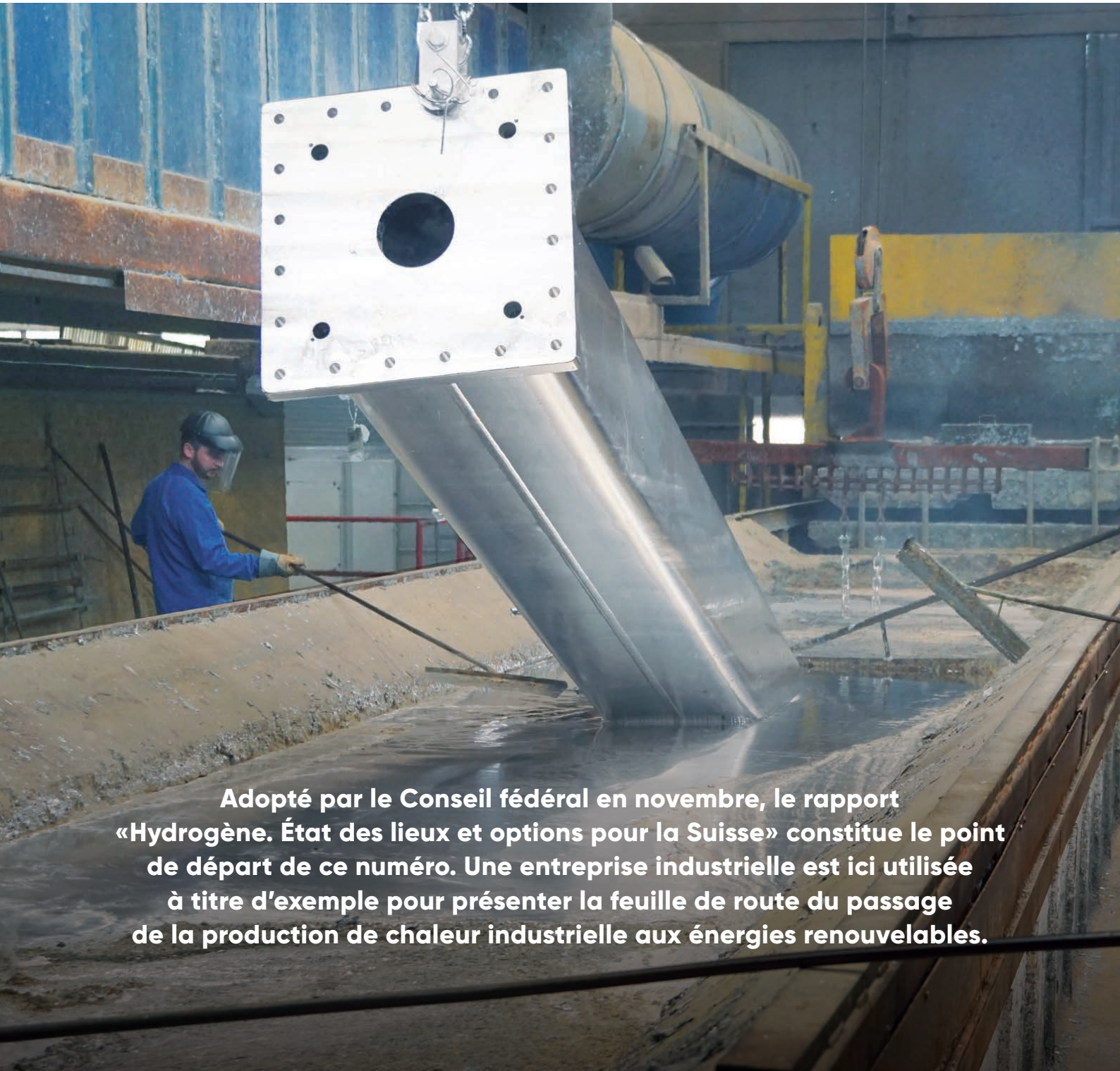
N° 3/2023

gazette
Énergie et technique

64e année

De l'hydrogène pour produire de la chaleur industrielle



Adopté par le Conseil fédéral en novembre, le rapport «Hydrogène. État des lieux et options pour la Suisse» constitue le point de départ de ce numéro. Une entreprise industrielle est ici utilisée à titre d'exemple pour présenter la feuille de route du passage de la production de chaleur industrielle aux énergies renouvelables.

Établissement d'une économie de l'hydrogène en Suisse

Lors de sa séance du 15 novembre 2023, le Conseil fédéral a adopté le rapport donnant suite au postulat «Hydrogène. État des lieux et options pour la Suisse». Ce rapport montre le rôle que pourrait jouer l'hydrogène dans le futur système énergétique suisse. Il décrit ainsi les bases d'une stratégie nationale en matière d'hydrogène qui sera présentée durant le deuxième semestre 2024.

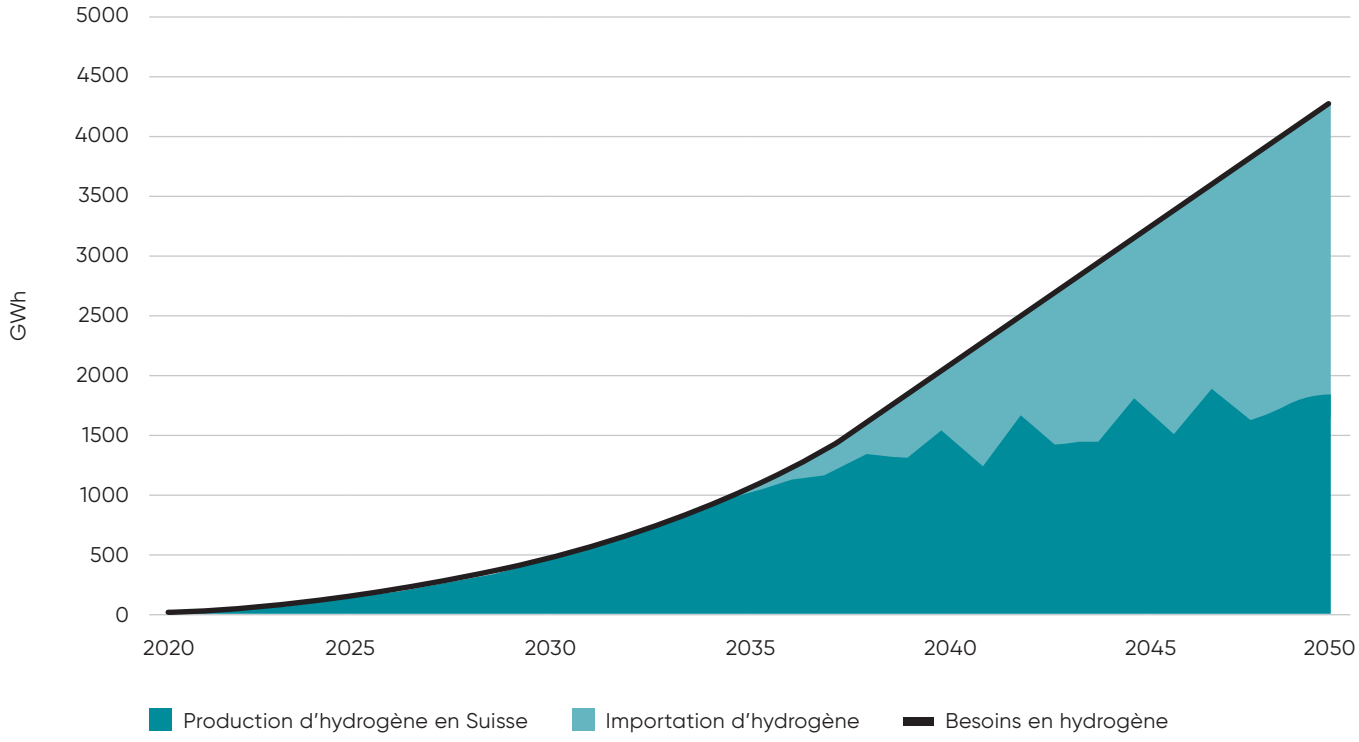
Selon ce rapport, l'hydrogène (H_2) peut contribuer de manière essentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour atteindre le zéro émission nette d'ici 2050. L'hydrogène gagnera donc en importance en tant que source d'énergie ces prochaines années. Il sera en particulier utilisé là où il n'y a aucune autre alternative renouvelable, par exemple pour produire de la chaleur dans les processus industriels à haute température.

L'infrastructure gazière européenne ne permettra des importations en Suisse qu'à partir de 2035. D'ici là, il faudra couvrir les besoins suisses en hydrogène par une production nationale. Le rapport précise que l'hydrogène devrait être produit dans des centrales existantes ou des entreprises industrielles, et utilisé directement sur place ou transporté sur d'autres sites.

Mesures en vue de l'établissement d'une économie de l'hydrogène en Suisse dès 2025

Décision d'investissement pour la conversion du gazoduc	Développement de la production d'hydrogène en Suisse
Conversion des divers réseaux gaziers pour une compatibilité avec l'hydrogène	Développement d'îlots d'hydrogène (p. ex. sites industriels)
Conversion des processus industriels pour une compatibilité avec l'hydrogène	Développement des flottes de camions à hydrogène
Raccordement au réseau d'hydrogène européen (dès 2035)	Importation d'hydrogène via le réseau gazier (dès 2035)

Besoins en hydrogène et production d'hydrogène en Suisse



Source: rapport du Conseil fédéral du 15 novembre 2023 «Hydrogène. État des lieux et options pour la Suisse»

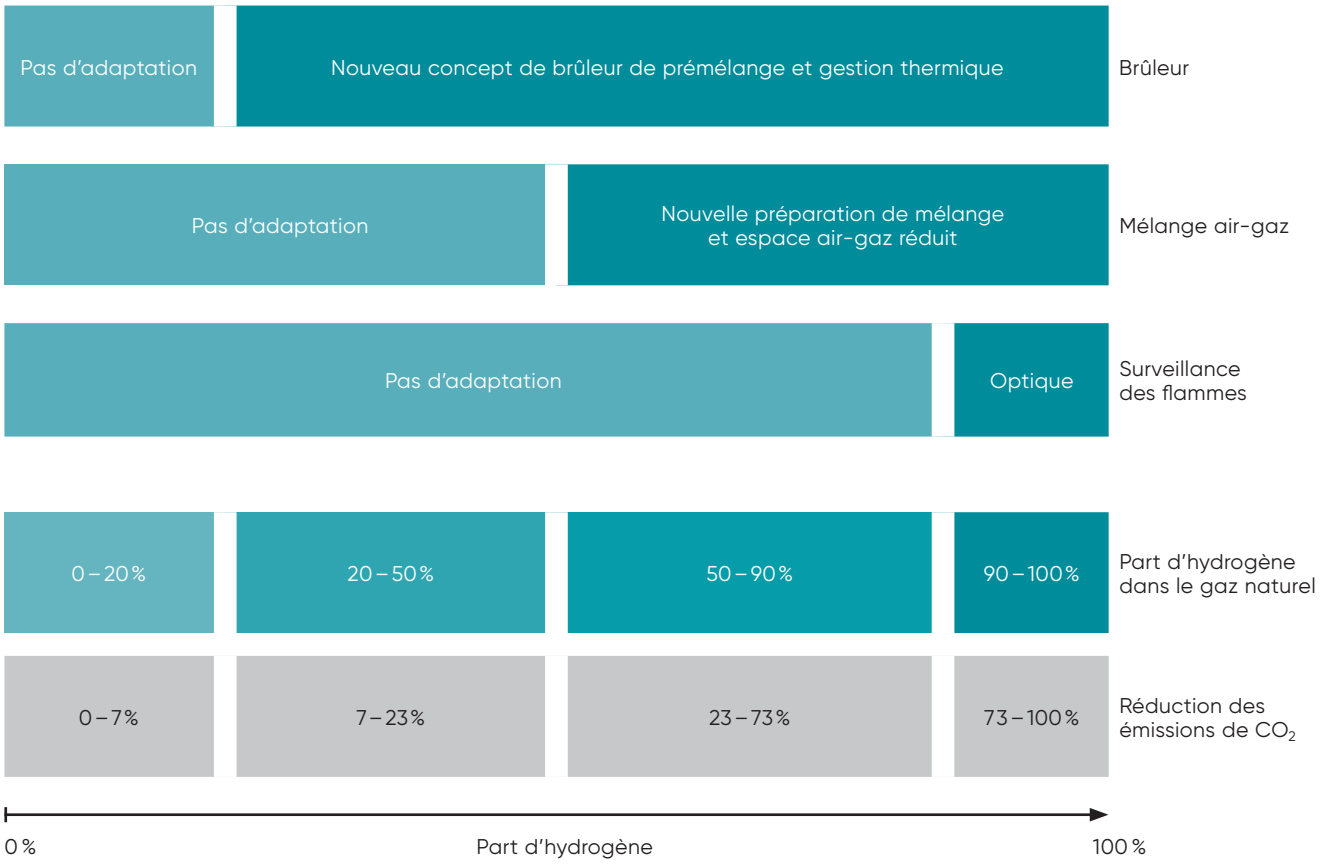
Exigences techniques posées aux appareils fonctionnant à l'hydrogène

L'utilisation de l'hydrogène présente quelques différences avec l'utilisation du gaz naturel. Sa flamme est incolore, sa température de flamme est plus élevée et il brûle et se consume aussi plus rapidement. Sa densité énergétique volumique ne représente par ailleurs qu'un tiers de celle du gaz naturel.

À plus de 2000° C, la température de la flamme d'hydrogène est sensiblement plus élevée que celle du gaz naturel, favorisant ainsi la formation de gaz NOx. La vitesse de flamme est aussi beaucoup plus élevée et le point d'éclair plus grand qu'avec du gaz naturel. L'hydrogène étant le plus petit atome, il se diffuse plus facilement à travers les matériaux et il est donc impératif d'éviter toute formation accidentelle de gaz oxhydrique détonnant en utilisant des joints appropriés. Point important, le pouvoir calorifique de l'hydrogène s'élève à seulement un tiers des valeurs par unité volumique du gaz naturel. Autres différences essentielles: sa flamme incolore et son rayonnement thermique. Alors qu'une flamme de gaz naturel émet un rayonnement infrarouge, la flamme d'hydrogène produit un rayonnement ultraviolet moins important. Ces unités de mesure servent à la régulation de la combustion.

Un appareil à hydrogène doit donc remplir certaines conditions techniques afin d'accueillir un volume trois fois plus grand de combustible et de maîtriser les températures de combustion plus élevées avec un comportement de combustion plus rapide. Ceci concerne en particulier les conduites, les buses, les ventilateurs de brûleur et la chambre de combustion. La formation plus importante de NOx lors de la combustion de l'hydrogène peut être réduite de manière fiable à l'aide d'un système de recirculation des gaz d'échappement pour satisfaire aux normes anti-pollution.

Adaptations techniques des appareils à gaz pour le recours à l'hydrogène



Sources: Bosch Thermotechnik GmbH 2023; Envenion GmbH 2023

Étude de faisabilité pour une chaleur industrielle renouvelable

Un important fabricant industriel suisse de produits de construction s'est fixé pour objectif de passer en 2040 du gaz naturel aux énergies renouvelables pour la production de chaleur industrielle. Ses installations de production ont une durée de vie d'environ 30 ans et devraient être remplacées au plus tard début 2030. La société Envenion GmbH a ainsi reçu pour mandat d'analyser, dans le cadre d'une étude de faisabilité, les conséquences possibles d'un passage de la production de chaleur industrielle à des sources d'énergie renouvelables.

Conditions cadres pour entreprises industrielles en Suisse[1]
Selon la nouvelle loi fédérale sur les objectifs en matière de protection du climat, sur l'innovation et sur le renforcement de la sécurité énergétique, toutes les entreprises industrielles de Suisse doivent atteindre le zéro émission net en 2050 au plus tard. Ces entreprises industrielles devraient déjà établir des feuilles de route, ce qui présuppose l'analyse de différentes options par exemple à l'aide d'études de faisabilité.

Des pompes à chaleur à haute température (PACHT) à alimentation électrique sont en développement pour produire de la chaleur industrielle jusqu'à 300 °C environ. Une chaleur industrielle de plus de 300 °C peut être obtenue par un procédé électrique direct, par exemple avec des chaudières à électrodes, des fours à induction ou des fours électriques à arc. Le recours à la biomasse, au biogaz, à l'hydrogène ou au méthane synthétique peut constituer une alternative judicieuse dans le domaine des processus à haute température. Ce seront principalement la disponibilité et le prix qui détermineront quelle source énergétique s'imposera dans ce segment.

On estime à l'heure actuelle que l'hydrogène ne sera vraisemblablement disponible en quantité suffisante en Suisse via l'infrastructure gazière que durant la deuxième moitié des années 2030. Le raccordement au réseau de transport européen de l'hydrogène «European Hydrogen Backbone (EHB)» devrait alors être terminé.

Situation initiale de l'étude de faisabilité
Les installations de production de l'entreprise industrielle étudiée sont en service 240 jours par année et 132 heures par semaine sans arrêt du lundi au samedi. Les deux lignes de production qui présentent une durée de vie de près de 30 ans devront être remplacées au début des années 2030 au plus tard. Ceci concerne en particulier les brûleurs à gaz actuellement utilisés dans les trois plages de températures de processus. Les besoins de chaleur industrielle qui sont aussi les besoins de chaleur finaux sont actuellement de 20 000 MWh par année et sont intégralement couverts par le gaz naturel.

Besoins actuels de chaleur industrielle dans les trois plages de températures

Température de chaleur industrielle	Part en MWh par année	Part en pour cent
80 – 100 °C	env. 2600 MWh	env. 13 %
250 – 300 °C	env. 8400 MWh	env. 42 %
750 – 850 °C	env. 9000 MWh	env. 45 %
Besoins totaux de chaleur industrielle	**env. 20 000 MWh**	**100 %**

Objectif de l'étude de faisabilité
L'étude de faisabilité a pour objectif d'analyser dans le détail les conséquences possibles d'un passage à des énergies renouvelables aussi bien sur les processus de production que sur l'approvisionnement énergétique. Le mandant souhaite par ailleurs une comparaison des différentes variantes d'approvisionnement énergétique renouvelable pour la production de chaleur industrielle.

[1] Rapport du Conseil fédéral du 15 novembre 2023 «Hydrogène. État des lieux et options pour la Suisse»

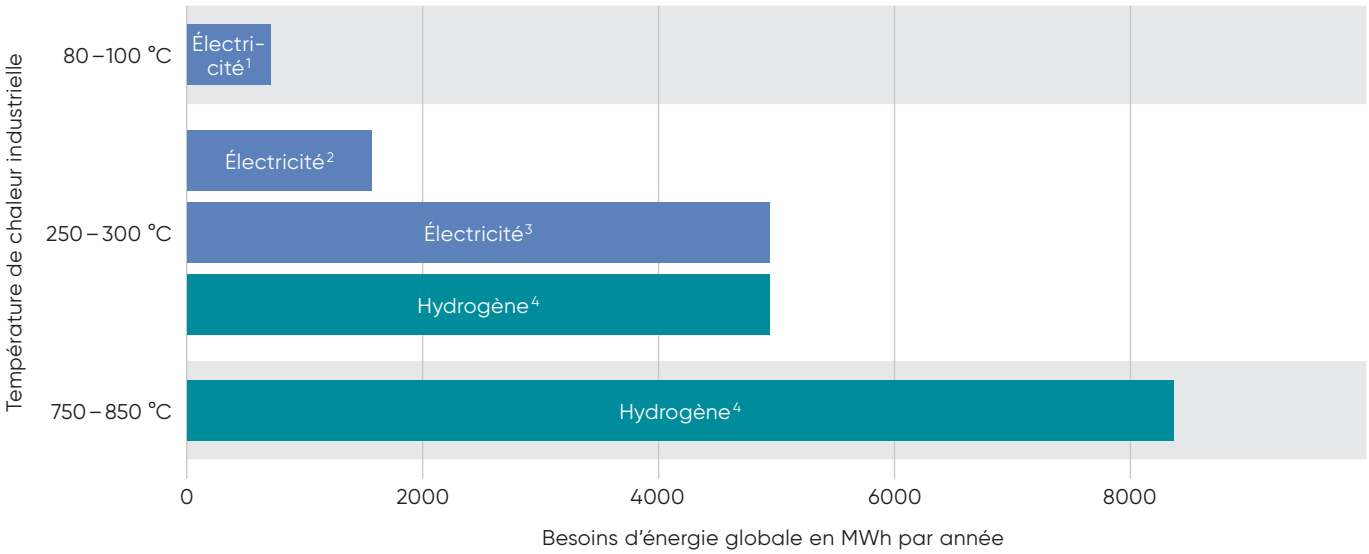
Résultats de l'étude de faisabilité
L'étude de faisabilité a cherché à connaître le fonctionnement attendu de trois variantes de production de chaleur industrielle avec des énergies renouvelables dès le début des années 2030. Les coûts énergétiques de l'électricité renouvelable et de l'hydrogène vert ont été volontairement ignorés dans ce cadre, car il est impossible de prévoir sérieusement les prix attendus au début des années 2030.

Le contrôle des installations de production a démontré qu'un remplacement permettait une augmentation de près de 25 % de l'efficacité grâce à des propriétés techniques améliorées. Une économie d'énergie de 25 % a ainsi été calculée dans le cadre de la comparaison des variantes (cf. page 6) de production renouvelable de chaleur industrielle. Ceci permet de faire baisser les besoins annuels en matière de chaleur industrielle de 20 000 MWh actuellement à 15 000 MWh. Les économies potentielles suivantes peuvent être calculées sur la base des besoins énergétiques actuels de 20 000 MWh par année: près de 47 % pour la variante A et environ 31 % pour les variantes B et C.

Cette analyse a été réalisée avec de l'électricité renouvelable et de l'hydrogène vert, car ces sources sont les plus à même de produire de la chaleur industrielle. L'énergie électrique est la plus efficace pour des plages de températures de 80 à 100 °C et de 250 à 300 °C et doit donc être utilisée en priorité. L'électricité peut être utilisée pour produire de la chaleur industrielle aussi bien directement qu'indirectement avec des pompes à chaleur. Le recours à l'hydrogène est la meilleure option dans la plage de températures de 750 à 850 °C. Un coefficient de performance (COP) de 3 a été pris en compte pour le calcul des besoins énergétiques globaux des deux systèmes électriques indirects. Un facteur de charge de 1 a été calculé pour le système électrique direct et le brûleur à gaz.

Les trois variantes sont comparées dans le tableau (cf. page 6). Des différences se constatent en particulier lors de la production dans la plage de températures de 250 à 300 °C. Il est ici possible d'utiliser de l'électricité directement ou indirectement, ainsi que de l'hydrogène en option. Si l'électricité est utilisée directement, il faut tout d'abord contrôler l'infrastructure électrique locale. Le passage aux énergies renouvelables est réalisable sur le plan technique ainsi qu'en termes d'approvisionnement énergétique. La date à laquelle le réseau gazier proposera de l'hydrogène n'étant pas encore connue, l'étude s'est également penchée sur l'approvisionnement par la route (cf. page 7). Il ne sera possible de décider de la variante de production de la chaleur industrielle nécessaire qu'à partir de 2029. La disponibilité des pompes à chaleur à haute température sur le marché et le développement des prix de l'énergie devraient être plus clairement définis à ce moment-là.

Besoins futurs d'énergie globale dans les trois plages de températures



[1] Électrique indirect avec pompe à chaleur (PAC)
[2] Électrique indirect avec pompe à chaleur à haute température (PAC)
[3] Électrique direct avec chaudières à électrodes, fours électriques à arc, fours à induction
[4] Avec brûleur à gaz à hydrogène (en option dans la plage de températures de 250 à 300 °C)

Comparaison des variantes de production renouvelable de chaleur industrielle

Température de chaleur industrielle	80 – 100 °C	250 – 300 °C	750 – 850 °C
Besoins en chaleur industrielle par année	1800 MWh	4950 MWh	8250 MWh

Variante A – Besoins totaux en chaleur industrielle: 15 000 MWh par année = total des besoins énergétiques globaux: 10 500 MWh par année

Source d'énergie	Électricité	Électricité	Hydrogène[1]
Production de chaleur	Électrique indirect[2]	Électrique indirect[3]	Brûleur à gaz
Besoins énergétiques globaux par année	600 MWh	1650 MWh	8250 MWh
Besoins énergétiques globaux par semaine	12 MWh	34 MWh	172 MWh

Variante B – Besoins totaux en chaleur industrielle: 15 000 MWh par année = total des besoins énergétiques globaux: 13 800 MWh par année

Source d'énergie	Électricité	Électricité	Hydrogène[1]
Production de chaleur	Électrique indirect[2]	Électrique direct[4]	Brûleur à gaz
Besoins énergétiques globaux par année	600 MWh	4950 MWh	8250 MWh
Besoins énergétiques globaux par semaine	12 MWh	103 MWh	172 MWh

Variante C – Besoins totaux en chaleur industrielle: 15 000 MWh par année = total des besoins énergétiques globaux: 13 800 MWh par année

Source d'énergie	Électricité	Hydrogène[1]	Hydrogène[1]
Production de chaleur	Électrique indirect[2]	Brûleur à gaz	Brûleur à gaz
Besoins énergétiques globaux par année	600 MWh	4950 MWh	8250 MWh
Besoins énergétiques globaux par semaine	12 MWh	103 MWh	172 MWh

[1] Si l'approvisionnement en hydrogène via le réseau gazier n'est pas non plus envisageable à plus long terme et si le transport par la route n'est pas rentable, la production de chaleur industrielle ne peut être réalisée qu'avec de l'électricité comme source d'énergie.

[2] Avec pompe à chaleur électrique (PAC)

[3] Avec pompe à chaleur à haute température (PACHT)

[4] Avec chaudières à électrodes, fours électriques à arc, fours à induction

Comparaison des variantes d'approvisionnement en hydrogène par la route
Il est recommandé de passer à l'hydrogène comme source d'énergie en même temps que le passage à la nouvelle installation de production au début des années 2030. Puisque l'approvisionnement en hydrogène via le réseau gazier ne sera vraisemblablement disponible qu'à partir du milieu des années 2030, il faudra opter pour une livraison d'hydrogène via des réservoirs mobiles pendant une phase de transition. L'étude de faisabilité s'est penchée sur deux techniques, à savoir les «réservoirs sous pression» et le «stockage à l'aide de granulés de fer».

Pour la chaleur industrielle dans des plages de températures de plus de 750 °C, il s'agit de couvrir des besoins annuels en hydrogène de près de 8250 MWh, ou 172 MWh par semaine, avec des réservoirs mobiles pendant une phase de transition. Le choix de la technique utilisée par les réservoirs mobiles est soumis non seulement à des aspects économiques, mais aussi aux paramètres de densité énergétique gravimétrique ou volumétrique. Le tableau suivant représente les deux systèmes de stockage mobiles disponibles sur le marché: les «réservoirs sous pression» et le «stockage à l'aide de granulés de fer». Les livraisons sont réalisées à différentes fréquences en fonction des besoins et des capacités de stockage. Il faut prévoir une légère surcapacité pour garantir une exploitation sans accrocs. Il s'agit également de prendre en compte la distance entre le producteur d'hydrogène et le site industriel.

	Réservoir sous pression (CGH_2)	**Granulés de fer (HyCS)**
Besoins en hydrogène par année	8250 MWh	8250 MWh
Besoins en hydrogène par semaine	172 MWh	172 MWh
Capacité par conteneur en MWh	11,6 MWh	20 MWh
Nombre de conteneurs par année	711 conteneurs	413 conteneurs
Nombre de conteneurs par semaine	15 conteneurs	9 conteneurs

Transport d'hydrogène à l'état gazeux à l'aide de réservoirs sous pression (CGH_2)
L'hydrogène à l'état gazeux est stocké dans un réservoir après avoir été comprimé à 350 bars. La pression appliquée en Suisse pour le transport d'hydrogène est généralement de 350 bars (24 kg/m^3). Dans le cadre du transport, ce sont des réservoirs cylindriques composés de conteneurs sous pression en fibres de verre de type IV qui se sont imposés. Le transport d'hydrogène à l'aide de réservoirs sous pression est assuré par des camions sur la route ou sur le rail. La technique mobile de Vernconex recourt à un conteneur normalisé de 20 pieds avec réservoir sous pression de 350 bars et une capacité de près de 350 kg d'hydrogène, soit 11,6 MWh d'hydrogène H_i. La station d'arrimage intégrée permet de charger et de décharger rapidement les conteneurs, et le panneau de remplissage et de consommation assure quant à lui le pilotage des réservoirs via une interface.

Autres informations: vernconex.ch

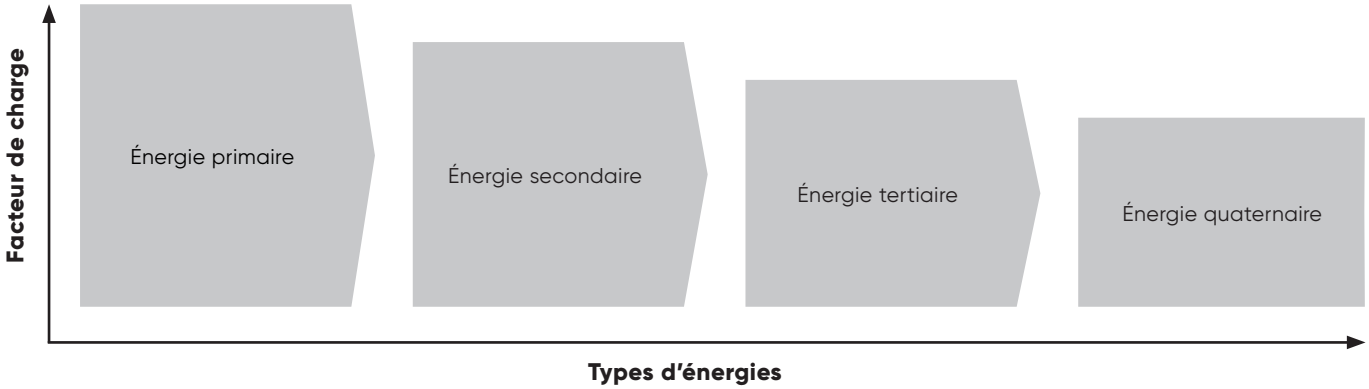
Transport d'hydrogène à l'aide de granulés de fer en conteneurs (HyCS)
Cette technologie ne permet pas de stocker directement de l'hydrogène, qui est consommé lors du chargement (réduction de l'oxyde de fer en fer). Ce processus entraîne la production de vapeur d'eau (H_2O). Lors du déchargement, le fer est à nouveau 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 réservoir HyCS est le plus compact de tous les réservoirs d'hydrogène et affiche la densité énergétique volumétrique la plus élevée. Les granulés de fer sont transportés sous forme non pressurisée, et donc sans danger, dans des conteneurs standards aussi bien par camion sur la route que par le rail. La pression préalable nécessaire est fournie par le réservoir lors du déchargement (production d'hydrogène). La capacité d'un conteneur standard (20 pieds) est de 600 kg d'hydrogène environ, soit 20 MWh d'hydrogène H_i. Les réservoirs HyCS seront produits en série dès 2025.

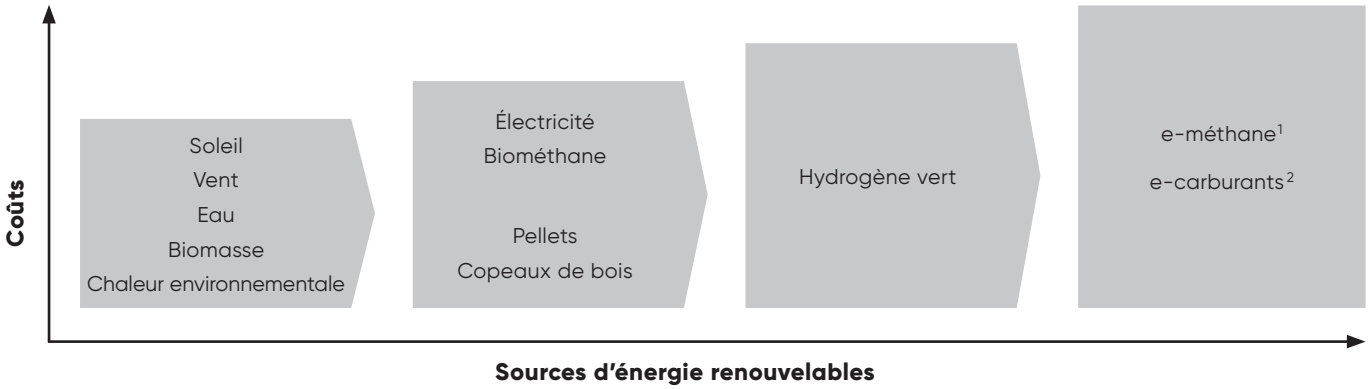
Autres informations: ambartec.de

Auteur de l'étude de faisabilité: Stefan Jäschke, Envenion GmbH 2023, CH-8425 Oberembrach, envenion.ch

Les types d'énergies et leurs sources renouvelables

Les sources d'énergie sont des substances dont le pouvoir énergétique n'est utilisable qu'après un processus de transformation. Font ici exception les sources d'énergie primaires que la nature met gratuitement à notre disposition. Chaque processus de transformation nécessite des coûts d'investissement ainsi que de l'énergie supplémentaire, et permet ainsi d'atteindre des facteurs de charge plus bas par rapport au type d'énergie stocké au préalable. Malgré des pertes de conversion et des coûts plus élevés, les sources d'énergie tertiaires et quaternaires joueront un rôle important dans le futur système des énergies renouvelables.





[1] Méthane synthétique renouvelable
[2] Combustibles liquides synthétiques renouvelables

Source: Envenion GmbH 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, 4000 en français
Photo de couverture
GALVASWISS AG Wellhausen, Felben-Wellhausen
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 neutral Imprimé
myclimate.org/01-23-372269
imprimé en suisse