N° 1/2024

gazette

Énergie et technique

65e année

Stockage local d'hydrogène



Le rôle de l'hydrogène dans un approvisionnement en énergie renouvelable reste à définir. Son utilité est par contre indiscutable. Son application énergétique fait l'objet d'un consensus selon lequel l'hydrogène devrait être utilisé là où il n'existe pas d'alternatives. L'établissement d'une économie de l'hydrogène en Suisse dépend de la disponibilité, des coûts ainsi que des capacités de stockage local.

Champs d'application de l'hydrogène

Le rôle de l'hydrogène dans un approvisionnement en énergie renouvelable fait l'objet de discussions intensives et controversées. L'utilité industrielle de la matière première est par contre indiscutable. Son application énergétique fait l'objet d'un consensus selon lequel l'hydrogène devrait être utilisé avant tout là où des alternatives sont difficiles à adopter.

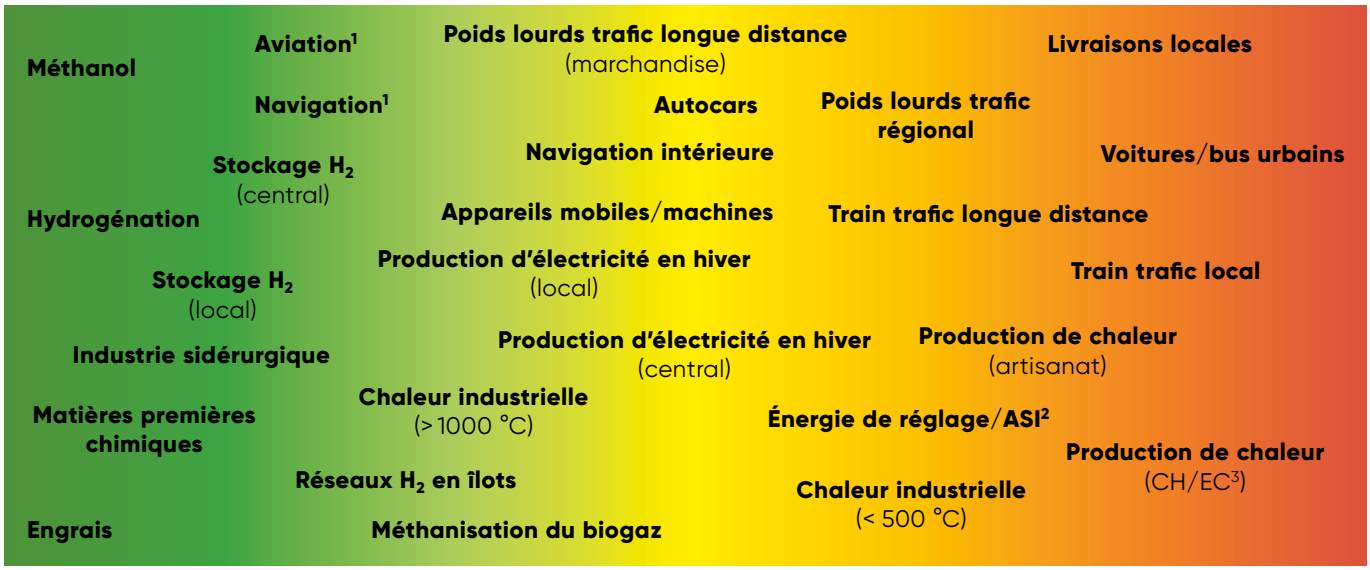
L'hydrogène est une matière première utilisée depuis longtemps dans l'industrie chimique. Dans les processus de production concernés, l'hydrogène est un additif nécessaire aux différentes formules et n'a parfois pas d'alternatives.

À l'inverse, les opinions relatives à l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie divergent fortement. Il y a par ailleurs quelques questions importantes à clarifier, telles que:

- L'utilisation de l'hydrogène dans l'industrie est-elle rentable?
- Les besoins futurs seront-ils avant tout couverts par des importations ou une production locale?
- Quelle est la capacité de stockage nécessaire pour établir une économie de l'hydrogène?
- Quel moyen de transport (réseau gazier ou remorque) est le plus approprié à quel moment?

Selon le consensus international, l'utilisation d'hydrogène comme source d'énergie peut avant tout jouer un rôle important dans les domaines où les alternatives renouvelables sont difficiles à utiliser. C'est notamment le cas dans la sidérurgie, la navigation internationale et les vols long courrier. Il reste aujourd'hui à savoir si l'électrification des poids lourds (transport de marchandises par camion) doit se faire avec de l'hydrogène ou des batteries. En termes de production d'électricité et de réseaux de chaleur, l'hydrogène ne jouera qu'un rôle de complément pour couvrir les pics de consommation en hiver. La plupart des experts estiment donc que l'hydrogène est inefficace et non rentable pour la production de chauffage et d'eau chaude ainsi que pour les voitures (véhicules privés, de livraison, etc.). Une électrification directe à l'aide de pompes à chaleur et de véhicules électriques à batterie est plus efficace dans ce cadre.

Utilisation de l'hydrogène



Nécessaire **Pas nécessaire**

[1] Carburants de synthèse produits avec de l'hydrogène (H_2), méthane, ammoniaque
[2] Alimentation sans interruption
[3] chauffage / eau chaude

Sources: sur la base des estimations de M. Liebreich Associates V 5.0 2023; Gregor Hagedorn 2024; Envenion GmbH 2024

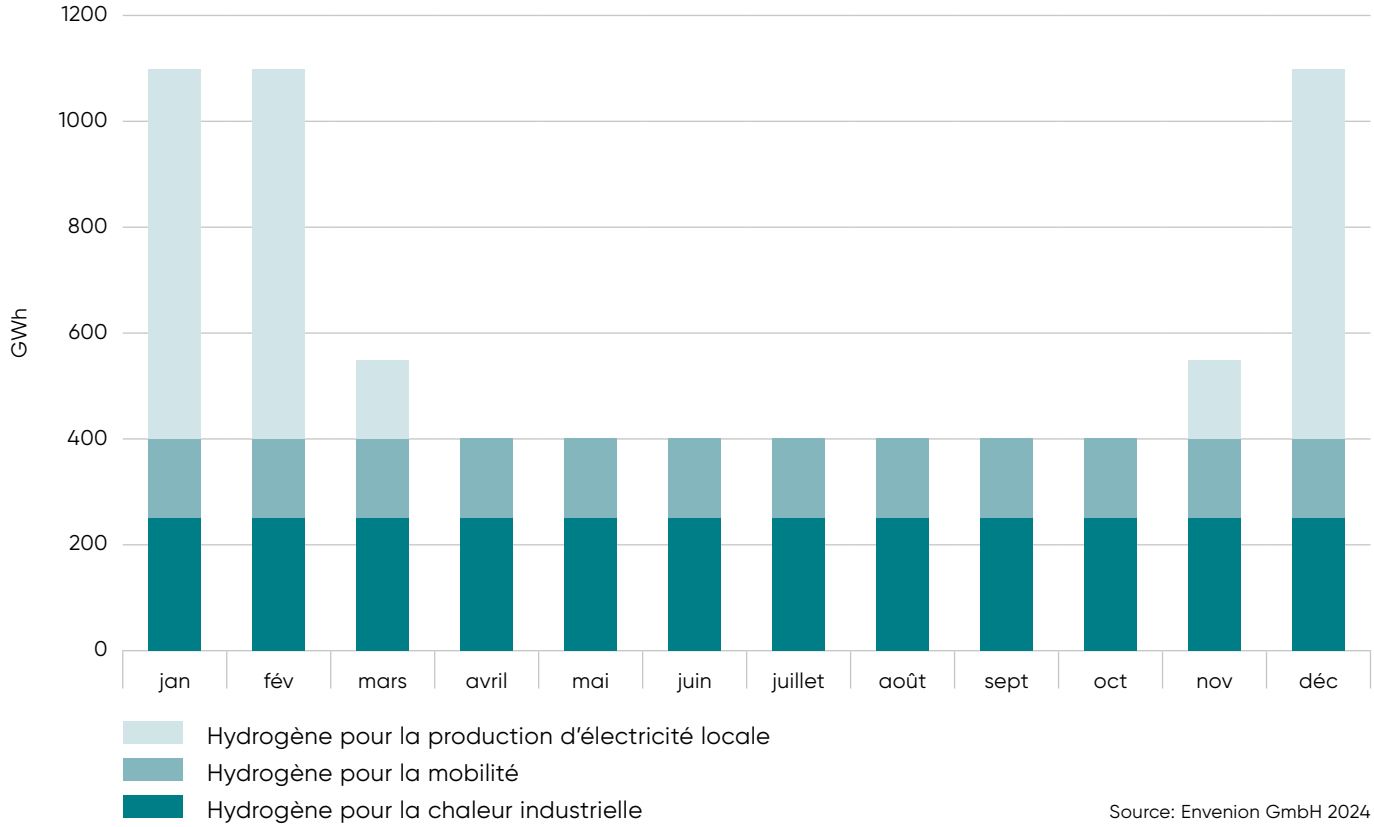
Besoins futurs en hydrogène

Les besoins en hydrogène dépendront à l'avenir de facteurs externes tels que le développement économique et politique suisse. Les besoins en électricité sont sensiblement plus élevés en hiver et un stockage local d'hydrogène semble donc idéal pour produire de l'électricité en utilisant la chaleur sur place. Une étude actuelle de l'EPF[1] estime que 25 % de l'électricité produite doit être stockée. Dans les domaines de la mobilité et la chaleur industrielle, les besoins sont constants sur toute l'année, à savoir entre 1 et 3 TWh et entre 2 et 4 TWh.

Les processus qui recourent à l'hydrogène pour produire de la chaleur industrielle à haute température ont des besoins sur toute l'année, car les chauffages à l'hydrogène sont exploités en continu. L'utilisation de l'hydrogène dans le domaine de la mobilité permet le transport de marchandises en recourant toute l'année à des camions à hydrogène afin de distribuer régulièrement de grandes quantités de marchandises dans toute la Suisse. Ensemble, les champs d'utilisation que sont la chaleur industrielle et la mobilité représentent des besoins potentiels annuels d'environ 4800 GWh (400 GWh par mois). Avec des besoins d'environ 2400 GWh, la production locale d'électricité durant l'hiver devrait de préférence être assurée sur des sites consommant également de la chaleur. Il est ainsi possible d'utiliser directement la chaleur émise lors de la reproduction d'électricité d'installations CCF ou de grandes piles à combustible. Le taux d'efficacité du système grimpe ainsi à plus de 90 %. Il peut même atteindre 200 % au total si on utilise également l'électricité pour une pompe à chaleur assurant le reste de la production de chaleur.

[1] CO_2 Neutral Energy Security for Switzerland; Andreas ZÜTTEL et al.; Mai 2024

Estimation des besoins futurs en hydrogène en Suisse



Source: Envenion GmbH 2024

Stockage d'hydrogène HyCS par AMBARtec

La technologie de stockage compact d'hydrogène (HyCS®) offre des applications stationnaires et mobiles. Cette solution permet de stocker de l'énergie sous une forme compacte et à long terme pour le transport, pour la reproduction d'électricité décentralisée avec couplage chaleur-force et pour la gestion des charges. La densité élevée du système rend possible des approvisionnements en énergie via une logistique appropriée. La manipulation de ce système de stockage non pressurisé ne présente aucun danger.

Contexte

AMBARtec AG est une startup active dans les technologies de stockage de l'énergie et l'hydrogène. Le système de stockage HyCS sera produit en série dès 2025. Seuls des prototypes sont utilisés aujourd'hui. Le système de stockage HyCS est prévu sous une forme mobile (transport par camion ou train), mais permet aussi une utilisation stationnaire.

Technique de stockage

Cette technologie ne permet pas de stocker directement de l'hydrogène. Le réservoir de stockage est en principe rempli de granulés de fer oxydés ou purs. Il ne contient donc pas d'hydrogène et n'est pas pressurisé. Ces caractéristiques en font un système de stockage d'hydrogène de grande capacité ne présentant aucun danger et donc parfaitement adapté au transport. La capacité d'un conteneur standard de 20 pieds (6 m × 2,4 m × 2,6 m) est de 600 kg d'hydrogène, soit 20 000 kWh d'énergie.

Processus de stockage

Lors du chargement, l'oxyde de fer du réservoir est réduit en fer par l'apport d'hydrogène. Ce processus entraîne la production de vapeur d'eau (H_2O). Lors du déchargement, le fer est soumis à de la vapeur d'eau, l'oxygène réagit avec le fer pour former de l'oxyde de fer et de l'hydrogène est libéré. Le système HyCS est le plus compact des accumulateurs d'énergie avec la densité énergétique gravimétrique la plus élevée en kWh/kg.

Déroulement

L'hydrogène est emmagasiné dans le réservoir sur le site de production à l'aide d'une unité de charge. De la vapeur d'eau est ajoutée et peut à nouveau être utilisée pour l'électrolyse. Le réservoir ne contient alors que des granulés de fer. Lors du déchargement, de la vapeur d'eau est amenée sur le lieu de consommation. Celle-ci peut être produite par l'échappement d'une unité de reproduction d'électricité. Le fer est ainsi oxydé et de l'hydrogène est mis à disposition.





À gauche le conteneur HyCS; à droite, les granulés de fer pour le stockage

Source Images: AMBARtec AG

Stockage d'hydrogène sous pression par Vernconex

Le réservoir mobile sous pression de Vernconex s'intègre dans une chaîne logistique globale et permet un transport de l'hydrogène ainsi qu'une utilisation stationnaire. Développés dans ces buts précis, ces réservoirs sont prévus pour approvisionner les pompes à hydrogène.

Contexte
Vernconex assure la commercialisation, la vente et l'assistance d'un système logistique complet de conteneurs pour la distribution d'hydrogène à 350 bar. Les réservoirs sous pression sont utilisés en Suisse par Hydrospider AG pour alimenter une flotte de poids lourds construits par Hyundai. Le système est avant tout prévu pour des applications d'hydrogène à 350 bar. Ces réservoirs mobiles pressurisés sont utilisés en Suisse depuis quelques années déjà.

Technique de stockage
Les réservoirs sous pression sont des conteneurs standard de 20 pieds (6 m × 2,4 m × 2,6 m) transportables par camion et capables de stocker près de 350 kg d'hydrogène à 350 bar dans trois éléments pressurisés. Le système est composé de trois segments permettant une gestion du gaz en cascade et améliorant ainsi son exploitation.

Processus de stockage
Les sites de production d'hydrogène doivent disposer de panneaux de remplissage qui peuvent remplir de l'hydrogène de 350 à 450 bar dans les réservoirs. Les stations d'hydrogène doivent, elles, disposer de stations d'accueil permettant une réception rapide des conteneurs.

Déroulement
L'hydrogène est par exemple produit par hydrolyse dans une centrale hydroélectrique. Les réservoirs pressurisés (cf. illustration) des conteneurs sont remplis dans une station. Le conteneur est finalement transporté par camion jusqu'à la station d'hydrogène prévue en Suisse. L'hydrogène y est retransféré dans les réservoirs sous pression.



Source Images: Vernconex AG

Stockage d'hydrogène sous pression Delphy par Vallourec

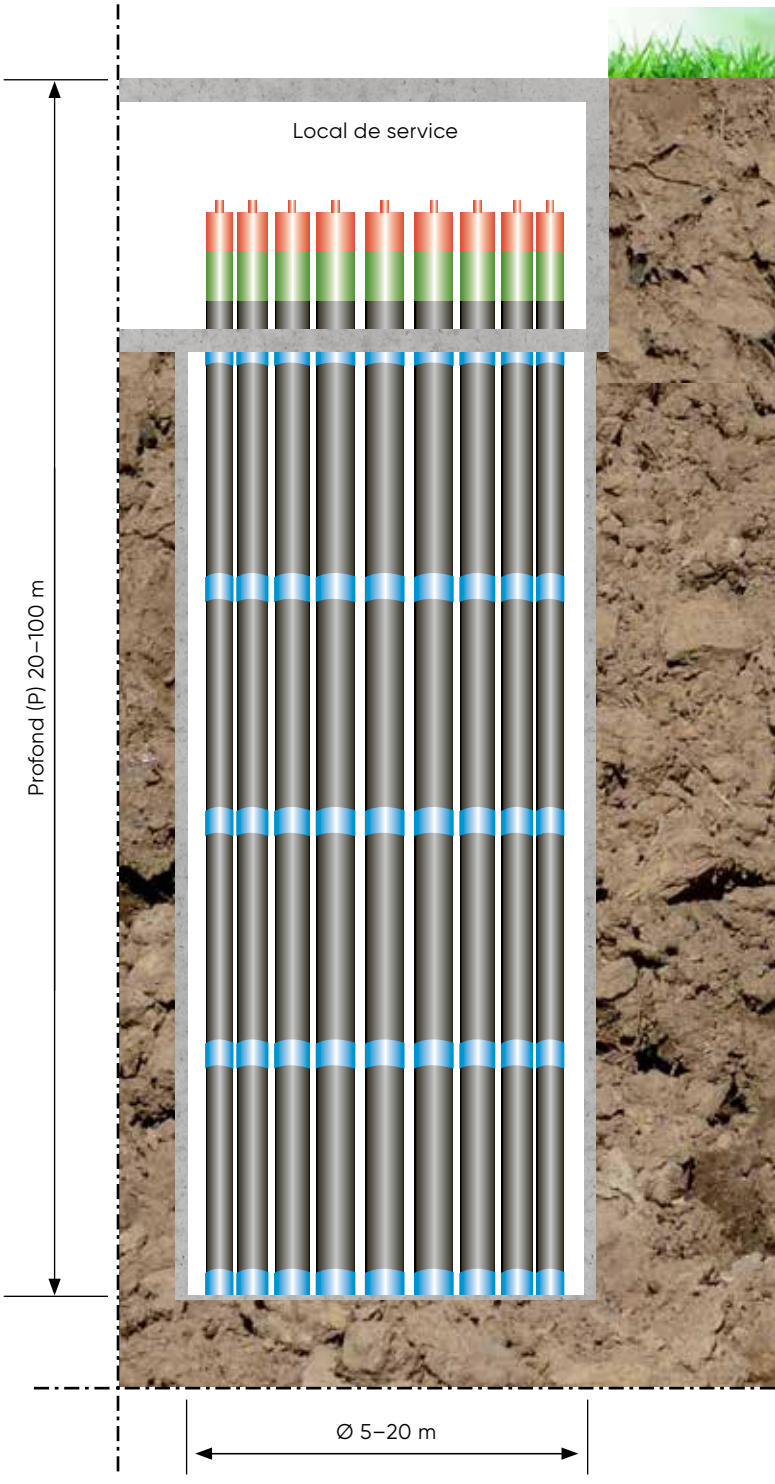
Le réservoir d'hydrogène haute capacité stationnaire et uniquement souterrain de Vallourec permet d'assurer localement un approvisionnement en hydrogène à long terme. Un projet de démonstration est actuellement mené à Aulnoye-Aymeries (France). D'autres projets pilotes sont prévus en 2025.

Contexte
Afin de couvrir les besoins croissants en réservoirs d'hydrogène et de soutenir le développement de l'hydrogène, Vallourec a développé une solution de stockage d'hydrogène unique nommée Delphy. Delphy permet de stocker de l'hydrogène comprimé sous forme gazeuse en grandes quantités, soit 1 à 100 tonnes, tout en mettant la sécurité au premier plan. Delphy stocke l'hydrogène comprimé dans des tubes souterrains occupant ainsi une surface minime au sol et offrant un design modulaire adaptable aux besoins de stockage.

Technique de stockage
Delphy stocke de l'hydrogène sous terre dans un espace restreint et offre ainsi plusieurs avantages significatifs pour le stockage d'énergie à long terme. Le recours à des technologies de construction souterraines tels que puits de ventilation et fontaines d'accès permet de maximiser la capacité sans occuper plus d'espace à la surface. Au final, un réservoir Delphy occupe une surface jusqu'à 30 fois moins étendue que ses alternatives hors sol composées généralement de rayons de bonbonnes.

Processus de stockage
L'hydrogène est comprimé (300 bar en moyenne, jusqu'à max. 500 bar) et introduit dans des tiges résistantes à l'hydrogène composées de tubes résistants à l'hydrogène et de raccords imperméables. Une solution de stockage sûre et fiable.

Déroulement
L'hydrogène est livré depuis le site de production à l'aide d'un réservoir mobile. Une station de compression permet de remplir le réservoir pressurisé avec de l'hydrogène. Si besoin, l'hydrogène est progressivement retiré des tubes de stockage pour être livré au consommateur final.



Source Image: Vallourec 2024

Vue d'ensemble des systèmes de stockage d'hydrogène

Les trois systèmes de stockage local d'hydrogène présentés se distinguent par leur application. Ils ne se concurrencent pas, mais se complètent selon l'utilisation et les besoins. Des systèmes de stockage locaux de plusieurs centaines de GWh sont nécessaires pour pouvoir couvrir les besoins futurs en hydrogène en hiver.

Selon le rapport du Conseil fédéral[1] de novembre 2023, les besoins énergétiques en hydrogène en Suisse seront d'environ 500 GWh en 2035 et seront ensuite multipliés par 6 pour atteindre environ 3000 GWh en 2045. Plus de 60 % des besoins en hydrogène sont effectifs en hiver. Le développement de la production d'électricité à l'aide d'énergies renouvelables laisse entrevoir en été un excédent d'électricité qu'il s'agira aussi de stocker à l'aide de l'hydrogène. À l'heure actuelle, aucun réservoir d'hydrogène souterrain approprié de grande capacité (fourchette à deux chiffres de térawattheure) n'est planifié ou exploité en Europe. L'établissement rapide d'une économie de l'hydrogène en Suisse dépend par conséquent non seulement des coûts et de la disponibilité de l'hydrogène, mais aussi des capacités de stockage locales.

Vue d'ensemble des données techniques des systèmes de stockage

Par système de stockage	AMBARtec	Vernconex	Vallourec
Capacité de stockage en kg	600	350	1000–100 000
Capacité en MWh	20	12	33–3300
Dimensions en mètres	6 × 2,4 × 2,6 (conteneurs de 20 pieds)		Ø 5–20 / P 20–100
Type de réservoir	Fer	Pression	Pression
Champ d'application	Mobile + stationnaire	Mobile + stationnaire	stationnaire
Type d'installation	Hors terre	Hors terre	Soutterrain
Transport	Sans risques	Marchandise dangereuse	
Pression de stockage en bar	0	300–350	300–500

Cette estimation des coûts concerne les besoins pour les mois de décembre à février

Perspectives 2035	Transport		Stockage
Besoins en hydrogène en hiver en GWh/a	300		
Capacité totale de stockage local en GWh	200		
Capacité de stockage mobile/stationnaire en GWh	4	1	200
Nombre de réservoirs d'hydrogène	200	100	60
Coûts d'investissement en millions de CHF	22	22	420
Frais d'entretien par installation et année[2]	0,5 %	3 %	2 %

Perspectives 2045	Transport		Stockage
Besoins en hydrogène en hiver en GWh/a	1800		
Capacité totale de stockage local en GWh	600		
Capacité de stockage mobile/stationnaire en GWh	10	2	400
Nombre de réservoirs d'hydrogène	400	200	120
Coûts d'investissement en millions de CHF	25	27	840
Frais d'entretien par installation et année[2]	0,5 %	3 %	2 %

[1] Source: rapport du Conseil fédéral du 15 novembre 2023 «Hydrogène. État des lieux et options pour la Suisse»
[2] En pour cent des coûts d'investissement

Source: Envenion GmbH 2024

Le stockage d'hydrogène local en bref

L'établissement d'une économie de l'hydrogène en Suisse dépend avant tout de la disponibilité de cette source d'énergie, des coûts et des capacités de stockage. Le développement du réseau d'hydrogène européen s'étendra jusqu'en 2040 ou plus longtemps. Le stockage local d'hydrogène est donc une condition sine qua non pour pouvoir développer un approvisionnement en hydrogène en Suisse ces prochaines années.

La production et la distribution d'hydrogène à l'aide de réservoirs mobiles ainsi que le stockage local d'hydrogène en plus grandes quantités permettent surtout aux entreprises et aux centres locaux (hubs) de faire passer rapidement les gros consommateurs actuels d'énergies fossiles à une consommation d'hydrogène. Il en va de même pour la production d'électricité locale à l'aide d'installations CCF ou de piles à combustible qui pourraient, avec leur taux d'efficacité élevé de $\eta \approx 200\,\%$ (y compris pompes à chaleur et utilisation de la chaleur émise), stabiliser les besoins futurs en électricité sensiblement plus élevés en Suisse en hiver.

Selon une étude récente, le recours à des réservoirs d'hydrogène centraux de grande capacité engendre, dans le cadre d'une modélisation, les frais globaux les plus bas pour un approvisionnement en électricité. C'est le cas si la production et la consommation d'hydrogène se font à proximité du réservoir ou en présence d'un réseau d'hydrogène performant. Les résultats de cette modélisation encouragent le monde politique et la planification des infrastructures à viser une production d'hydrogène la plus flexible possible en utilisant de grands réservoirs.[1]

Il ne sera possible de couvrir les besoins énergétiques des champs d'application présentés (mobilité, chaleur industrielle et production d'électricité) jusqu'en 2040 et après uniquement avec de l'hydrogène qu'en utilisant les possibilités de stockage présentées. Il ne sera techniquement pas possible de faire progresser plus rapidement l'économie de l'hydrogène autrement en Suisse. Les investissements réalisés sont aussi judicieux à long terme car ils permettent de créer une infrastructure pour un stockage défini de l'hydrogène et d'améliorer sensiblement la résilience énergétique de la Suisse à long terme.

Sur le plan technique, les réservoirs d'hydrogène profitent du grand et unique avantage de l'hydrogène, à savoir son stockage à long terme et sans pertes. À long terme (après 2040), la Suisse sera raccordée à un réseau européen de distribution d'hydrogène. L'approvisionnement de la Suisse en énergie sera plus fiable, plus sûr et plus indépendant en recourant à des réservoirs d'hydrogène. Dans le même temps, la Suisse émettra beaucoup moins de CO_2 dans les secteurs les plus énergivores.

[1] Heimische Produktion von Wasserstoff kann mit Kavernenspeicherung günstiger werden; DIW Berlin; 11/2023

Éditeur
Association Suisse de l'Industrie Gazière (ASIG)
044 288 31 31
asig@gazenergie.ch
www.gazenergie.ch
Rédaction
Hubert Palla, VSG
hubert.palla@gazenergie.ch
Suisse romande
Nathalie Pfund, ASIG
nathalie.pfund@gazenergie.ch

Tirage
10 000 en allemand, 3500 en français
Photo de couverture
Bühler Druck AG
Graphisme/Layout/Impression
Bühler Druck AG, Volketswil
Changement d'adresse
info@buehler-druck.ch
Abonnements gratuits
vsg@gazenergie.ch

MIXTE Papier FSC FSC® C031954
myclimate Notre impact. Durable Imprimé
myclimate.org/01-24-728380
imprimé en suisse

gaz energie