'énergie ou d'augmenter la production lorsqu'on anticipe une baisse des prix de l'énergie (prévisions annonçant des vents ou un ensoleillement importants, ou tarifs de période creuse) ;
- j) Ajustement des interruptions de la production lorsque les prix de l'énergie sont élevés ou en cas de pénurie (ne peut s'appliquer que sur des périodes de pic de courte durée ou sur des installations largement automatisées).

14. Le moyen le plus efficace d'atteindre la résilience énergétique et la décarbonisation est de mettre en place des mesures permettant d'exploiter le potentiel offert par la flexibilité de la demande d'énergie en association avec des solutions de stockage aussi bien locales que systémiques, des solutions de conversion (« power-to-X »), des approches systémiques et des mesures générales ciblant le système énergétique et les consommateurs.

15. Si l'on considère l'ensemble des ressources énergétiques non polluantes disponibles dans la région de la CEE, le problème est moins un problème d'énergie proprement dit qu'une question de distribution et d'utilisation de l'énergie non polluante et d'exploitation des possibilités d'optimisation de l'efficacité énergétique sur le terrain.

16. Plus la part de l'énergie renouvelable dans le système énergétique augmentera, plus la demande de stockage d'énergie à divers niveaux et sous diverses formes augmentera de pair dans la région de la CEE, dont le nombre important de fuseaux horaires traduit aussi une grande variété de modes d'utilisation de l'énergie. Des solutions de stockage, un système énergétique de bonne conception doté d'interconnexions suffisantes et de redondances multiples et les outils numériques peuvent faciliter la résolution de ces problèmes.

17. La tâche consiste à étudier la faisabilité de différentes solutions dans diverses conditions sous les angles technique, financier et climatique ainsi qu'en termes de ressources et de compétences. La conclusion est que le stockage d'énergie apporte de la flexibilité, laquelle, du fait qu'elle permet en partie de régler le problème de volatilité, d'éviter les pertes d'énergie excédentaire et de pallier les périodes de pénurie, augmente la résilience et réduit la nécessité de recourir à des capacités fossiles pour assurer la charge de base et permet de réduire l'empreinte carbone du secteur de l'énergie.

IV. Recommandations

18. Pour exploiter le potentiel que le stockage d'énergie apporte à l'amélioration de la résilience du système énergétique et à sa décarbonisation, il est conseillé de réfléchir aux aspects suivants :

- a) La façon dont les différents types et niveaux de stockage peuvent faciliter et accroître la résilience du système énergétique ;
- b) La façon dont les solutions de stockage d'énergie peuvent accélérer la décarbonisation des transports et en réduire le coût ;
- c) La façon dont le stockage d'énergie et les solutions permettant d'exploiter la flexibilité de la demande peuvent permettre de faire le meilleur usage de l'énergie renouvelable intermittente, y compris la forme d'énergie qui est la mieux adaptée pour stocker l'énergie renouvelable et qui permet l'efficacité systémique la plus élevée ;
- d) Les cadres directifs et les mécanismes réglementaires les plus favorables qu'il convient de mettre en place pour encourager l'adoption et l'intégration de solutions de stockage d'énergie ;
- e) Les moyens, y compris les modèles économiques, qui sont nécessaires pour faire en sorte que les acteurs du système énergétique soient en mesure de déterminer quelles sont les solutions de stockage d'énergie les mieux adaptées, d'évaluer leurs avantages et inconvénients et de mettre en œuvre les solutions applicables ;

f) Les questions concernant les coûts, l'intégration avec d'autres solutions et leur incidence sur l'efficacité énergétique ;

g) Les répercussions des solutions de stockage d'énergie sur l'environnement, de l'extraction à l'élimination, en passant par la recyclabilité et la circularité, ainsi que les matériaux de substitution et l'accès aux matières premières indispensables ;

h) L'accès aux solutions de stockage d'énergie et leur coût dans la région de la CEE, et l'étude de mécanismes de financement éventuels susceptibles de faciliter une introduction et une adoption plus larges de solutions systémiques, locales et micro de stockage d'énergie ;

i) La façon dont la transformation numérique peut contribuer à l'optimisation du stockage d'énergie et permettre d'exploiter la flexibilité de la demande.

19. Il sera peut-être proposé d'envisager de créer une équipe spéciale afin de piloter ces activités.

20. Il convient par ailleurs de souligner la nécessité de prendre en compte la diversité des solutions technologiques, de diffuser les connaissances de façon continue et d'adopter les principes de circularité.
