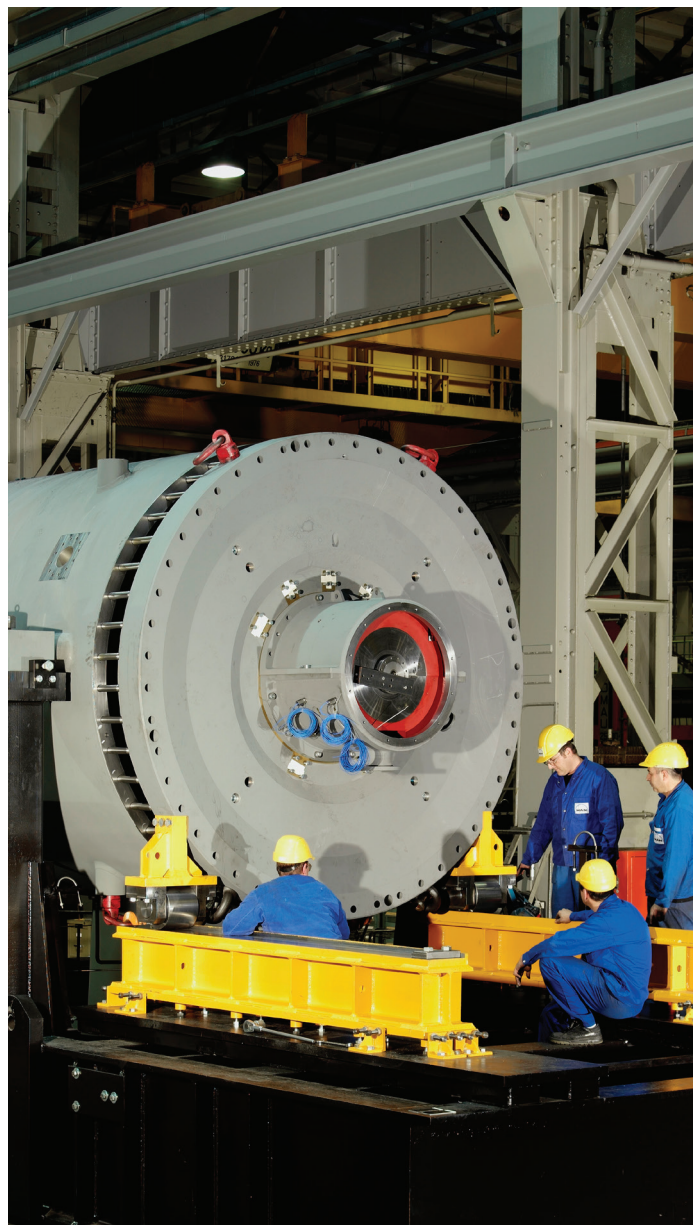


L'AIR COMPRIMÉ STABILISE LE RÉSEAU

Depuis environ cinq ans, des scientifiques suisses étudient, en collaboration avec des partenaires industriels, s'il est possible de stocker l'électricité sous forme d'air comprimé dans des cavernes rocheuses. Selon les résultats intermédiaires: les technologies indispensables pour les accumulateurs d'air comprimé sont disponibles sur le marché et de tels réservoirs pourraient fonctionner de manière rentable à l'avenir pour l'approvisionnement en puissance réglante secondaire. Actuellement, des investisseurs sont recherchés pour construire une installation de démonstration complète visant à poursuivre le développement de la technologie, dont seuls certains aspects ont été testés jusqu'à présent, jusqu'à la maturité commerciale.

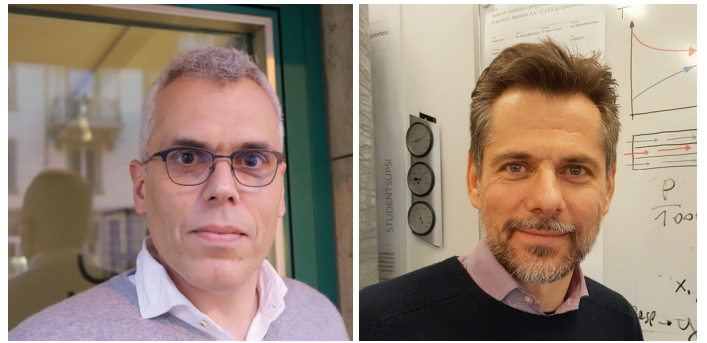
A une époque, les lacs de retenue des Alpes faisant la fierté de la Suisse. Avec eux, le pays produisait sa propre électricité écologique. Dans le même temps, utilisés en tant que centrale de pompage-turbinage, ils fournissaient une possibilité de



Exemple d'un compresseur radial tel qu'il pourrait être appliqué dans un accumulateur d'air comprimé. Source: MAN Energy Solutions Schweiz AG

stockage aussi performante que lucrative pour l'électricité. Aujourd'hui, la construction de nouveaux barrages n'est plus possible, entre autres pour la protection du paysage. Une nouvelle idée fascinante court depuis quelques années sur la manière dont l'économie de l'électricité pourrait profiter du monde de la montagne: en construisant des réservoirs dans la roche qui ne stockent pas l'électricité sous forme d'eau accumulée mais sous forme d'air comprimé. Pendant que les lacs de retenue stockent l'énergie de manière saisonnière, les réservoirs d'air comprimé sont conçus pour le stockage à court terme: ils pourraient absorber les excédents temporaires de production d'électricité renouvelable (par exemple, l'électricité solaire) dans les Alpes sans altérer le paysage pendant des heures ou des jours jusqu'à ce que les consommateurs en aient besoin. Ils pourraient également fournir ladite «puissance réglante», c'est-à-dire l'énergie de compensation indispensable pour la stabilisation du réseau électrique.

En Suisse, des scientifiques de différentes Hautes écoles ont étudié les accumulateurs d'air comprimé au cours des cinq dernières années. Ils ont été soutenus par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), le Fonds national suisse (FNS) et Innosuisse dans le cadre des projets «Swiss Competence Center for Energy Research (SCCER)». En collaboration avec des partenaires industriels tels que ALACAES SA (stockage de l'énergie), MAN Energy Solutions Schweiz AG (compresseurs/turbines), Lombardi SA (construction) et Amberg Group AG (construction de tunnels, technique de mesure), ils ont étudié si l'installation d'accumulateurs dans la roche était techniquement



Dr Andreas Haselbacher (à gauche), chercheur à l'EPF de Zurich, a coordonné différents projets de recherche sur les accumulateurs d'air comprimé. A droite: Prof. Maurizio C. Barbato, directeur du laboratoire de dynamique des thermofluides à l'Institut de génie mécanique et de technologie des matériaux (MEMTI) de la Haute école spécialisée de la Suisse italienne. Photos: B. Vogel/SUPSI

réalisable et si l'exploitation pouvait être rentable. Dr Andreas Haselbacher, qui a participé à plusieurs projets de recherche en tant que représentant de l'EPF de Zurich, tire un bilan positif des études réalisées jusqu'à présent. «En principe, un accumulateur d'air comprimé dans la roche semble réalisable puisque les technologies nécessaires sont disponibles sur le marché. Dans des conditions optimales, un tel accumulateur pourrait également être rentable en fournissant la puissance réglante secondaire nécessaire pour la stabilisation du réseau d'électricité suisse.»

Recherche d'une caverne rocheuse hermétique

Un accumulateur d'air comprimé se compose essentiellement de trois composants principaux: lors du processus de

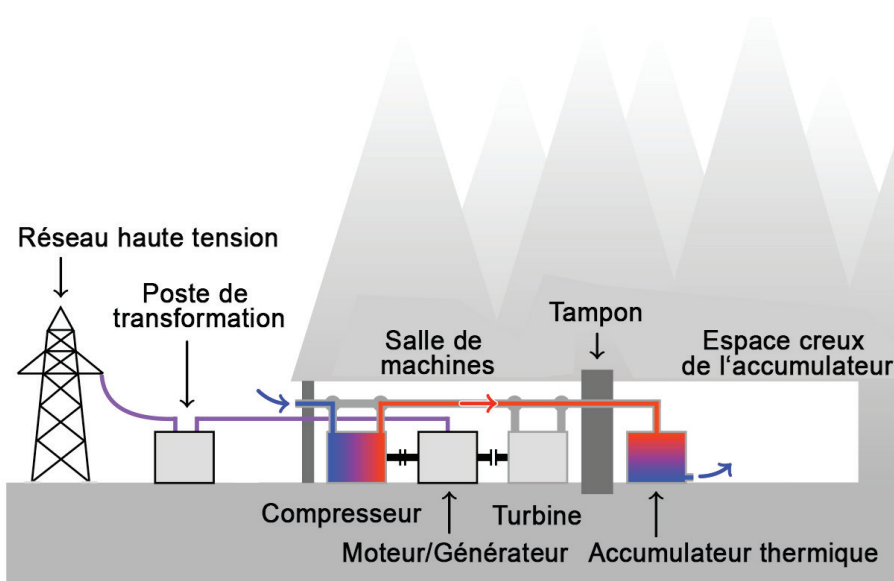


Illustration d'un accumulateur d'air comprimé: l'électricité «excédentaire» est comprimée dans un compresseur. Cela génère un air comprimé chaud qui est ensuite guidé dans une caverne rocheuse équipée d'un accumulateur de chaleur. De cette manière, l'énergie électrique peut être conservée sous forme d'air comprimé (dans un espace creux de l'accumulateur) et de chaleur (dans l'accumulateur thermique). Lors de la décharge de l'accumulateur d'air comprimé, le processus est inversé: l'air comprimé absorbe la chaleur de l'accumulateur thermique et est ensuite dirigé vers une turbine, qui produit de l'électricité via le générateur raccordé. Illustration: A. Haselbacher

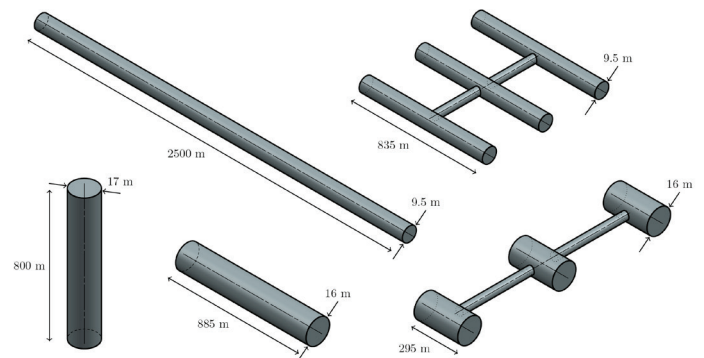
charge, les compresseurs transforment l'énergie électrique en air comprimé chaud. Ce dernier est acheminé à travers un accumulateur de chaleur, il y est refroidi puis conservé dans une caverne rocheuse hermétique. Lors du processus de décharge, l'air froid circule en dehors de la caverne à travers l'accumulateur de chaleur, absorbe la chaleur puis se développe dans une turbine, laquelle produit de l'électricité via un générateur. Parce que l'accumulateur stocke de l'air comprimé mais aussi la chaleur générée par le compresseur, on parle ici d'un accumulateur d'air comprimé adiabatique. Un projet pilote dirigé par le Dr Giw Zanganeh dans une galerie de la NLFA du Tessin a permis de faire les premières expériences avec ce concept de 2014 à 2016. Le projet de recherche a confirmé, entre autres, qu'un accumulateur de chaleur fabriqué à partir de graviers et d'un alliage aluminium-cuivre-silicium absorbe et restitue la chaleur générée lors de la compression conformément aux prévisions.

Le projet a également prouvé l'étanchéité de la caverne rocheuse à une pression de 8 bars (tandis que la pression cible de 33 bars n'a pas été atteinte en raison d'un problème technique dans l'étanchéité de la galerie). Ainsi, il n'existe actuellement aucune preuve expérimentale qu'une caverne rocheuse puisse résister à la pression de 100 bars qui règne probablement dans un accumulateur d'air comprimé commercial, avec un degré de certitude élevé et sur des milliers de cycles de fonctionnement.

Le projet consécutif de l'OFEN a désormais pour objectif d'obtenir des informations supplémentaires: les scientifiques de l'EPF de Zurich souhaitent clarifier sous quelle forme (par ex. sphère, cylindre, plusieurs cylindres reliés par une galerie ou un puits) une caverne rocheuse pourrait être construite à moindres coûts pour l'usage prévu. Ils souhaitent également analyser s'il serait possible d'assurer l'étanchéité d'une caverne par l'application d'un film en plastique (aussi économique que possible). Les sociétés Sika AG (chimie spécialisée) et Amberg Group AG participent au projet. Les résultats seront probablement disponibles au cours de cette année.

Application pour la mise à disposition de puissance réglante

Une autre étude, également financée par l'OFEN, s'est terminée en 2019. Elle a analysé le comportement des turbomachines (compresseurs, turbines) qui assurent la charge et la décharge de l'accumulateur d'air comprimé. En collaboration avec la société MAN Energy Solutions Schweiz AG et



Une caverne rocheuse d'un volume de 177'000 m³ nécessiterait un accumulateur d'air comprimé commercial d'une capacité de 500 MWh, ce qui correspond à une sphère d'un diamètre de 70 m. Comme l'indique le graphique, d'autres formes sont toutefois envisageables. La forme la plus appropriée est actuellement étudiée dans le cadre d'un projet de l'OFEN encore en cours. Illustration: Philipp Roos / Andreas Haselbacher

une équipe de l'EPF de Zurich, des chercheurs de la Haute école spécialisée de la Suisse italienne (SUPSI) ont simulé les calculs en se basant sur les turbomachines disponibles dans le commerce. Le comportement transitoire des turboma-



L'accumulateur de chaleur, tel qu'il a été développé dans le cadre du projet pilote tessinois, se divise en deux parties: la cuve en béton de 2 x 10 x 2 m (au centre) est remplie de graviers qui absorbent une partie de la chaleur produite lorsque l'air chauffe à une température d'env. 600 °C lors de la compression. La deuxième partie de l'accumulateur de chaleur (à droite) se compose à l'intérieur de tubes d'acier empilés remplis d'un alliage aluminium-cuivre-silicium. L'alliage stocke la chaleur latente lors du transfert de phase solide/liquide (525 °C). L'accumulateur de chaleur latente s'assure que l'accumulateur de chaleur en deux parties émette une température pratiquement constante lors de la décharge, ce qui est avantageux pour le fonctionnement de la turbine. Photo: Viola Becattini

Comparaison de technologies de stockage

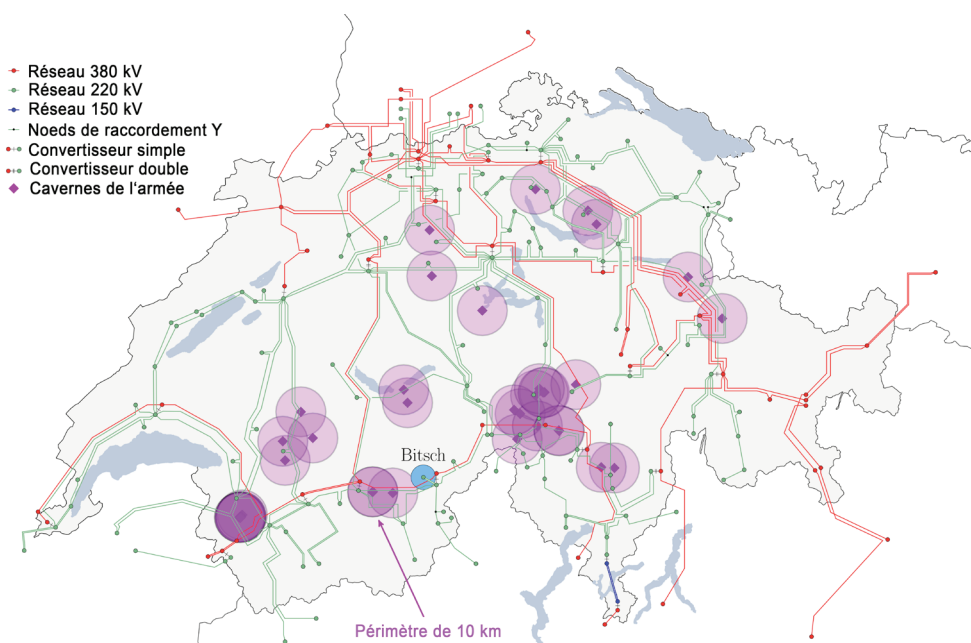
	Degré d'efficacité	Durée de vie en cycles de charge/décharge et dégradation correspondante			Investissement financier [€/kWh]
		100%	80%	33%	
Accumulateur d'air comprimé	75%	> 25'000 aucune dégradation			200 - 300
Centrale de pompage-turbinage	85%	> 25'000 aucune dégradation			240
Batterie lithium-ions	90%	4000	6000	8500	590
Batterie à flux redox au vanadium	75%	2900	3500	7500	660

Les accumulateurs d'air comprimé n'atteignent pas le degré d'efficacité des centrales de pompage-turbinage ou des batteries lithium-ions mais, selon les calculs disponibles, ils ont une longue durée de vie (60 ans, resp. plus de 25'000 cycles de charge/décharge) et impliquent un faible investissement en comparaison. Tableau: Rapport final AA-CAES-G2G/par B. Vogel

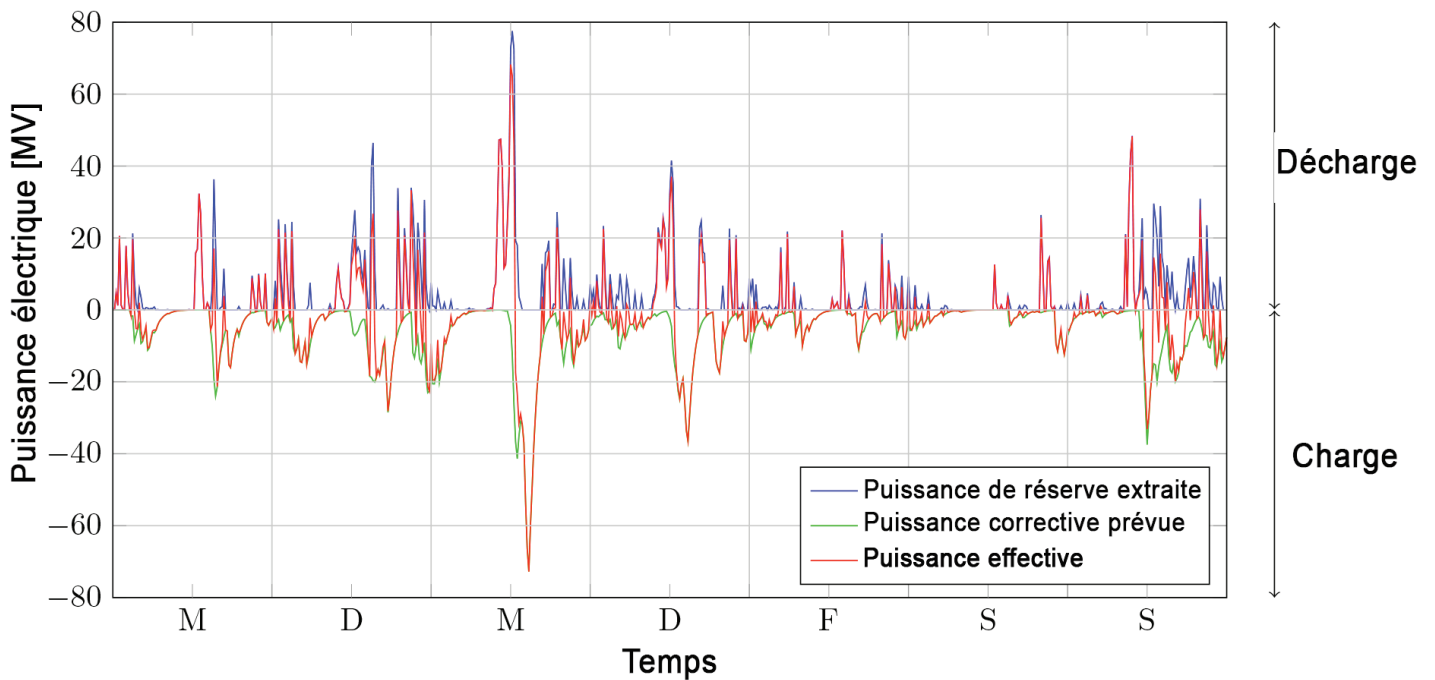
chines pendant le démarrage et l'extinction de l'installation s'est avéré particulièrement intéressant. Il a montré que la consommation d'énergie et le temps pour le démarrage des turbomachines sont importants lorsque l'accumulateur fonctionne avec de brefs cycles de charge/décharge (< 30 min.) ou à bas régime (< 30%). Les scientifiques sont arrivés à la conclusion que le plus judicieux du point de vue énergétique, est de laisser tourner les turbomachines tranquillement pendant les pauses (aucun processus de charge ou de décharge) et de les maintenir chaudes afin qu'elles ne s'arrêtent et ne refroidissent pas. Cela permet d'éviter les longs délais de démarrage à froid.

«Un accumulateur d'air comprimé atteint le point de fonctionnement optimal en quelques minutes pour la réception et la distribution de l'électricité. Il est donc adapté pour la mise à disposition de puissance réglante secondaire», affirme Maurizio Barbato, professeur à la SUPSI. La mise à disposition

de puissance réglante secondaire signifie: à chaque fois que le réseau électrique est trop ou pas assez alimenté, des accumulateurs d'air comprimé sont chargés ou déchargés pendant une courte période pour stabiliser le réseau électrique. Le marché suisse de la puissance réglante est ouvert à tous les fournisseurs depuis 2009. La part de marché pour la puissance réglante à elle seule est de l'ordre de la centaine de millions de francs suisses. Les exploitants d'accumulateurs d'air comprimé pourraient recevoir une part de ce gâteau, à condition de pouvoir ensuite se récupérer la puissance réglante fournie sur le marché au comptant à des conditions favorables. L'investissement financier pour un accumulateur de 500 MWh avec une puissance de charge pouvant atteindre 135 MW et une puissance de décharge de 100 MW se situe entre 100 et 150 millions de francs suisses. Selon les dernières estimations des experts, environ la moitié des coûts revient à l'excavation, environ un tiers aux turbomachines et env. 5% aux deux accumulateurs de chaleur.



Selon les calculs des chercheurs du SCCER, si un accumulateur d'air comprimé devait être construit là où il délésterait le plus le réseau électrique suisse, il devrait se situer à Bitsch (Valais); il y passe une importante ligne électrique qui achemine l'énergie nucléaire française en Italie. Les points violets représentent quelques cavernes militaires désaffectées. Le résultat des recherches indique qu'elles ne sont pas adaptées pour la construction d'un accumulateur d'air comprimé. De manière générale, la région du Gothard est recommandée en raison de sa roche compacte laquelle est, par conséquent, suffisamment dense. Graphique: Jared Garrison, centre de recherche sur les réseaux d'énergie, EPF Zurich



L'illustration montre les courbes de puissance d'un accumulateur d'air comprimé d'une capacité de 100 MW, qui fournit une puissance réglante secondaire (également nommée puissance de «réserve» ou de «correction») pendant une semaine en janvier. Le marché de la puissance réglante secondaire sert à compenser les erreurs de prévision et la défaillance des charges ou des unités de production. La puissance de réserve extraite (en bleu) représente un signal de Swissgrid. Pour équilibrer le niveau de charge, la puissance corrective (en vert) est achetée ultérieurement sur le marché au comptant. Le rendement effectif de l'installation (en rouge) est fourni par la turbine (puissance réglante positive) ou le compresseur (puissance réglante négative). Graphique: Alexander Fuchs, centre de recherche sur les réseaux d'énergie, EPF Zurich

Nouvelle avancée des cavernes

La centrale de pompage-turbinage de Limmern a été mise en service en 2016 dans le canton de Glaris. Pour un investissement financier de 2,1 milliards de francs suisses, la centrale peut fournir une puissance de pointe et réglante pouvant atteindre 1000 MW, une valeur environ dix fois plus élevée que celle de l'accumulateur d'air comprimé décrit ci-dessus. Dans les conditions actuelles du marché de l'électricité, la centrale de pompage-turbinage fonctionne à perte.

Malgré cet environnement difficile, les accumulateurs d'air comprimé sont un modèle d'avenir, déclare le professeur Barbato sur la base de récents calculs économiques: «Aujourd'hui, les grands accumulateurs électriques de notre pays ne sont pas rentables mais cela pourrait changer à moyen terme. Nous devons intégrer toujours plus d'énergies renouvelables issues de la production décentralisée dans notre système énergétique et pour cela, nous avons besoin d'une grande disponibilité des systèmes de stockage, en Suisse comme à l'étranger.» Les scientifiques ont comparé différents systèmes de stockage (cf. tableau p. 4). Selon cette étude, même si les

accumulateurs d'air comprimé ont un rendement inférieur à celui des installations de pompage, ils ont un impact nettement moindre sur l'écosystème et le paysage alpin. En outre, les accumulateurs d'air comprimé sont moins chers que les batteries de stockage.

Reste à savoir où construire les accumulateurs d'air comprimé. Comme l'ont démontré des chercheurs dans le cadre d'un projet SCCER réalisé de 2017 à 2020, les cavernes vides de l'armée ne sont pas adaptées à cette fin. Les cavernes existantes n'ont pas le volume requis et ont également une grande surface par rapport à leur volume, ce qui entraîne des pertes de chaleur relativement élevées dans la roche. Les nombreux accès sont également problématiques car ils rendent l'étanchéité laborieuse. Par ailleurs, la plupart des cavernes ne se situent pas dans des zones où la roche est adaptée, c'est-à-dire dense. Les accumulateurs d'air comprimé imposeraient ainsi de nouvelles excavations. Ce qui est encore moins coûteux que la construction d'un réservoir sous pression en béton, comme l'a montré le projet européen RICAS auquel l'EPF de Zurich a également participé.

Recherche d'investisseurs

Si un accumulateur d'air comprimé doit devenir une réalité en Suisse, l'étape suivante consisterait à construire une installation de démonstration. Elle n'aurait pas encore la puissance d'un accumulateur commercial mais elle contiendrait tous les composants d'un modèle courant et serait raccordée au réseau électrique. Qui pourrait financer une telle installation – les coûts sont de l'ordre de 10 millions de francs suisses – n'est pas clair pour le moment. Elle suscite un intérêt certain dans l'industrie suisse. «La mise à disposition de solutions d'accumulateurs d'air comprimé pour la réalisation concrète de la nouvelle politique énergétique correspond exactement à notre nouvelle orientation stratégique», affirme Dr Philipp Jenny de la société MAN Energy Solutions Schweiz AG (Zurich), qui trouve son origine dans le commerce de turbomachines de l'entreprise Sulzer. Felix Amberg, président du Conseil d'administration du groupe Amberg (Regensdorf/ZH), montre de l'intérêt. «Nous sommes très intéressés d'apporter notre savoir-faire dans le domaine de la technique de construction pour la conception et la construction d'une telle installation.» La construction d'une installation de démonstration reste un véritable tour de force.

- Le **rapport final** du projet «AA-CAES-G2G – Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage grid-to-grid performance modeling» est disponible sur:
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=40602>
- Liens vers les rapports du projet **FNS**:
<https://www.nfp-energie.ch/de/projects/umbrella/109/>
<https://www.nfp-energie.ch/de/projects/1010/>
<https://www.nfp-energie.ch/de/projects/1011/>
<https://www.nfp-energie.ch/de/projects/1012/>
- Roland Brüniger (roland.brueeniger[at]brueniger.swiss), responsable du programme de recherche de l'OFEN sur les technologies de l'électricité, communique des **informations** sur le thème des accumulateurs d'air comprimé.
- Vous trouverez d'autres **articles spécialisés** concernant les projets phares et de recherche, les projets pilotes et de démonstration dans le domaine des technologies de l'électricité sur www.bfe.admin.ch/ec-electricite.