



Synthèse

Stockage d'électricité par compression adiabatique d'air





Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

Stockage d'électricité par compression adiabatique d'air

Synthèse conjointe



1. Stockage d'électricité par compression adiabatique d'air

Synthèse du projet conjoint du PNR 70
« Stockage d'électricité par compression
adiabatique d'air »



1.1. Résumé

1.1.1. Résumé



La fermeture des centrales nucléaires et le développement de l'énergie solaire et éolienne rendent la production d'électricité plus volatile. De nouveaux systèmes de stockage sont nécessaires pour s'assurer que l'électricité est disponible au moment où elle est nécessaire.

Le stockage adiabatique d'air comprimé représente une technologie prometteuse. Il utilise l'excédent de production des installations solaires et éoliennes pour comprimer l'air ambiant et le stocker dans une cavité souterraine. Au besoin, l'air comprimé est à nouveau détendu et entraîne alors une turbine qui produit de l'électricité. En tirant profit de la chaleur générée lors de la compression, cette technologie atteint un rendement de 65 à 75 %, ce qui est semblable à celui obtenu avec l'accumulation par pompage. En termes de potentiel d'émission de gaz à effet de serre et de dommages aux écosystèmes, la compatibilité environnementale des réservoirs d'air comprimé est également comparable à celle des systèmes à accumulation par pompage.

Les réservoirs d'air comprimé sont techniquement réalisables. Les composants importants, comme les turbomachines et les accumulateurs thermiques, sont déjà disponibles sur le marché ou ont été testés dans une installation pilote. La construction de cavités bénéficie de l'expérience acquise lors de la réalisation de tunnels et de cavernes.

Les réservoirs adiabatiques d'air comprimé constituent par conséquent une solution de stockage efficace, écologique et techniquement réalisable. En raison de leurs coûts d'investissement élevés et du manque de clarté qui entoure leur cadre économique et juridique, leur rentabilité demeure toutefois incertaine. Cela complique également le financement d'une installation de démonstration.



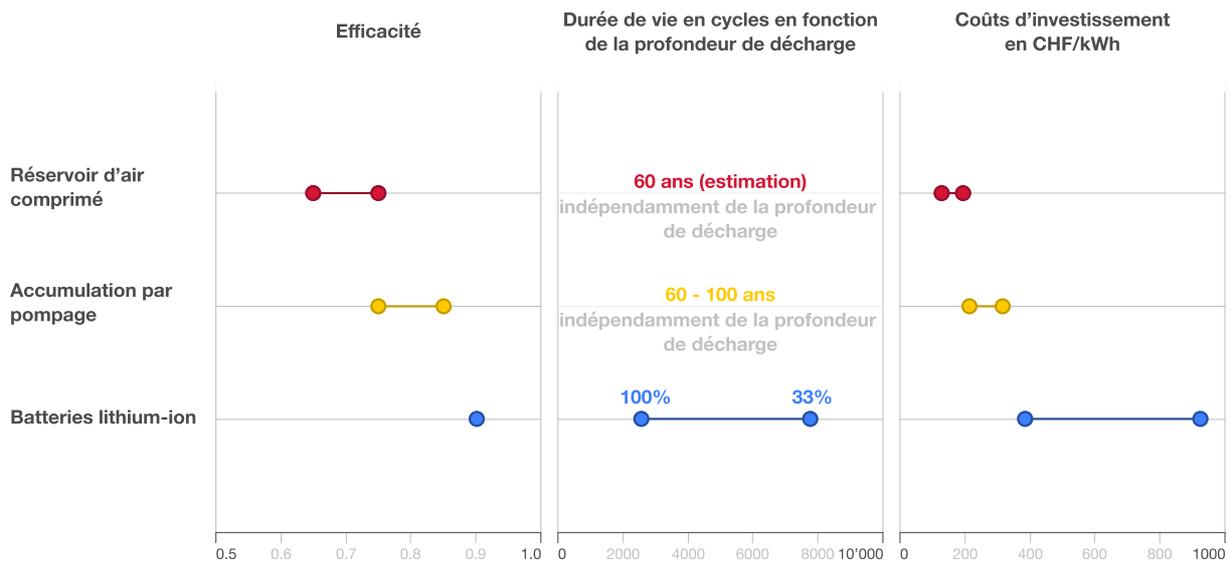
Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

1.2. Messages clés

Durabilité

1.2.1. Les réservoirs d'air comprimé sont efficaces, techniquement réalisables et respectueux de l'environnement



Représentation graphique des données comparatives sur les réservoirs d'air comprimé, les accumulateurs à pompage et les batteries lithium-ion. Source : Sources pour la durée de vie : C. J. Rydh et B. A. Sandén, *Energy analysis of batteries in photovoltaic systems. Part II : Energy return factors and overall battery efficiencies, Energy Conversion and Management*, 46(11–12) :1980–2000, 2005 (pour les batteries lithium-ion), et J. Giesecke, S. Heimerl et E. Mosonyi, « *Wasserkraftanlagen : Planung, Bau und Betrieb* », 6. Auflage, Springer-Verlag, 2014 (pour l'accumulation par pompage). Source pour les coûts d'investissement : « *Lazard's Levelized Cost of Energy Storage* », Version 2.0, décembre 2016 (conversion 1 \$ = 1 CHF).)

Dans l'optique de la Stratégie énergétique 2050, le stockage d'énergie suscite de nombreux débats. Les réservoirs d'air comprimé devraient faire l'objet d'une attention accrue à cet égard, dans la mesure où ils représentent une technologie efficace, techniquement réalisable et respectueuse de l'environnement.

Les réservoirs d'air comprimé avec récupération de chaleur affichent des rendements de l'ordre de 65 à 75 %.¹ Ces valeurs sont proches des valeurs de 75 à 85 % obtenues dans la pratique par les systèmes d'accumulation par pompage. Les systèmes de stockage à air comprimé et par pompage sont moins efficaces que les batteries lithium-ion, qui affichent des rendements autour de 90 %. Face à une telle comparaison, il faut toutefois garder à l'esprit que les dispositifs de stockage à air comprimé ou par pompage ont une durée de vie nettement plus longue et que, à la différence des batteries lithium-ion, celle-ci ne dépend pas de l'ampleur de la décharge.



Aucun obstacle technique majeur ne s'oppose à la construction de systèmes de stockage à air comprimé : les composants importants comme les turbomachines, les accumulateurs thermiques, les moteurs et les générateurs sont déjà disponibles sur le marché ou ont démontré leur aptitude dans une installation pilote ; et la technologie de construction des cavités de stockage bénéficie des nombreuses années d'expérience dans la réalisation de tunnels et de cavernes. Compte tenu des coûts d'investissement élevés et du manque de clarté concernant le cadre juridique et économique, le défi majeur réside dans le financement d'une installation de démonstration.

Sur la base de divers indicateurs, tels que les émissions de gaz à effet de serre, les réservoirs d'air comprimé sont aussi respectueux de l'environnement que les systèmes d'accumulation par pompage. Par rapport à ces derniers, les réservoirs d'air comprimé présentent l'avantage non négligeable de pouvoir être réalisés entièrement sous terre et de ne pas nécessiter l'inondation de vallées entières. On peut par conséquent supposer que l'aménagement de réservoirs d'air comprimé suscitera moins de résistance que la construction ou l'extension d'installations d'accumulation par pompage.

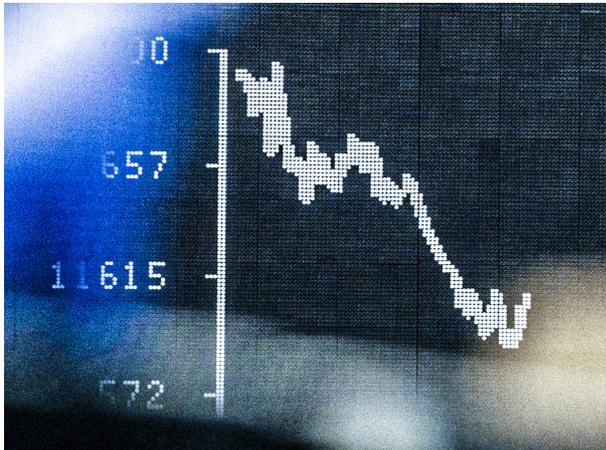
Pour ces raisons, les réservoirs d'air comprimé représentent une technologie de stockage attrayante. En Suisse, ils pourraient s'avérer intéressants pour stocker de grandes quantités d'énergie électrique et en guise d'alternative à l'accumulation par pompage. En outre, les réservoirs d'air comprimé représentent une opportunité économique, en permettant aux entreprises locales d'intervenir dans leur construction ou la fourniture des composants.

Notes et références

1 Un rendement de 75 % signifie que sur 4 kWh d'électricité stockée, 1 kWh est perdu. Les pertes influencent la rentabilité économique et la compatibilité environnementale. Un rendement élevé est notamment important pour les faibles potentiels d'électricité, comme avec l'énergie éolienne et solaire.

Coût / bénéfice # Investissement # Incitations

1.2.2. La rentabilité des réservoirs d'air comprimé demeure incertaine



Selon les calculs, dans des conditions idéales, un réservoir d'air comprimé pourrait s'avérer rentable sur le marché suisse du réglage secondaire¹. Pour vérifier ceci dans des conditions réalistes, des études approfondies sont nécessaires. Toutefois, même si la rentabilité se confirmait, rien ne garantit qu'un fournisseur d'énergie se lancera pour autant dans la construction d'un réservoir d'air comprimé de grande envergure. La raison principale est le risque élevé lié à l'investissement, qui dépend de deux facteurs : d'une part, les coûts d'investissement élevés doivent être amortis sur une longue période ; d'autre part, il n'est pas certain que les conditions-cadres juridiques et économiques du stockage d'énergie évolueront entre-temps.²

Les problèmes de rentabilité ne sont pas spécifiques aux réservoirs d'air comprimé, mais touchent aussi d'autres technologies de stockage. Cela s'explique en partie par les conditions de participation aux marchés de l'énergie, qui ne sont pas adaptées aux caractéristiques techniques des systèmes de stockage. La participation au marché de la puissance de réglage suppose par exemple de respecter des durées minimales et de fournir une puissance constante. Les durées minimales peuvent conduire à des capacités de stockage défavorables à la rentabilité du stockage sur batteries. L'exigence de fourniture d'une puissance constante peut représenter pour les systèmes de stockage d'air comprimé un défi qui fait actuellement l'objet d'études plus poussées.

Le développement des dispositifs de stockage n'est pas seulement freiné en Suisse, mais aussi dans d'autres pays. En Allemagne, par exemple, les exploitants d'installations d'énergie éolienne ou solaire sont indemnisés si le gestionnaire du réseau leur demande de réduire leur production en raison d'une surcharge du réseau. Cela génère de mauvaises incitations, puisque les exploitants d'installations éoliennes et solaires n'ont aucune raison d'investir dans une solution de stockage de l'énergie pour lisser leur production dans le temps.

Notes et références



1 Sur le marché du réglage secondaire, les fournisseurs d'énergie proposent de l'électricité servant à rétablir l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité suite à une perturbation, par exemple en cas de défaillance d'une centrale électrique.

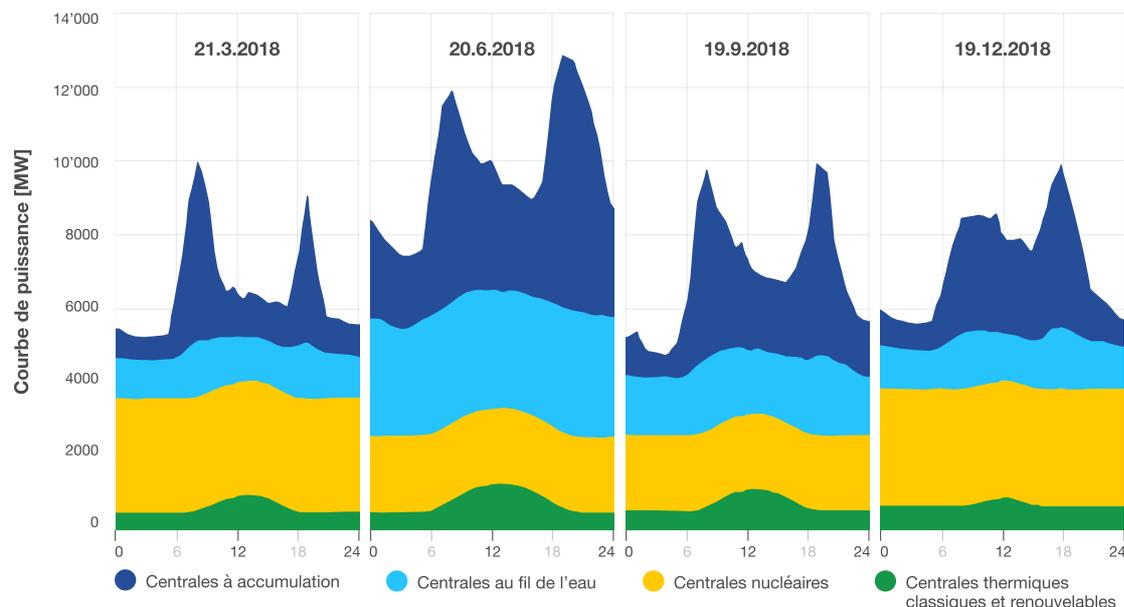
2 Le fort risque lié aux investissements ne se limite pas aux réservoirs d'air comprimé, mais freine également l'extension des lacs de retenue. Cf. « Wo mit der Gletscherschmelze aus neuen Gletscherseen Stauseen werden könnten – und warum keiner sie bauen will », Neue Zürcher Zeitung, 20 septembre 2019.

1.3. Une technologie à fort potentiel

Du fait de la fermeture des centrales nucléaires et du développement des installations solaires et éoliennes, la production d'électricité va devenir plus volatile à l'avenir. Pour garantir à tout moment l'approvisionnement électrique, même lorsque la production est irrégulière, des unités de stockage de grande capacité sont nécessaires. Les réservoirs adiabatiques d'air comprimé s'avèrent idéaux parce qu'ils sont efficaces, techniquement réalisables et respectueux de l'environnement.

CO2 / Gaz à effet de serre # Sécurité de l'approvisionnement

1.3.1. De nouveaux moyens de stockage d'énergie et d'électricité sont nécessaires



Courbe de puissance du 3ème mercredi de mars, de juin, de septembre et de décembre 2018. Source : « *Statistique globale suisse de l'électricité 2018* », Office fédéral de l'énergie, 2019

La prospérité de notre société est, entre autres, basée sur la disponibilité à bas prix d'énergie finale, c'est-à-dire les formes d'énergie utilisées par les consommateurs. En 2018, la consommation d'énergie finale de la Suisse se décomposait comme suit : 49 % de produits pétroliers, 25 % d'électricité et 14 % de gaz.¹ Si l'on veut réduire les émissions de gaz à effet de serre, la consommation de produits pétroliers et de gaz doit diminuer à la faveur de l'électricité.^{2 3}

Une particularité de l'électricité est que la production doit toujours être en équilibre avec les fluctuations quotidiennes, hebdomadaires et mensuelles de la consommation. En Suisse, les fluctuations de la production sont actuellement avant tout compensées par l'importation et l'exportation d'électricité et par les centrales à accumulation. La part stable, appelée charge de base, est essentiellement couverte par les centrales nucléaires et les centrales au fil de l'eau.

Avec la fermeture programmée des centrales nucléaires, la Suisse se retrouve face au défi de devoir couvrir à l'avenir sa charge de base avec des sources d'énergie fluctuantes, telles que l'énergie solaire et éolienne, si elle ne souhaite pas devenir de plus en plus dépendante des importations d'électricité. Ceci nécessite des dispositifs de stockage d'énergie.



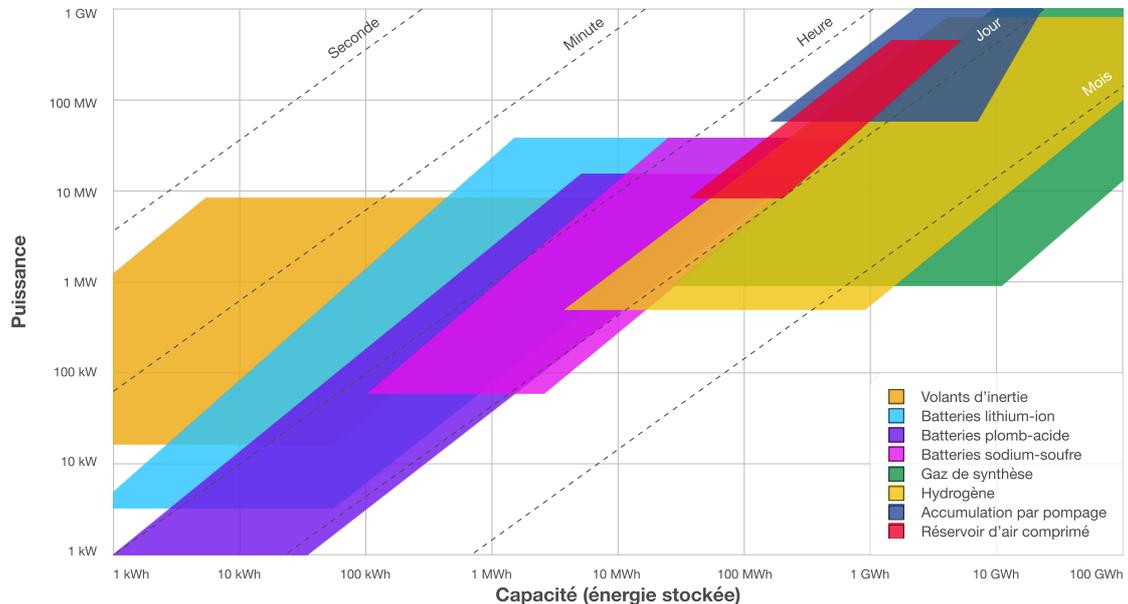
Notes et références

1 « Statistique globale suisse de l'énergie 2018 », Office fédéral de l'énergie

2 G. Andersson, K. Boulouchos et L. Bretschger, « Energiezukunft Schweiz », EPF Zurich, 2011

3 « Quel avenir pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse ? », Académies suisses des sciences, 2012

1.3.2. Méthodes de stockage de l'électricité



Plages de capacité et de puissance et durées de stockage typiques pour lesquelles les différentes technologies de stockage sont considérées comme appropriées en fonction de leurs caractéristiques. Source : : « *Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030* », Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Karlsruhe, 2015

Une particularité de l'électricité est qu'elle ne peut être stockée directement qu'en quantités relativement faibles. Pour la stocker en grandes quantités, l'énergie électrique doit être convertie.

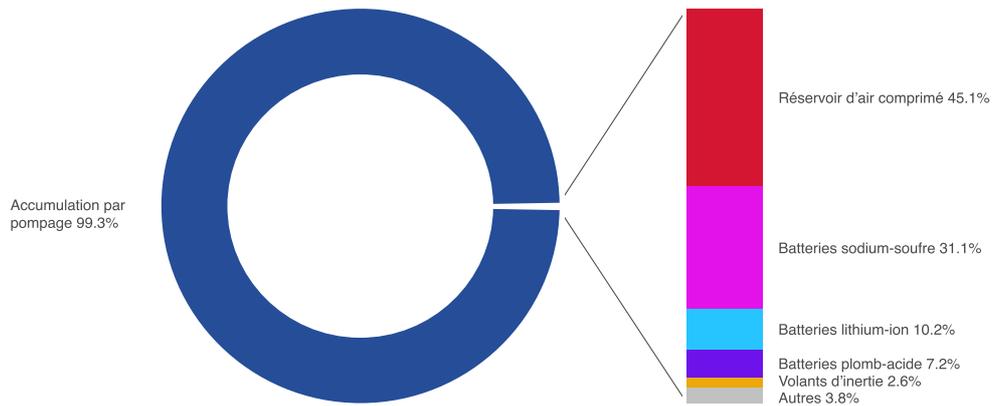
Il existe un large éventail de technologies de stockage :

- Stockage mécanique : accumulation par pompage, réservoirs d'air comprimé, volants d'inertie
- Stockage chimique : hydrogène, gaz naturel de synthèse
- Stockage électro-chimique : batteries
- Stockage de chaleur : sensible, latent, thermochimique

L'efficacité, les performances, les capacités, les besoins en terrains et les coûts de chaque technologie dépendent des processus physiques sous-jacents aux conversions et au stockage, ainsi que de la complexité de la mise en œuvre pratique. Ces paramètres permettent une première évaluation des différents moyens de stockage, dont on peut déduire à quelles plages de capacité et de puissance les différentes technologies sont adaptées. Les réservoirs d'air comprimé, par exemple, sont considérés comme pertinents pour des capacités comprises approximativement entre 10 et 500 MW et des durées de stockage allant de quelques heures à une journée environ.

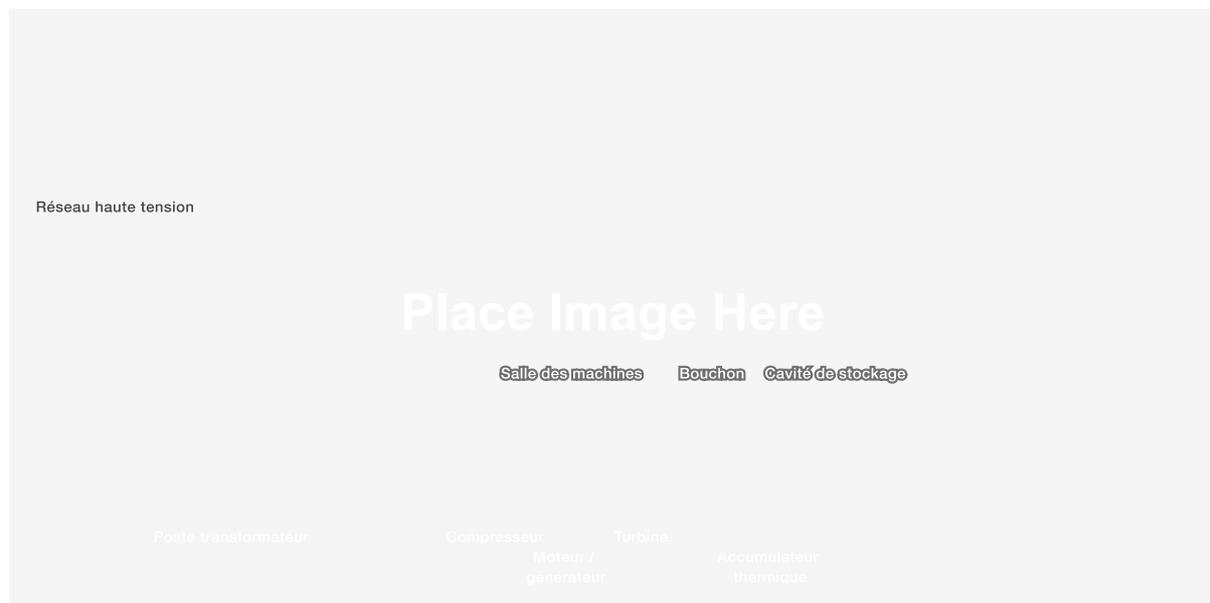
L'accumulation par pompage, les réservoirs d'air comprimé et les batteries sont déjà utilisés pour stocker de grandes quantités d'énergie électrique, les systèmes de pompage étant clairement majoritaires.

Répartition en fonction de la puissance des systèmes de stockage d'électricité déjà utilisés dans les réseaux électriques du monde entier.



Source : « Technology Roadmap Energy Storage », Agence internationale de l'énergie, Paris, 2014 et « Electricity Energy Storage Technology Options », Electric Power Research Institute, Palo Alto, 2010

1.3.3. Principe du stockage adiabatique d'air comprimé



Représentation schématique d'un système de stockage d'air comprimé adiabatique avec une cavité de stockage dans la roche. Le bleu et le rouge indiquent les températures basses (par ex. autour de 20°C) et élevées, sachant que les « températures élevées » sont comprises entre 320°C et 580°C selon le type d'installation. Les flèches bleues et rouges indiquent le sens d'écoulement de l'air pendant la phase de charge. Durant la phase de décharge, l'air circule en sens inverse.

Le principe de base du stockage d'air comprimé est simple : l'énergie électrique excédentaire – provenant par exemple d'éoliennes ou d'installations solaires – entraîne un moteur relié à un compresseur qui aspire l'air ambiant. La compression fait augmenter la pression et la température de l'air. Cet air comprimé est stocké dans une cavité. Par la suite, l'air comprimé est renvoyé dans l'environnement par l'intermédiaire d'une turbine. Cette turbine entraîne un générateur qui produit à nouveau de l'énergie électrique.

Pour stocker un maximum d'énergie dans un minimum d'espace, un rapport de compression élevé est nécessaire, par exemple de l'ordre de 100 :1. Cela se traduit par des températures élevées, qui présentent deux inconvénients de taille. Tout d'abord, le compresseur et la turbine doivent être réalisés à l'aide de coûteux matériaux résistants aux hautes températures. Deuxièmement, les températures élevées exercent une contrainte sur les dépôts de sel ou les formations rocheuses qui entourent la cavité de stockage. Il est par conséquent utile de refroidir l'air après la compression.

La solution de refroidissement la plus simple consiste à renvoyer la chaleur dans l'environnement. Afin d'éviter le givrage de la turbine, l'air refroidi doit toutefois être réchauffé en amont de la turbine, par exemple au moyen de combustibles fossiles. On parle dans ce cas de stockage d'air comprimé diabatique. Cette forme de stockage d'air comprimé présente l'inconvénient d'émettre des gaz à effet de serre et de n'avoir qu'un rendement d'environ 40 à 50 %. Il existe des centrales à accumulation d'air comprimé diabatiques à Huntorf



(Allemagne, depuis 1978) et à McIntosh (États-Unis, depuis 1991).

Une solution plus intéressante consiste à extraire de la chaleur de l'air avant la cavité de stockage, de l'emmagasiner dans un accumulateur de chaleur, puis de la restituer à l'air avant la turbine. On parle alors de stockage d'air comprimé adiabatique. Ce procédé n'émet pas de gaz à effet de serre et atteint des rendements nettement supérieurs, de l'ordre de 65 à 75 %.¹ Ces valeurs sont similaires aux rendements obtenus dans la pratique par les systèmes d'accumulation par pompage.²

Notes et références

1 Ces rendements sont des valeurs nettes après déduction des pertes dans le moteur, le générateur et l'électronique de puissance.

2 Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE), « Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger : Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf », Francfort, 2009

1.3.4. Thématique prioritaire de la synthèse



Cette synthèse met l'accent sur le stockage adiabatique d'air comprimé en Suisse. Les réservoirs d'air comprimé couvrent une plage de puissance et de capacité similaire à celle des réservoirs de systèmes d'accumulation par pompage. Par rapport à ces derniers, à rendement et impact environnemental équivalents, les réservoirs d'air comprimé offrent un certain nombre d'avantages :

- Ils ne nécessitent pas d'inonder des vallées.
- Les coûts d'investissement et d'exploitation sont considérés comme moins élevés et moins dépendants de l'emplacement.
- Les réservoirs d'air comprimé fonctionnent avec de l'air plutôt qu'avec de l'eau ; ils ne sont donc pas concernés par les dispositions en matière de débits résiduels et les modifications du cycle de l'eau dues au changement climatique.

Cette synthèse résume les résultats de trois projets¹ :

- Projet conjoint « Stockage d'électricité par compression adiabatique d'air », Fonds National Suisse, programme national de recherche « Virage énergétique » (PNR 70) (janvier 2015 à décembre 2018)
- Innosuisse, Pôle de compétence en recherche énergétique pour le stockage de chaleur et d'électricité (SCCER HaE), phase 2 (janvier 2017 à décembre 2020)
- Projet Grid-to-Grid, Office fédéral de l'énergie (octobre 2017 à juin 2019)

Ces projets ont examiné deux configurations d'installations dans lesquelles la compression et



l'expansion se subdivisent respectivement en deux échelons à basse et haute pression. Après chaque compresseur, se trouve une cavité de stockage avec un accumulateur thermique. Dans les deux configurations, la pression maximale est d'environ 100 bars dans la deuxième cavité de stockage.

- Dans la première configuration, l'air est comprimé à 33 bars et 580°C par un compresseur basse pression, puis de 33 à 100 bars par un compresseur haute pression.
- Dans la seconde configuration, l'air est seulement comprimé à 10 bars et 320°C par le compresseur basse pression, avant d'être comprimé de 10 à 100 bars par le compresseur haute pression.

Avantage de la seconde configuration : les températures plus basses permettent l'utilisation des compresseurs et turbines industriels existants.

Les deux configurations d'installations ont une capacité de décharge nominale de 100 MW et une capacité de 500 MWh. Par conséquent, la deuxième cavité de stockage doit avoir un volume d'environ 177 000 m³, ce qui correspond à un cube d'environ 56 m de côté.

Notes et références

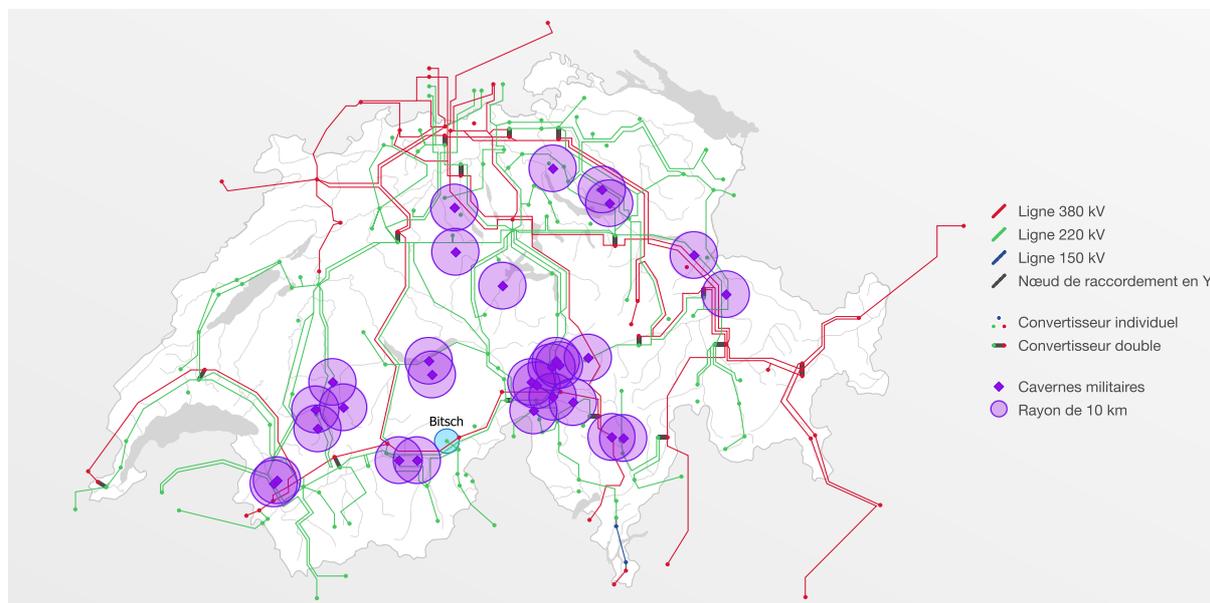
1 Ces projets sont étroitement liés à un projet pilote et de démonstration soutenu par l'Office fédéral de l'énergie, dans le cadre duquel une installation pilote de stockage adiabatique d'air comprimé (sans turbine) a été construite et testée à Biasca – voir G. Zanganeh, « Demonstration of the ability of caverns for compressed air storage with thermal energy recuperation », Final Report, Office fédéral de l'énergie, novembre 2016.

1.4. Défis techniques, structurels et écologiques

Où construire des réservoirs d'air comprimé ? Quelles machines pourraient être utilisées ? Et comment se positionnent les réservoirs d'air comprimé d'un point de vue écologique par rapport à d'autres technologies ?

Planification

1.4.1. Implantations possibles de réservoirs d'air comprimé



Réseau électrique suisse (état en 2025) et emplacements d'une sélection de cavernes militaires désaffectées. *Source : Swissgrid et Armasuisse*

La recherche d'emplacements potentiels pour les réservoirs d'air comprimé s'est d'abord concentrée sur les cavernes désaffectées de l'armée. Selon leur volume, l'utilisation de ces cavernes permettrait de réduire voire d'éliminer les coûts d'excavation de la cavité de stockage. La situation à proximité d'un nœud de réseau serait un avantage, puisqu'elle réduirait le coût de raccordement de l'unité de stockage d'air comprimé au réseau.

Un examen plus attentif des cavernes désaffectées a cependant montré qu'elles étaient nettement plus petites que le volume requis de 177 000 m³. La plupart d'entre elles sont si petites que les économies potentielles sur les coûts de construction sont négligeables.

D'autres études ont montré que la réutilisation des cavernes désaffectées de l'armée était par ailleurs associée à divers inconvénients :

- Les cavernes sont trop proches de la surface ; la couche qui les recouvre n'atteint pas les 1000 m d'épaisseur nécessaires pour résister à la pression maximale d'environ 100 bars. De ce fait, de coûteux travaux de revêtement de renforcement des cavités seraient nécessaires.
- Les cavernes disposent normalement de plusieurs entrées et sorties, qui représentent autant de sources potentielles de perte de pression.
- Les cavernes sont généralement fortement ramifiées, ce qui se traduit par d'importants rapports surface/volume. Cela favorise les pertes de chaleur de l'air vers la roche.

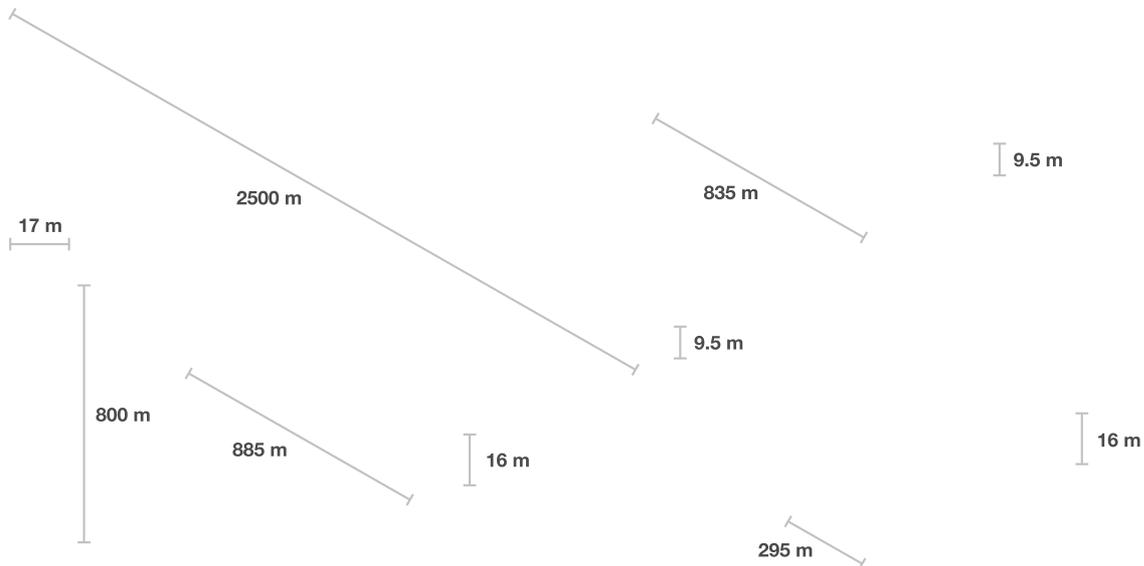


- La section transversale de la plupart des cavernes est en forme de fer à cheval, ce qui peut entraîner des concentrations de contraintes et des fissures, susceptibles de conduire à des pertes de pression.
- Seules de rares cavernes sont situées dans des zones rocheuses de qualité supérieure, comme le massif de l'Aar. Elles devraient donc probablement être pourvues d'un revêtement d'étanchéité.

Pour toutes ces raisons, les études en vue de la réutilisation des cavernes désaffectées de l'armée ne seront pas poursuivies. Au lieu de cela, il a été décidé de creuser de nouvelles cavités de stockage. Les répercussions de ce choix en termes de coûts d'investissement sont en train d'être examinées plus avant dans le cadre du projet du Pôle de compétences suisse en recherche énergétique (Swiss Competence Center for Energy Research, SCCER) et d'un nouveau projet de l'Office fédéral de l'énergie.

Planification

1.4.2. Construction de cavités de stockage



Cinq possibilités pour constituer un volume de stockage de 177 000 m³ à l'aide de tunnels et de puits. Pour des raisons de visualisation, le rapport entre le diamètre et la longueur n'est pas fidèle à l'échelle. Source : Philipp Roos / Andreas Haselbacher

Le volume de stockage de 177 000 m³ peut être atteint de diverses manières. Par exemple avec :

- un tunnel d'un diamètre de 9,5 m et d'une longueur de 2,5 km – soit à peu près l'équivalent du nouveau tunnel des CFF traversant le Bözberg ;
- trois tunnels parallèles d'un diamètre de 9,5 m et d'une longueur de 835 m ;
- un tunnel d'un diamètre d'environ 16 m, comme de coutume pour les cavernes, et d'une longueur de 885 m ;
- trois tunnels parallèles d'un diamètre de 16 m et d'une longueur de 295 m.

Outre l'alignement horizontal, une disposition verticale sous forme de puits est également possible. Le volume de stockage visé nécessiterait bien quatre puits du type de celui de Sedrun.

La construction d'un tunnel d'une longueur de 900 m et d'un diamètre de 9,5 m ne pose pas de problème structurel majeur. On suppose que les cavités sont réalisées dans des formations de roches dures majoritairement non perturbées. En l'absence de tests approfondis de stockage d'air comprimé dans de telles formations, on ne dispose guère d'expérience sur leur réaction aux contraintes de pression cycliques.



Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

Travaux de gros-œuvre du tunnel de base du Ceneri. L'excavation de la cavité de stockage d'un éventuel réservoir d'air comprimé bénéficierait de la vaste expérience des entreprises suisses dans la construction de cavernes, de tunnels et de puits.



Source : Amberg Engineering SA

1.4.3. Turbomachines pour réservoirs d'air comprimé



La longueur du compresseur radial est de 4 mètres environ et son diamètre de 3 mètres environ. *Source : MAN Energy Solutions AG*

Un réservoir d'air comprimé nécessite un ou plusieurs compresseurs entraînés par des moteurs électriques pour le processus de charge et une ou plusieurs turbines couplées à des générateurs pour le processus de décharge. La puissance souhaitée pendant les processus de charge et de décharge, les pressions maximales et minimales dans la caverne et les niveaux de température des accumulateurs thermiques sont déterminants pour la conception des turbomachines. Ces dernières ont à leur tour une influence significative sur l'efficacité et les coûts d'investissement du réservoir d'air comprimé.

Pour limiter les coûts d'investissement, il convient d'utiliser des turbomachines déjà disponibles. Celles-ci ne sont toutefois pas conçues pour les très hautes températures engendrées par les pressions élevées. La compression de l'air ambiant à 100 bars génère par exemple une température d'environ 950°C. C'est pourquoi, il est nécessaire d'effectuer la compression en deux phases et de refroidir l'air entre les deux grâce à un accumulateur thermique.

Afin d'atteindre des températures aussi basses que possibles pour les turbomachines et tous les autres composants, tels que les tuyauteries et les vannes, des taux de compression similaires sont nécessaires pour les deux phases. Des températures basses permettent des temps de démarrage plus courts de l'accumulateur d'air comprimé, ce qui est avantageux pour son fonctionnement et sa rentabilité. La compression est effectuée avec un compresseur axial et un compresseur radial, tandis que deux turbines axiales assurent la détente.

Pour diverses raisons, les turbomachines sont importantes pour le fonctionnement et la rentabilité du stockage d'air comprimé. D'une part, leur efficacité au point de conception optimal détermine l'efficacité du système de stockage d'air comprimé. D'autre part, leur comportement en charge partielle à puissance réduite et leur comportement transitoire, lors de la mise en marche et de l'arrêt des machines entre les opérations de charge et de décharge, doivent également être pris en compte. Par conséquent, le temps et l'énergie nécessaires au démarrage de la turbomachine déterminent par exemple les marchés sur lesquels le réservoir d'air comprimé peut être utilisé.

1.4.4. Accumulateurs thermiques pour réservoirs d'air comprimé



Aperçu de l'accumulateur de chaleur sensible de l'installation pilote près de Biasca. Le réservoir est rempli de galets d'environ 2 cm de diamètre. *Source : Andreas Haselbacher*

L'accumulateur thermique est le composant clé d'un système de stockage adiabatique d'air comprimé : il permet d'augmenter le rendement du réservoir d'air comprimé de 40-50 % à 65-75 %. Ce rendement supérieur a un effet positif sur la rentabilité et la compatibilité environnementale du système de stockage d'air comprimé.

Pour être utilisés dans un réservoir d'air comprimé, les accumulateurs thermiques doivent satisfaire à un certain nombre d'exigences :

- un rendement élevé, c'est-à-dire de faibles pertes de chaleur ;
- une densité d'énergie volumétrique élevée pour limiter autant que possible le volume du réservoir de stockage ;
- une température aussi constante que possible du flux de décharge, afin que les turbines puissent fonctionner efficacement ;
- un coût aussi bas que possible.

Compte tenu de ces exigences, deux types d'accumulateurs thermiques ont été étudiés dans le cadre des projets. Le premier type, un accumulateur de chaleur dite sensible¹, utilise comme matériau de stockage des galets d'un diamètre d'environ 2 cm provenant de dépôts alluviaux près de Zurich.² Le second type, qualifié d'accumulateur de chaleur sensible-latente³, utilise comme matériau de stockage des tubes d'acier remplis d'un alliage métallique, en complément de l'accumulation de chaleur sensible. La fonte et la solidification de l'alliage métallique permettent de stocker et de libérer de l'énergie sous forme de chaleur latente à une température constante.

Accumulateur de chaleur sensible-latente de l'installation pilote près de Biasca. À gauche, l'accumulateur de chaleur sensible rempli de gravier, à droite l'accumulateur de chaleur latente. Le stockage sensible mesure 3,1 m de haut, 9,9 m de long et 4 m de large. Le

stockage latent mesure environ 1,5 m de haut, de long et de large.

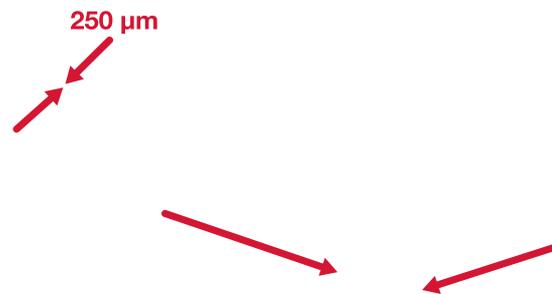


Source : Viola Becattini

Notes et références

- 1 L. Geissbühler, V. Becattini, G. Zanganeh, S. Zavattoni, M. Barbato, A. Haselbacher, A. Steinfeld, « Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 1 : Plant description and tests with sensible thermal-energy storage », *Journal of Energy Storage* 17 :129–139, 2018
- 2 V. Becattini, T. Motmans, A. Zappone, C. Madonna, A. Haselbacher, A. Steinfeld, « Experimental investigation of the thermal and mechanical stability of rocks for high-temperature thermal-energy storage », *Applied Energy* 203 :373–389, 2017
- 3 V. Becattini, L. Geissbühler, G. Zanganeh, A. Haselbacher, A. Steinfeld, « Pilot-scale demonstration of advanced adiabatic compressed air energy storage, Part 2 : Tests with combined sensible/latent thermal-energy storage », *Journal of Energy Storage* 17 :140–152, 2018

1.4.5. Matériaux à changement de phase pour les accumulateurs thermiques



Vue en coupe d'un tube sans barrière de diffusion

Vue en coupe d'un tube avec barrière de diffusion

L'image du milieu montre l'accumulateur de chaleur latente partiellement rempli de tubes d'acier. Lorsqu'il est entièrement rempli, il peut contenir 296 tubes d'acier garnis d'un alliage d'aluminium, de cuivre et de silicium. Sur la gauche, on peut voir une coupe à travers un tube dépourvu de barrière de diffusion. Après une centaine d'heures à haute température, une couche intermétallique de 250 μm d'épaisseur s'est formée. L'image de droite montre une coupe à travers un tube doté d'une barrière de diffusion : malgré les températures élevées, aucune couche intermétallique ne s'y est formée.

Source : Sophia Haussener (gauche et droite), Viola Becattini (centre),

Un accumulateur de chaleur latente utilise un matériau à changement de phase encapsulé en guise de matériau de stockage. Le matériau à changement de phase absorbe de la chaleur pendant la charge via le processus de fusion et la restitue à nouveau pendant la décharge via le processus de solidification. Une particularité du changement de phase est que la température correspond à la température de fusion du matériau jusqu'à ce que le matériau soit intégralement fondu ou solidifié. Ceci permet de stabiliser la température de sortie au plus près de la température de fusion du matériau à changement de phase.

Si l'accumulateur thermique se compose d'une partie sensible et d'une partie latente, lors de la charge la chaleur est d'abord stockée dans la partie latente, puis dans la partie sensible. Lors de la décharge, la chaleur est d'abord libérée dans la partie sensible, puis dans la partie latente.

Pour les essais réalisés dans l'installation pilote de Biasca, le matériau à changement de phase devait avoir une température de fusion d'environ 500 à 550°C. Les matériaux métalliques sont particulièrement intéressants en raison de leur conductivité thermique élevée, qui permet une charge et une décharge plus rapides de l'accumulateur. Pour les



essais, un alliage d'aluminium, de cuivre et de silicium avec une température de fusion de 525°C a été choisi.

Étant donné que le matériau à changement de phase va fondre, il doit être encapsulé, par exemple dans un tube en acier. L'accumulateur de chaleur latente peut ensuite comprendre plusieurs tubes en acier. À haute température, l'encapsulation et le matériau à changement de phase sont particulièrement réactifs, ce qui entraîne la formation d'une couche intermétallique entre ces deux éléments. Au fur et à mesure que cette couche se développe, la capacité de stockage diminue petit à petit. De plus, l'encapsulation est attaquée, ce qui peut mettre en danger sa propre stabilité mécanique ainsi que celle de l'accumulateur de chaleur latente.

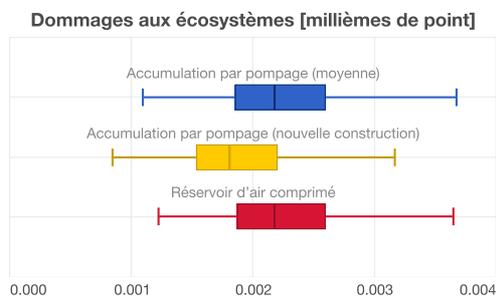
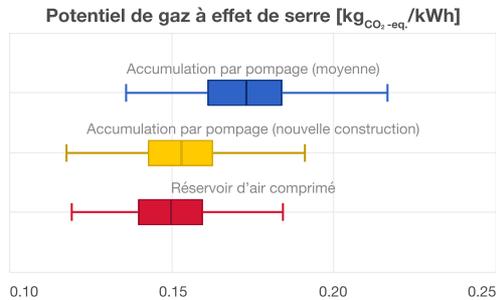
La formation de la couche intermétallique peut être évitée grâce à une mince couche de protection en céramique, appelée barrière de diffusion¹. Cette dernière prolonge la durée de vie des tubes en acier et de l'accumulateur thermique.

Notes et références

1 S. R. Binder and S. Haussener, « Design guidelines for Al-12 %Si latent heat storage encapsulations to optimize performance and mitigate degradation », Applied Surface Science, 143684, 2019

Durabilité

1.4.6. Impact environnemental des réservoirs d'air comprimé



Potentiel de gaz à effet de serre et dommages causés aux écosystèmes par l'électricité stockée et réinjectée (mix d'approvisionnement suisse) pour les réservoirs d'air comprimé et le stockage par pompage (nouvelle construction ou moyenne suisse). Les dommages aux écosystèmes sont estimés sur la base de l'impact de l'utilisation des terres sur la biodiversité et des émissions de polluants. Les plages représentées reflètent les incertitudes et les différences potentielles propres aux sites et indiquent la médiane, le quartile inférieur et le quartile supérieur.

Un écobilan complet montre que les réservoirs d'air comprimé et les systèmes de pompage obtiennent des résultats similaires en termes d'écologie. Une comparaison plus précise dépendrait des hypothèses et des critères de comparaison retenus, c'est pourquoi aucune conclusion précise ne peut être formulée. Par exemple, alors que les configurations de stockage d'air comprimé étudiées se caractérisent par un moindre besoin de matériaux qu'un système de pompage, elles nécessitent davantage de métal. Un avantage évident des réservoirs d'air comprimé est que, contrairement à l'accumulation par pompage, ils n'utilisent pratiquement pas de terres de façon directe.

L'impact environnemental des systèmes de stockage d'air comprimé est principalement déterminé par les pertes d'énergie. Avec des rendements de 65 à 75 %, 25 à 35 % de l'énergie électrique injectée est perdue, et ces pertes ont un impact sur l'environnement. Le mix de consommation électrique de la Suisse a par exemple un potentiel de réchauffement planétaire d'environ 100 g de CO₂/kWh.¹ Si celui-ci est stocké dans un réservoir d'air comprimé avec un rendement de 75 %, l'électricité restituée se situe aux alentours de 135 g de CO₂/kWh. Seulement 2 g du potentiel accru de réchauffement planétaire proviennent de



l'installation de stockage – les 33 g restants proviennent des pertes d'énergie. Il peut par conséquent être écologiquement pertinent d'utiliser des matériaux sophistiqués comme les matériaux à changement de phase s'ils augmentent l'efficacité du réservoir d'air comprimé – même si les matériaux eux-mêmes ont un impact plus important sur l'environnement. Les réservoirs d'air comprimé s'avèrent les plus utiles lorsqu'ils servent au stockage d'électricité excédentaire, provenant par exemple d'installations solaires ou d'éoliennes, et remplacent ainsi de l'électricité produite à partir de sources d'énergie fossiles.

La majeure partie de l'impact environnemental d'un réservoir d'air comprimé provient des métaux. Ceux-ci se trouvent principalement dans les infrastructures, par exemple dans les turbomachines, les générateurs et les postes de transformation.² L'impact des métaux pourrait être réduit grâce au recyclage. L'impact de l'excavation de la cavité de stockage et de l'évacuation des matériaux excavés est, quant à lui, négligeable.

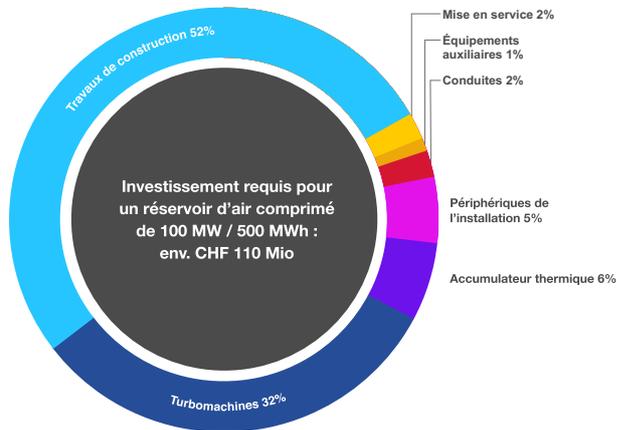
Notes et références

1 G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz und B. Weidema, « The ecoinvent database version 3 (part I) : overview and methodology », *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9) :1218–1230, 2016

2 Les durées de vie suivantes ont été retenues : 60 ans pour la cavité de stockage, 40 ans pour l'accumulateur thermique, 25 ans pour les turbomachines.

Coût / bénéfice

1.4.7. Coûts d'investissement et d'exploitation des réservoirs d'air comprimé



Parts relatives de différents composants dans les coûts d'investissement d'un réservoir d'air comprimé d'une puissance de 100 MW et d'une capacité de 500 MWh. Les coûts des composants électriques, tels que les moteurs et les générateurs, sont inclus dans la catégorie « Périphériques de l'installation ».

Les coûts d'investissement et d'exploitation des réservoirs d'air comprimé sont semblables à ceux des systèmes de pompage ; les deux solutions de stockage intègrent des composants principaux similaires, tels que des turbomachines, des cavités et de l'électronique haute tension. Les réservoirs d'air comprimé ne nécessitant toutefois pas la construction de barrages, leurs coûts sont moins spécifiques aux sites et sont estimés comme étant de 20 à 30 % inférieurs à ceux des systèmes d'accumulation par pompage. Pour un réservoir d'air comprimé d'une puissance de 100 MW et d'une capacité de 500 MWh, on peut estimer l'investissement nécessaire à environ CHF 110 millions, soit 200 à 300 CHF/kWh de capacité installée. Les coûts d'exploitation annuels représentent environ 2,5 % des coûts d'investissement.

Les travaux de construction représentent plus de la moitié des coûts d'investissement. Ils comprennent, entre autres, la réalisation du tunnel d'accès, des cavités de stockage, du bouchon de fermeture et du dispositif d'étanchéité. Les turbomachines représentent 32 % des coûts d'investissement et les accumulateurs thermiques, le cœur d'un système de stockage adiabatique d'air comprimé, 6 %.

Les coûts d'investissement des réservoirs d'air comprimé représentent environ la moitié des coûts d'investissement d'un système de stockage à batteries, même si les coûts des batteries continueront de baisser. Il convient toutefois de noter que la durée de vie d'un réservoir d'air comprimé est d'au moins 60 ans, à l'instar d'un système d'accumulation par pompage, alors que celle des batteries ne dépasse pas 10 à 15 ans. À l'échelle de leur cycle de vie, les réservoirs d'air comprimé sont donc nettement moins coûteux que le stockage à batteries.



1.5. Défis économiques

Diverses questions subsistent quant au financement des systèmes de stockage d'air comprimé. Les coûts d'investissement par kWh sont estimés inférieurs à ceux des systèmes d'accumulation par pompage, mais il n'a pas encore été clairement établi si un réservoir d'air comprimé peut être rentable.

Marché

1.5.1. Quelles applications sont pertinentes ?



Pour évaluer la rentabilité d'un réservoir d'air comprimé, il est nécessaire d'analyser comment différentes configurations de stockage peuvent être utilisées sur les marchés existants. Jusqu'à présent, deux applications ont été analysées :

- Arbitrage des prix de l'électricité
- Puissance de réglage secondaire

À l'avenir, il faudra aussi examiner comment les incertitudes liées aux prévisions et les hypothèses, ainsi que d'autres applications et leurs combinaisons influencent la rentabilité économique.



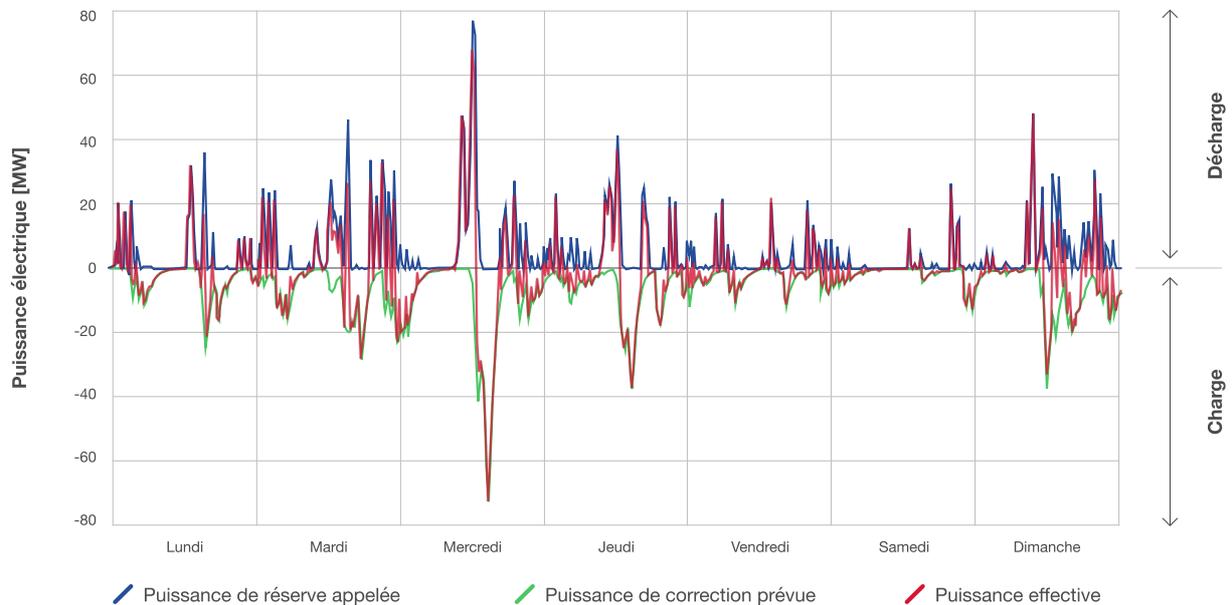
Marché # Prix # Coût / bénéfice

1.5.2. Modèle de mise en œuvre « Arbitrage des prix de l'électricité »

L'arbitrage des prix de l'électricité est basé sur le fait que l'électricité est stockée lorsque les prix sont bas et réinjectée dans le réseau – généralement quelques heures plus tard – lorsque les prix remontent. Afin d'étudier la rentabilité de l'arbitrage, le réseau électrique de la Suisse et des pays riverains a été simulé en 2025 avec et sans réservoirs d'air comprimé. Puis, les coûts de couverture des besoins en électricité ont été comparés. Dix sites ont été examinés pour déterminer lequel offrirait les coûts de couverture les plus faibles. Les résultats montrent que les réservoirs d'air comprimé peuvent réduire les coûts de couverture et qu'un réservoir situé près de Bitsch, dans le Valais, affiche les coûts les plus bas. Ils montrent cependant aussi qu'en raison des faibles écarts de prix et des pertes de l'ordre de 30 %, l'arbitrage n'est actuellement pas rentable pour les réservoirs d'air comprimé.

Marché # Prix # Coût / bénéfice

1.5.3. Modèle de mise en œuvre « Puissance de réglage secondaire »



Utilisation d'un réservoir d'air comprimé pour la puissance de réglage secondaire. La puissance de réserve appelée (en bleu) correspond à un signal de Swissgrid. Afin d'équilibrer le niveau de charge, de la puissance de correction (en vert) est acquise de façon décalée sur le marché intrajournalier. La puissance effective de l'installation (en rouge) est fournie soit par la turbine, soit par le compresseur.

Le marché du réglage secondaire sert à compenser les erreurs de prévision et les pertes de charges ou d'unités de production. Diverses configurations d'installations ont été simulées pour l'année 2018. Les simulations sont basées sur l'hypothèse que les installations peuvent générer une charge partielle et atteindre le prix moyen de l'énergie de réserve. Le graphique montre les courbes de puissance d'une installation d'une puissance de 100 MW pendant une semaine de janvier. La puissance effective de l'installation est fournie soit par la turbine (puissance positive), soit par le compresseur (puissance négative). Afin d'équilibrer le niveau de charge, de la puissance de correction est acquise de façon décalée sur le marché intrajournalier. De nombreuses configurations d'installations permettent d'atteindre un taux de rendement interne de 10 à 15 %. Sur la base des hypothèses retenues, ces résultats offrent des perspectives optimistes pour cette application.

Marché # Coût / bénéfice # Investissement # Fournisseur d'énergie

1.5.4. Évaluation du stockage d'air comprimé du point de vue d'une compagnie énergétique



Par son rendement élevé, sa grande longévité et sa compatibilité environnementale, le stockage d'air comprimé constitue une option intéressante pour donner de la flexibilité au réseau et aux marchés de l'électricité. Bien que la flexibilité ait toujours été importante, elle continuera à gagner en importance à l'avenir en raison du développement de l'énergie éolienne et solaire. En outre, la capacité de transport de certaines parties du réseau ne sera pas en mesure de suivre le rythme de l'expansion de l'énergie éolienne et solaire. Le positionnement stratégique de réservoirs d'air comprimé pourrait permettre de retarder voire d'éviter de coûteuses et fastidieuses extensions du réseau de transport.

D'après de récentes évaluations du marché et le développement attendu des sources d'énergie renouvelables, l'exploitation de grands systèmes de stockage d'énergie, tels que les réservoirs d'air comprimé, pourrait devenir intéressante à partir de 2030. Pour garantir que de grandes installations de stockage seront opérationnelles au moment opportun, des investissements et le soutien du secteur sont indispensables. En outre, il s'agit de surmonter les obstacles qui subsistent et de répondre aux questions encore ouvertes :

1. Le cadre juridique doit être clairement défini afin d'encourager le développement et la mise en œuvre de systèmes de stockage d'énergie. À l'heure actuelle, les incitations financières font défaut ou sont insuffisantes pour le stockage de l'énergie par rapport aux incitations à l'installation de moyens de production d'énergie renouvelable.
2. Bien qu'il y ait un large consensus sur la nécessité de stocker l'énergie, la capacité de stockage requise et sa répartition optimale demeurent très incertaines. Sans plus de



certitude quant aux besoins futurs, il sera particulièrement difficile de trouver des investisseurs pour soutenir la réalisation d'une installation pilote ou de démonstration.

Compte tenu des estimations actuelles des coûts et de l'évolution prévue des prix de l'électricité, il est difficile de formuler un cas d'application fiable pour une exploitation rentable des systèmes de stockage d'air comprimé. Bien que les simulations aient montré que la rentabilité peut être atteinte grâce aux confortables revenus supplémentaires provenant des services secondaires et du négoce intrajournalier, les prévisions demeurent extrêmement difficiles et incertaines.

Régulation # Marché # Financement

1.5.5. Action requise : clarifier les conditions-cadres économiques et juridiques



Principaux enseignements :

- L'installation pilote de Biasca a montré que les réservoirs d'air comprimé étaient techniquement réalisables et qu'une efficacité de 65 à 75 % pouvait être atteinte.
- Les coûts d'investissement par kWh estimés sont inférieurs pour le stockage d'air comprimé que pour l'accumulation par pompage.
- Avec un comportement idéal en charge partielle sur le marché du réglage secondaire, un réservoir d'air comprimé d'une puissance de 100 MW et d'une capacité de 500 MWh aurait été rentable dès 2018.
- La compatibilité environnementale des réservoirs d'air comprimé est comparable à celle des systèmes d'accumulation par pompage.

Les réservoirs d'air comprimé sont techniquement réalisables, efficaces et respectueux de l'environnement, et ils pourraient également être rentables. Des analyses complémentaires s'achèveront d'ici fin 2020. Si elles confirment les résultats précédents, une centrale complète devrait être construite et testée en exploitation sur le réseau.

Même pour les petites installations, il n'existe toutefois que peu d'instruments de financement. En règle générale, l'Office fédéral de l'énergie finance par exemple 40 % des coûts des projets pilotes, de démonstration et phares, à concurrence de 5 millions de francs. L'industrie et les investisseurs doivent par conséquent engager des sommes considérables, même pour



de petites installations. En raison de l'évolution incertaine du marché de l'électricité et des conditions-cadres économiques et juridiques, le risque d'investissement est considéré comme important. L'obstacle juridique le plus important réside peut-être dans le fait qu'à l'heure actuelle, seules les installations d'accumulation par pompage sont exonérées des redevances de réseau et sont donc économiquement avantagées.¹ En raison de la longue durée de vie et des incertitudes liées aux marchés futurs, le risque d'investissement est encore plus grand pour les installations de grande envergure.

Le manque de clarté entourant les conditions-cadres entrave la poursuite du développement d'une technologie de stockage pertinente. Elle risque par conséquent de ne pas être apte à l'utilisation sur le marché lorsqu'elle sera utile en raison du développement des sources d'énergie renouvelables. C'est pourquoi, il est nécessaire de clarifier le cadre économique et juridique.

Notes et références

¹ Le privilège accordé aux systèmes d'accumulation par pompage est ancré dans la Loi sur l'approvisionnement en électricité (RS 734.7, article 4, alinéa 1b). Une interpellation appelant à un traitement indépendant de toute technologie des installations de stockage d'électricité (18.4055 du 28 septembre 2018) est actuellement en suspens au Parlement. Les conditions-cadres juridiques pour le stockage de l'énergie et les adaptations possibles sont examinées en détail dans S. Walther, « Regulierung von Energiespeichern in der Schweiz », Dike Verlag AG, Zurich/Saint-Gall, 2019.

Régulation # Financement

1.5.6. Actions requises : clarifier les procédures d'aménagement de cavités de stockage



Dans le contexte de la construction d'une installation de stockage d'air comprimé en Suisse, deux questions fondamentales doivent être clarifiées.

Premièrement, la situation juridique concernant la construction souterraine ne semble pas claire. Étant donné qu'il n'existe actuellement aucune loi correspondante au niveau fédéral, ce sont les cantons qui décident de l'utilisation du sous-sol des terres publiques et non cultivables.¹ Les situations juridiques varient d'un canton à l'autre. En raison de l'utilisation croissante du sous-sol, par exemple par le biais de la géothermie ou du stockage de gaz naturel et de CO₂, des efforts sont toutefois accomplis pour clarifier la situation juridique.^{2, 3} Malgré les incertitudes, on peut s'attendre à ce que la construction de réservoirs d'air comprimé bénéficie en partie de l'expérience acquise lors de la construction de structures souterraines telles que les salles des machines des centrales de pompage-turbinage.

Deuxièmement, il n'est pas clair quelles lois et ordonnances pourraient s'appliquer au stockage souterrain d'air sous haute pression. L'air n'étant pas inflammable en soi, la loi fédérale 746.1, qui régit le stockage des combustibles liquides et gazeux, ne semble pas pertinente.

En l'absence d'obligations légales clairement définies, il faut s'attendre à ce qu'une analyse approfondie des risques doive être menée avant la construction du premier grand réservoir d'air comprimé en Suisse. Jusqu'à présent, des analyses de risques semblent uniquement avoir été effectuées pour des réservoirs d'air comprimé diabatiques basés sur des cavités de stockage aménagées dans des dépôts salins ou des gisements de gaz épuisés.^{4, 5}

Un risque évident est la fuite rapide et explosive de l'air comprimé. Dans les installations existantes de Huntorf et McIntosh, rien n'indique qu'un tel événement n'ait jamais été imminent dans les cavernes de sel. Dans le cas des réservoirs d'air comprimé aménagés dans des cavités rocheuses, de tels événements pourraient être évités en surveillant la déformation de la cavité de stockage et en réduisant immédiatement la pression en cas de comportement inhabituel. De telles mesures ont déjà été effectuées dans l'installation pilote du Tessin.⁶

Notes et références

- 1 G. Ruiz, « Un no man's land qui attise les convoitises », Horizons n°118, Fonds national suisse, septembre 2018
- 2 A. Abegg und L. Dörig, « Rechtsgutachten : Untergrund im Recht », Université des sciences appliquées de Zurich (ZHAW), School of Management and Law, Winterthour, octobre 2018
- 3 « Données géologiques relatives au sous-sol », Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat Vogler 16.4108 du 16 décembre 2016, décembre 2018
- 4 P. L. Hendrickson, « Legal and Regulatory Issues Affecting Compressed Air Energy Storage », Rapport PNL 3862, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, USA, juillet 1981
- 5 M. C. Grubelich, S. J. Bauer und P. W. Cooper, « Potential Hazards in Compressed Air Energy Storage in Depleted Natural Gas Reservoirs », Rapport SAND2011-5930, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA, septembre 2011
- 6 G. Zanganeh, « Demonstration of the ability of caverns for compressed air storage with thermal energy recuperation », Rapport final, Office fédéral de l'énergie, novembre 2016.

1.6. Recommandations

En ce qui concerne le stockage adiabatique d'air comprimé, les faits sont clairs : la technologie est respectueuse de l'environnement, efficace et sûre. Pour l'aider à percer, des mesures supplémentaires sont cependant nécessaires, notamment de la part des instances politiques, des fournisseurs d'énergie et des associations.

Politique (Confédération, canton, commune)

1.6.1. Définir une stratégie de stockage énergétique !



Les instances politiques doivent mettre en place des conditions-cadres économiques et juridiques claires – et élaborer une « Stratégie de stockage énergétique 2050 ».

Il est désormais incontesté que le stockage de l'énergie est indispensable pour intégrer de grandes quantités d'électricité renouvelable fluctuante dans notre système énergétique.^{1 2} La question de savoir quels types et quelles quantités de réservoirs d'énergie sont nécessaires reste ouverte. Difficile de donner une réponse, tant celle-ci dépend de nombreux facteurs, qui ne peuvent être que partiellement influencés par la Suisse et qui sont tous sujets à de grandes incertitudes.

Néanmoins, ou précisément pour cette raison, il est essentiel de prendre des mesures pour faire progresser la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050. Il convient de définir à cet effet une « Stratégie de stockage énergétique 2050 », axée sur les priorités suivantes :

1. Les systèmes de stockage d'énergie doivent être évalués de manière globale et neutre. Outre l'efficacité et la rentabilité, les gaz à effet de serre émis tout au long du cycle de vie d'une installation de stockage doivent également être pris en compte.
2. Les différents types de dispositifs de stockage d'énergie, capables de produire de l'électricité en phase de décharge, doivent être mis sur un pied d'égalité vis-à-vis de la législation. Les installations d'accumulation par pompage sont actuellement privilégiées parce qu'elles sont le seul système de stockage d'électricité à être exonéré de la redevance de réseau.
3. L'expérimentation des systèmes de stockage d'énergie de grande envergure jugés pertinents doit être encouragée de manière ciblée. À cet effet, de nouvelles



possibilités de financement doivent être examinées ; l'expérimentation d'installations de stockage doit être favorisée grâce à de nouveaux instruments d'encouragement, tels que les laboratoires vivants ³ allemands.

Notes et références

1 G. Andersson, K. Boulouchos und L. Bretschger, « Energiezukunft Schweiz », EPF Zürich, 2011 (p. 25 et suiv.)

2 « Quel avenir pour l'approvisionnement en électricité de la Suisse ? », Académies suisses des sciences, 2012 (p. 103)

3 <https://www.bmwi.de/Redaktion/FR/Dossier/laboratoires-vivants-espaces-de-tests-pour-les-innovations-et-la-reglementation.html>

Associations et ONG

1.6.2. Les associations doivent passer à l'action !



Les associations doivent adopter une approche plus active et mieux coordonnée pour informer les instances politiques, l'économie et le grand public sur les solutions de stockage d'énergie. En outre, elles devraient exiger des instances politiques la mise en place de conditions-cadres économiques et juridiques claires en matière de stockage d'énergie.

Des associations comme AEE Suisse, energie-cluster.ch, SuisseEnergie, swisscleantech et Swissolar peuvent jouer un rôle important dans la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050 parce qu'elles sont actives au niveau des interfaces entre la population, l'économie et la politique.

Dans le domaine du stockage de l'énergie, les activités de la plupart des associations sont cependant assez modestes. Sur les sites Web, les technologies telles que les accumulateurs techniques, le stockage de chaleur saisonnier, le power-to-gas et les réservoirs d'air comprimé sont décrites de manière très superficielle, simpliste voire pas du tout.

Une approche plus active et mieux coordonnée serait utile pour mieux informer sur les différentes technologies de stockage. La Suisse pourrait s'inspirer de l'exemple allemand du Bundesverband Energiespeicher (Association fédérale du stockage de l'énergie)¹ qui regroupe les entreprises et institutions impliquées dans la fabrication, la planification, la vente, l'exploitation et le développement de solutions de stockage d'énergie. Sur son site Internet, l'organisme propose une vue d'ensemble des différentes technologies de stockage, ainsi que des fiches d'informations et des exemples d'application pour un grand nombre de ces technologies. En Suisse, seul le Forum Stockage d'énergie de l'AEE Suisse joue un rôle similaire à celui du Bundesverband Energiespeicher.



Energie

Programmes nationaux de recherche 70 et 71

Notes et références

1 <https://www.bves.de>

Fournisseur d'énergie # Politique (Confédération, canton, commune)

1.6.3. Implication plus forte des fournisseurs d'énergie !



Les fournisseurs d'énergie doivent exiger des instances politiques un cadre économique et juridique clair, et soutenir la recherche et le développement de nouvelles technologies de stockage.

Les fournisseurs d'énergie peuvent apporter leur contribution à la diffusion du stockage de l'énergie à deux niveaux. D'une part, ils devraient expliquer clairement aux instances politiques que des investissements à long terme ne seront réalisés que lorsque les conditions-cadres économiques et juridiques du stockage d'énergie seront clarifiées.

D'autre part, les fournisseurs d'énergie devraient soutenir la recherche et le développement de nouvelles technologies de stockage. En tant qu'exploitants de systèmes de stockage d'énergie, les fournisseurs d'énergie disposent d'une précieuse expérience dans la planification, la réalisation et l'exploitation de solutions de stockage qu'ils ne partagent encore guère avec la communauté de la recherche et du développement jusqu'à présent. L'implication ciblée des fournisseurs d'énergie dans l'accompagnement des projets de recherche et de développement garantit que les technologies de stockage étudiées seront mises en œuvre et exploitées de façon rentable.

Associations et ONG # Fournisseur d'énergie # Politique (Confédération, canton, commune)

1.6.4. Mieux informer la population !



La population doit être mieux informée sur les systèmes de stockage d'énergie. Une campagne d'information doit permettre d'accroître leur acceptation sociale.

La population ne peut pas apporter de contribution directe à l'utilisation de réservoirs d'air comprimé ou d'autres systèmes de stockage. Toutefois, elle peut y contribuer indirectement en soutenant des initiatives ou des referendums visant à promouvoir le stockage en général ou la construction de dispositifs de stockage spécifiques. À cet égard, la population doit être mieux informée sur le stockage de l'énergie. À l'heure actuelle, elle perçoit le « stockage » essentiellement comme un « stockage d'électricité » via des systèmes d'accumulation par pompage ou des batteries.¹

Une meilleure information améliorera probablement aussi l'acceptation des systèmes de stockage d'énergie. L'acceptation sociale reste un aspect sous-estimé dans le cadre de la mise en œuvre de la Stratégie énergétique 2050. Elle peut notamment jouer un rôle décisif au sujet des éoliennes^{2,3} des installations photovoltaïques⁴, des lignes à très haute tension⁵ et des compteurs intelligents⁶. En raison de la sollicitation intensive du sous-sol qu'ils impliquent, les systèmes de stockage de chaleur saisonniers pourraient eux aussi être confrontés à des problèmes d'acceptation.⁷

Pour deux raisons, les réservoirs d'air comprimé pourraient jouir d'un haut niveau d'acceptation sociale en Suisse : tout d'abord, ils seraient réalisés de façon totalement souterraine dans des régions relativement reculées ; ensuite, du fait de la forte participation d'entreprises suisses, les réservoirs d'air comprimé représenteraient une solution domestique de stockage de l'énergie.

Notes et références

1 Une enquête menée par la régie électrique de la ville de Zurich (Elektrizitätswerk Zurich) montre combien la population est mal informée sur les questions énergétiques en général et sur la Stratégie énergétique 2050 en particulier (<https://www.ewz.ch/de/ueber-ewz/newsroom/medienmitteilungen/energiestrategie2050.html>). L'enquête révèle, par exemple, que seulement 17 % de la population connaît les objectifs de la Stratégie énergétique 2050.

2 R. Wüstenhagen, M. Wolsink und M. J. Bürer, « Social acceptance of renewable energy innovation : An introduction to the concept », *Energy Policy* 35 :2683–2691, 2007

3 A. Fumagalli, « Trotz grösstem Potenzial der Schweiz : Neuerlicher Rückschlag für Waadtländer Windkraft », *Neue Zürcher Zeitung*, 18 octobre 2019, <https://www.nzz.ch/schweiz/trotz-groesstem-potenzial-neuer-rueckschlag-fuer-waadts-windkraft-ld.1515944>

4 A. H. Michel, M. Buchecker und N. Backhaus, « Renewable energy, authenticity, and tourism : social acceptance of photovoltaic installations in a Swiss Alpine region », *Mountain Research and Development* 35 :161–170, 2015

5 I. Stadelmann-Steffen, « Bad news is bad news : Information effects and citizens' socio-political acceptance of new technologies of electricity transmission », *Land Use Policy* 81 :531-545, 2019

6 D. J. Hess, « Smart meters and public acceptance : comparative analysis and governance implications », *Health, Risks & Society* 16 :243–258, 2014

7 « Solutions possibles pour la Suisse dans les conflits entre les énergies renouvelables et l'utilisation du territoire », *Académies suisses des sciences*, Zurich, 2012