



JPR-Focus no. 02/25

La newsletter de JPR Concepts & Innovation dans le nouveau format et toujours gratuite.

Publiée en trois langues - allemand, français, anglais - maintenant 2 à 3 fois par an.

Points de vue approfondis et holistiques sur les questions d'actualité.

Les textes de ce bulletin d'information peuvent être utilisés avec plaisir dans d'autres bulletins d'information et pages Web. Cependant, une référence au "JPR-Focus" en tant que source est nécessaire.

Chères lectrices et chers lecteurs

Une cordiale bienvenue pour le deuxième numéro du JPR-Focus de l'année 2025.

On attribue un rôle central à l'hydrogène dans de nombreuses publications. Pour cette raison, des grands plans sont établis. La construction d'un réseau d'hydrogène et la conversion de certaines parties du réseau de gaz existant doivent être commencées immédiatement.

Certains gens ont compris maintenant que le secteur de l'énergie n'est pas le seul coupable pour les questions climatiques. Un nouveau terme a été lancé : la décarbonisation de l'économie. Cela ne signifie pas de renoncer au carbone en toutes choses, mais seulement de réduire ou d'éviter les émissions de CO₂ et d'abandonner les vecteurs fossiles comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole. Ce choix de mots n'aide pas forcément à rendre les choses claires. L'hydrogène est aussi sensé jouer un rôle central dans ce domaine.

Malgré ces augures favorables, le secteur de l'hydrogène ne semble pas faire de progrès marquants. Tout reste au niveau de la vision et de plans virtuels. Il y a bien quelques réussites. Celles-ci cependant ne démontrent pas la faisabilité des grands plans mais mettent plutôt en évidence les limitations qui se posent.

Le but de ce rapport est de jeter la lumière sur les interdépendances afin de permettre de mieux comprendre le sujet et de reconnaître le vrai potentiel de l'hydrogène.

Je vous souhaite une lecture intéressante.

Votre Jean-Pierre Rickli

L'hydrogène

Peut-il vraiment satisfaire aux attentes ?

1. Introduction

L'hydrogène a un rôle important à jouer dans la transition énergétique et la décarbonisation de l'économie. Beaucoup de rapports, de communications d'entreprises et d'études tentent de matérialiser cette affirmation. Des séminaires et des conférences sont tenus sur ce thème. On attend de l'Etat des énormes investissements dans une infrastructure adéquate. Le résultat est à peine plus qu'un peu d'air chaud. Pourquoi ?

Je vois en premier lieu les raisons suivantes :

- Toutes les visions du futur sont concentrées sur la demande finale exprimée habituellement en kWh.
- La production d'hydrogène est considérée uniquement comme un problème purement technologique. Quel procédé ? Quel rendement ? Quelles possibilités de transport et de stockage ?
- Les questions importantes ne sont pas posées. Qui remplira le réseau ? A quel endroit cela se fera-t-il ? Quelle quantité est demandée ? Est-ce que l'infrastructure pour la production est au moins disponible ? De plus, les réponses à ces questions varient grandement d'un secteur à l'autre.
- Je vois enfin la raison principale simplement dans le vieil adage : le diable se cache dans les détails.

Je ne vais pas discuter les deux premières raisons ici. Dans ce contexte, je ne mentionnerai que les conséquences de cette approche.

Le point central de ce rapport sera l'analyse de la troisième raison et peut être aussi la raison du manque de motivation de traiter les questions pertinentes, une peur du diable. Répondre à ces questions demande de traiter les détails. En retour, cela demande un certain savoir, une volonté d'aller dans le fond des choses et aussi d'accepter un certain effort.

2. L'hydrogène

Avant de discuter sur son emploi dans ce rapport, nous avons besoin de mieux connaître l'acteur principal. N'ayez pas peur, cela ne sera pas une leçon de chimie. Le but est de comprendre pourquoi il est considéré avoir un tel potentiel et quels défis technologiques il pose.

2.1 Qu'est-ce qui est intéressant sur l'hydrogène ?

Il offre les avantages suivants dans le débat actuel sur la transition énergétique :

- Il est abondant sur terre, en particulier dans l'eau.
- Sa réaction en présence d'oxygène libère énormément d'énergie. Nous utilisons cette combinaison riche en énergie pour propulser les fusées que nous lançons dans l'espace.

- Le produit final de cette réaction est de l'eau. Ainsi, lorsque nous extrayons l'hydrogène de l'eau, il n'y a pas de perte de matière et il n'y a pas de substances nocives que nous devons rejeter.
- En respectant certaines conditions, l'hydrogène peut être stocké et transporté. La consommation d'hydrogène peut, par conséquent, être découplée de sa production.

Lorsqu'il s'agit de décarboniser l'économie, l'hydrogène n'est pas seulement important comme source d'énergie, mais il peut être aussi utilisé comme une matière première pour fabriquer des substances. Des combustibles peuvent être produits, par exemple, avec de l'hydrogène et du gaz carbonique extrait de l'air. D'autres produits sont sur la liste d'attente. De nombreux procédés sont déjà en phase d'essai, mais de nombreux autres n'existent que sur le papier. La manière dont ils pourraient fonctionner appartient encore au futur lointain.

2.2 Caractéristiques spéciales

Comme nous l'avons vu, l'hydrogène est abondant mais il est lié à l'oxygène sous forme d'eau. Pour avoir de l'hydrogène, il faut dissocier ce composant, ce qui requiert beaucoup d'énergie.

L'hydrogène réagit violemment avec l'oxygène (gaz détonant). C'est d'une part un avantage pour une utilisation de production de chaleur. D'un autre côté, cela pose des risques sérieux pour le stockage et le transport. Des précautions particulières sont essentielles.

L'atome d'hydrogène est le plus petit de tous les éléments. Cela signifie que l'hydrogène a une capacité de diffusion très élevée. Des matériaux spéciaux sont donc requis pour les enveloppes de stockage et le transport. L'utilisation du réseau existant de gaz devrait donc être soigneusement vérifiée. Des adaptations majeures et onéreuses sont donc absolument possibles.

Sur ce point, les opinions divergent. Certains plaident en faveur de construire un réseau entièrement nouveau. D'un autre côté, des expertises démontrent que l'utilisation du réseau actuels de gaz est possible avec seulement des petites adaptations. Est-ce que de nouvelles lois de la physique des matériaux ont été inventées ? Est-ce qu'il y a des intérêts particuliers derrière ces affirmations ? Est-ce que les conditions à remplir ont-elles été bannies dans les petits caractères que personne ne lit ?

2.3 Ses couleurs

L'hydrogène est bien sûr incolore et, en tant que gaz, il ne peut être détecté par l'œil. Néanmoins, nous trouvons dans les publications de nombreuses références à l'hydrogène vert, gris, bleu et d'autres couleurs. Cela n'a rien à voir avec l'hydrogène lui-même mais plus avec son origine et le genre d'énergie utilisée pour le produire. Ce code couleurs est avant tout un outil de marketing, certains diraient, avec différents niveaux de « lavage vert ».

Ci-après un aperçu des couleurs les plus courantes :

- Vert
C'est la couleur la plus prometteuse de l'hydrogène. L'électricité utilisée pour l'électrolyse est produite avec de l'énergie solaire ou éolienne. Cet hydrogène est donc considéré comme neutre pour le climat.

Le problème principal de cette approche est la haute demande en électricité verte qui limite sévèrement l'usage alternatif de cette électricité.

- Bleu

Cette couleur qualifie l'hydrogène produit par reforming de vapeur. La source d'énergie requise pour cela est du gaz naturel, du pétrole ou du charbon. Le CO₂ produit dans ce procédé est capté et stocké dans le sous-sol. Cela signifie que cet hydrogène est aussi considéré comme neutre pour le climat.

Le captage et le stockage de CO₂ sont des technologies éprouvées, mais elles sont énergivores et par conséquent limitent d'autres applications d'énergies renouvelables. De plus, les exigences posées sur les sites de stockage sont très contraignantes, ce qui limite considérablement le nombre de sites adéquats.

- Gris

L'hydrogène de cette désignation de couleur est le contraire de l'hydrogène vert. L'électricité pour la production par électrolyse de cet hydrogène vient de centrales à combustibles fossiles. Il n'est donc pas considéré comme neutre pour le climat.

- Turquoise

Cet hydrogène est produit à partir d'un procédé thermique – la pyrolyse de méthane – dans lequel le méthane ou le gaz naturel est séparé en hydrogène et en carbone solide. A la condition que ce carbone soit durablement lié, ce procédé est également neutre pour ce qui est du CO₂. Bien sûr, tous les composants de l'installation doivent être alimentés par de l'énergie renouvelable.

Du fait que la quantité d'électricité requise par ce procédé est bien inférieure à celles des procédés précédents, l'hydrogène turquoise est souvent présenté comme une transition vers l'hydrogène vert.

- Rouge, violet, pink

Toutes ces couleurs sont utilisées pour décrire l'hydrogène produit par électrolyse alimentée par de l'électricité produite dans des centrales nucléaires. Comme cette électricité est produite pratiquement sans émissions de CO₂, ces couleurs sont favorables à l'environnement. D'autres aspects comme la production minière de l'uranium, la sécurité de telles installations et le traitement des déchets radioactifs sont des thèmes d'autres discussions.

Pour beaucoup, ces discussions sont inutiles, car cette approche concerne avant tout les installations existantes. Si ces centrales sont exploitées le plus longtemps possible, le bilan écologique global ne peut que s'améliorer. Cela signifie aussi que la production d'hydrogène peut être augmentée indépendamment du développement de l'énergie solaire.

- Orange

L'hydrogène de cette couleur est aussi produit par électrolyse. Cependant, l'électricité requise ici est produite dans des installations de biogaz et d'incinération des ordures. Cela signifie que cet hydrogène n'est pas entièrement neutre pour le climat, mais qu'il peut améliorer l'équilibre écologique d'autres secteurs de consommation.

Les installations de biogaz et d'incinération des ordures sont des installations locales et de portée limitée. Cela veut dire que l'hydrogène orange a aussi un caractère local.

- Jaune

L'hydrogène de cette couleur est aussi produit par électrolyse. L'électricité pour cette production vient du mix allemand, ce qui signifie qu'elle contient aussi bien des énergies renouvelables que des sources fossiles. Cet hydrogène n'est ainsi pas considéré comme neutre pour le climat. Il est cependant moins nocif que l'hydrogène gris.

- Blanc
L'hydrogène blanc est l'hydrogène qui est présent naturellement. On le trouve dans des gisements naturels dans des couches rocheuses profondes. Cet hydrogène pourrait être extrait par des méthodes comme le fracking. C'est-à-dire qu'il n'est neutre pour le climat que dans une certaine mesure. De plus, il n'est pas durable car les gisements ne sont pas renouvelables.

En plus de cette palette très colorée de types d'hydrogènes, il y a encore deux couleurs qu'il convient de mentionner. Elles jouent un rôle mineur et ont été introduites avant tout en raison des différents subsides et délais d'approbation.

- Noir
Cette étiquette est utilisée pour l'hydrogène produit avec de l'électricité venant de centrales au charbon et n'est donc pas neutre pour le climat.
- Brun
Cette couleur est utilisée pour l'hydrogène produit avec de l'électricité venant de centrales au lignite et n'est donc pas neutre pour le climat.

Cette liste colorée met en évidence un élément important du problème autour de l'hydrogène vert, favorable à l'environnement : obtenir suffisamment d'électricité pour sa production.

Le chemin de "l'hydrogène vert" est directement lié à la production d'électricité verte à partir de sources renouvelables. Aujourd'hui, nous ne sommes pas encore en mesure de couvrir nos besoins de base en électricité provenant d'énergies renouvelables pour l'éclairage, les appareils ménagers, moteurs et la communication. Cette formulation est encore très positive. Certains disent "qu'on est loin" ou parlent de l'illusion qu'une telle chose soit même possible. Par conséquent, d'où viendrait l'énergie nécessaire pour produire l'hydrogène pouvant remplir les conduites comme celles d'un réseau global ?

Cela nous montre aussi que, pour un certain temps encore, la manipulation pour le transport et le stockage continuera de donner une note grise plus ou moins accentuée à l'hydrogène, le noir et le brun mis à part. Il est aussi clair que l'évaluation sur la base la neutralité pour le climat n'est pas appropriée.

3. Quelles sont les applications potentielles envisagées pour l'hydrogène ?

3.1 Production d'électricité et de chaleur

Chacun a pensé, lorsque la transition énergétique a été annoncée, que l'hydrogène sera la source d'énergie du futur. Des grandes visions ont été élaborées sur les tables d'études. Les premiers projets de centrales lancés et bientôt la question s'est posée de savoir d'où pourraient venir les grandes quantités d'hydrogène nécessaires.

L'hydrogène vert était encore une notion future. Diverses combinaisons furent évaluées, d'où le nombre élevé de couleurs. Cependant, même une expansion de la capacité de production d'hydrogène par électrolyse était hors de question. Ces projets de centrales ont été simplement mis en attente.

Seuls sont restés les projets dans des sites isolés, comme les îles. Ces endroits ont habituellement beaucoup de vent et, dans le sud, un ensoleillement suffisant. Ils offrent des bonnes conditions pour l'hydrogène vert.

Les distances dans ces endroits sont aussi gérables. De plus, la demande en énergie est limitée à celle des besoins privés, des entreprises locales et de l'artisanat. Cela signifie qu'il est possible de trouver un équilibre entre la production et la demande en énergie. Les surplus sont stockés dans des batteries ou en tant qu'hydrogène. Ainsi, on peut aussi alimenter le transport en énergie par batteries ou piles à combustible.

3.2 Transport de biens et de personnes

Nous arrivons maintenant à un thème complexe, ou plus précisément trois thèmes complexes : le transport de biens et de personnes sur terre, sur l'eau et dans l'air. Comme les questions relatives sont assez différentes, nous devons les aborder séparément.

Les applications et des projets en rapport avec l'hydrogène sont axées sur la technologie des piles à combustibles comme principe général.

Une alternative serait d'utiliser l'hydrogène pour produire des carburants comme l'éthanol ou le méthanol. L'élément carbone serait apporté alors par des installations qui extraient le CO₂ de l'air. Cependant, en raison de la haute consommation énergétique – l'énergie pour l'électrolyse, l'énergie pour extraire le CO₂ de l'air, l'énergie pour le procédé de production de carburant – une telle solution est encore dans le futur lointain.

3.2.1 Transport sur terre

La puissance faible des unités motrices pour le transport de biens et de personnes sur route a permis de développement de solutions diverses.

Selon l'approche commerciale d'alors, le potentiel le plus grand a été vu dans les groupes moteurs de l'industrie automobile – grands nombres, risque technique bas, risque financier bas, couverture large du marché. De nombreux constructeurs automobiles ont développés des concepts en conséquence et mis sur le marché des nouveaux modèles à titre d'essai pour permettre à la technologie de devenir mature.

La désillusion vint rapidement. D'où devrait venir l'hydrogène ? Il n'y avait rien, les champs d'essais mis à part. Personne ne s'était chargé de regarder ce sujet. Il n'y avait pas d'argent pour une couverture large. Tout était trop incertain et trop onéreux.

Ce fut aussi un autre moment triste pour tous ceux qui croyaient que les multiples conversions d'énergie – de l'énergie renouvelable, éolienne ou solaire, en électricité, de l'électricité en hydrogène, de l'hydrogène en électricité, de l'électricité en énergie mécanique – sont équivalentes ou même meilleures aux deux conversion – énergie chimique en chaleur et chaleur en énergie mécanique – telle qu'elle est produite par les moteurs à combustion.

Une solution fut d'offrir une solution intégrale, par exemple la production d'électricité par des panneaux solaires, la production d'hydrogène par électrolyse, stockage d'hydrogène et une flotte de

véhicules avec des unités motrices adéquates et, si nécessaire, la conversion de véhicules existants à la technologie des piles à combustible.

De telles solutions ont été implémentées par diverses sociétés de transport (bus de transports publics) et pour la distribution fine de marchandises. Ces solutions sont restées jusqu'à présent des solutions de niche pour des raisons de coûts.

Des essais ont été faits sur le transport ferroviaire avec des locomotives Diesel converties. La faisabilité a été démontrée. Cependant, ces tests n'ont pas été poursuivis pour des raisons de coûts. En raison des exigences de puissance, il n'a pas été possible de développer une unité de puissance avec piles à combustibles pour une application large.

3.2.2 Transport sur eau

Il y a théoriquement beaucoup de possibilités pour le transport de biens et de personnes sur eau, pour le moins dans la perspective seule du groupe moteur. Cependant, lorsque l'approvisionnement en hydrogène, la maintenance simple, les puissances requises et l'utilisation sont pris en compte, la situation change. La variété des combinaisons signifie qu'en fait seules des solutions de niche sont possibles en pratique.

Quelques exemples :

- Les solutions amovibles hors-bord pour les bateaux de plaisance qui sont utilisés de temps à autre ne peuvent pas être simplement remplacées par des piles à combustible pour le moment. Les petits bateaux en utilisation régulière – bateaux de pêche sur lacs – pourraient être reconvertis avec une solution fixe. Celle-ci devrait cependant prendre très peu de place pour ne pas interférer avec les travaux de la pêche. Un moteur électrique facilement amovible avec un pack de batteries pourrait être une solution.
- Pour les bateaux de plaisance équipés de systèmes de propulsion fixes de moyenne puissance, une conversion aux piles à combustibles est envisageable. Par contre, la disponibilité opérationnelle devrait être assurée même après une longue période d'inactivité. Ils devraient demander une maintenance de bas niveau et aucune expertise particulière. Une application sur les petits bateaux pour le transport de passagers sur des petits lacs serait plus envisageable.
- Pour les gros bateaux jusqu'au plus grands, les questions de maintenance passent au second plan car le personnel pour cela est disponible. Les problèmes passent par contre au niveau de la puissance – des piles à combustible à haute puissance sont difficilement disponibles – et, surtout, au niveau de l'approvisionnement de très grandes quantités d'hydrogène vert.

3.2.3 Transport aérien

L'hydrogène est considéré par beaucoup comme le carburant du futur pour les avions, avant tout pour produire l'électricité pour les moteurs à hélices. L'utilisation directe pour les moteurs pourrait aussi être possible, mais seulement comme solution de rechange.

Pour ceux qui favorisent cette solution, il est très propre, même sans émissions c'est-à-dire sans CO₂. Le produit de la réaction exothermique entre l'oxygène et l'hydrogène est de l'eau pure. Celle-ci peut être déchargée dans l'air sans hésitation. Malheureusement, pour moi et pour un nombre grandissant de personnes, ce n'est qu'apparemment le cas, car l'eau dans les couches supérieures de l'atmosphère ne forme pas seulement des traînées de condensation mais aussi des nuages. Là, l'eau est un puissant agent d'effet de serre. Même l'IA ne peut l'éviter ou le prévenir.

Cet exemple explique peut-être pourquoi je suis très prudent envers les approches axées seulement sur les objectifs tels que, exempt de CO₂, neutre en CO₂ et autres. Dans ce cas, la situation serait clairement aggravée et non améliorée.

3.3 Production de substances chimiques

Nous entendons et lisons de plus en plus dans les médias sur la décarbonisation de l'économie. Cela ne signifie pas sans carbone. Ce serait peu réaliste et contraire à de nombreux processus naturels. Non, cela signifie seulement sans utilisation de carburants et combustibles fossiles tels que le charbon, le lignite, le pétrole et le gaz naturel. Le deuxième objectif serait exempt d'émissions de CO₂ ou au moins une empreinte CO₂ équilibrée, c'est-à-dire neutre par rapport au climat.

Un objectif très honorable. De nombreuses industries telles que la production d'acier, et, avant tout, l'industrie chimique avec sa grande gamme de produits sont touchées.

Un élément important est cependant oublié ou ignoré : le charbon, le gaz naturel et le pétrole ne sont que partiellement des sources d'énergie pour ces industries. Dans une grande mesure, ces vecteurs sont aussi pourvoyeurs de matières premières utilisées dans des procédés chimiques. Si nous voulons les enlever de l'équation, nous devons trouver ailleurs un substitut pour chaque atome de C ou de H dans le processus de production. L'atome de carbone est fourni par le CO₂ extrait de l'air, et l'atome d'hydrogène est mis à disposition aujourd'hui, par électrolyse. Ces deux processus demandent une grande quantité d'énergie.

De plus, de nombreux composants trouvés dans le pétrole, le gaz naturel ou le charbon devront être synthétisés. Le développement de ces processus prendra quelque temps. Ce n'est qu'alors que l'on connaîtra leurs besoins en énergie.

4. Quelques chiffres utiles

4.1 Considérations générales

Nous avons vu dans les considérations précédentes que bien que l'hydrogène soit abondant sur terre, il ne devient accessible pour d'autres utilisations qu'après avoir dépensé une certaine quantité d'énergie. La disponibilité d'une électricité verte est cruciale pour la production d'hydrogène vert, si nous insistons sur l'idée que le changement climatique est dû aux émissions de CO₂. Toute autre solution n'est que de la poudre aux yeux.

Nous devons comprendre que la teneur en CO₂ dans l'air n'est d'une part qu'un indicateur important et, d'autre part, est le résultat d'un bilan. Ce bilan est établi entre ce qui est émis et ce qui est retenu ou séparé. Il devient donc évident que derrière chaque mesure de réduction des rejets de CO₂ il y a ce que je nomme un « CO₂ gris ».

C'est le CO₂ généré par toutes les activités faites pour construire l'installation – exploitation minière des matériaux de base, leur traitement, fabrication des composants, construction, maintenance, démontage et décharge des pièces usées, etc.

Les activités de transport prennent ici une place particulière. Chaque transport est fondamentalement non renouvelable et non durable. Il donne une touche grise à chaque produit

quelle que soit son teinte de « vert ». Cette touche devient automatiquement plus forte avec la distance parcourue.

Il faut aussi considérer toute perte de capacité d'absorption de CO₂ du sol ou des volumes d'eau suite à l'endommagement ou la pollution résultant de ces activités.

Nous pouvons dans ce cas utiliser d'autres couleurs d'hydrogène.

J'ai mentionné plusieurs fois que des solutions n'ont pas été poursuivies par manque d'approvisionnement en hydrogène vert. Il semble qu'un problème de quantité se cache là-dedans. Quel est son ordre de grandeur, au moins approximativement ? C'est peut-être la raison pour la lenteur des progrès ?

Nous avons aussi vu que le gaz naturel, le pétrole et le charbon sont pourvoyeurs de matières premières. Si nous abandonnons ces produits, nous devons remplacer ces matières premières. Ce que cela signifie en termes de quantité n'est pratiquement pas abordé dans le courant d'information actuel. Une estimation grossière est absolument souhaitée.

Afin d'obtenir une estimation plus précise, nous avons besoin de quelques chiffres qui sont établis dans les chapitres suivants.

4.2 Quelle est la quantité d'électricité nécessaire pour produire de l'hydrogène ?

Une courte revue du marché de l'électrolyse montre que, en moyenne, il faut 4.5 à 6.3 kWh pour produire 1 Nm³ (mètre cube standard) d'hydrogène. Cette gamme est due aux conditions des différents procédés et à la taille des installations. Nous utiliserons pour notre évaluation la valeur 5 kWh par Nm³ comme base de travail.

J'entends déjà les cris indignés des spécialistes de ce domaine disant que des améliorations importantes du rendement sont encore possibles. C'est correct et je n'ai aucun problème avec ça. Tout ce que je peux répondre est que ces améliorations importantes n'affectent que les deux premiers chiffres d'un nombre, mais pas le nombre de zéros qui suivent.

Il est important pour pouvoir convertir les besoins en énergie en termes de poids, de savoir que 1 Nm³ d'hydrogène pèse 0.0899 kg. Cela signifie que 55.62 kWh sont requis pour produire 1 kg d'hydrogène.

4.3 Combien d'hydrogène consomme une pile à combustible pour produire 1 kWh électrique ?

Nous avons vu que l'hydrogène est utilisé comme source d'énergie pour la production électrique dans de nombreux processus. Ceci est réalisé en général par une ou des piles à combustible. Là aussi, la gamme des rendements des installations est large. C'est un résultat des différentes conditions limites des divers procédés ainsi que de la taille des installations. Le commentaire précédent au sujet du potentiel d'amélioration encore possible s'applique ici aussi. Nous cherchons à estimer l'ordre de grandeur plutôt qu'une valeur exacte.

Les rendements électriques variant de 35-40% à 60-70%. Ces valeurs semblent être les rendements des cellules. Le rendement pour l'installation devrait être sensiblement plus bas. La littérature mentionne une valeur de 50% comme bonne. Nous utilisons cette valeur.

Comme nous désirons savoir combien d'électricité peut être produite par un kilogramme d'hydrogène, nous devons connaître quelle référence – pouvoir calorifique inférieur ou supérieur – a été utilisée pour calculer ces rendements. Il y a un manque général de clarté sur ce point. Le pouvoir calorifique supérieur semble être la valeur la plus utilisée. Pour l'hydrogène c'est 33.3 kWh/kg ou 3.0 kWh/Nm³ ou 120 MJ/kg.

Pour comparaison, le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène est 39.4 kWh/kg.

Pour produire 1 kWh d'électricité, nous avons donc besoin d'un apport d'énergie de $1/0.5 = 2$ kWh sous forme d'hydrogène, c'est-à-dire de 0.06 kg d'hydrogène.

4.4 Combien d'eau faut-il pour produire de l'hydrogène ?

Il faut de l'eau pour faire de l'hydrogène par électrolyse et non de sources d'énergie fossile. Cette eau doit être d'une certaine qualité ou pureté. L'eau potable est de nos jours la qualité la plus basse. Certains procédés d'électrolyse demandent une eau plus pure pour atteindre des rendements plus élevés.

Il est donc important de savoir combien d'eau est présentement nécessaire.

Pour cela, nous utilisons le poids atomique des deux composants de l'eau. Le poids atomique de l'hydrogène est de 1.00784 et celui de l'oxygène de 15.999. Par conséquent le poids moléculaire de l'eau, consistant en deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène est de 18.01468.

Nous pouvons donc déduire de ces valeurs que l'hydrogène représente 11.19% du poids de l'eau. Cela signifie qu'il faut $1/11.19\% = 8.937$ kg d'eau pour produire 1 kg d'hydrogène.

4.5 Combien faut-il d'hydrogène pour remplacer les carburants fossiles ?

L'hydrogène est sensé remplacer les vecteurs fossiles énergétiques et fournisseurs de matières premières, c'est-à-dire tous les types de charbon, le gaz naturel et le pétrole. Comme il n'est pas présent naturellement dans la nature, il doit être extrait d'une manière renouvelable, il doit être produit de l'eau. Ce n'est possible qu'avec un certain apport d'énergie. Le processus usuel utilisé pour cela est l'électrolyse.

Il est donc important de savoir quelles quantités d'hydrogène sont demandées globalement et dans des cas individuels. Cela permet d'estimer les besoins correspondants en énergie, particulièrement les besoins en électricité.

Dans le cas des applications dans le secteur purement énergétique, les deux valeurs du pouvoir énergétique, bas et haut, sont utilisées. Le pouvoir calorifique bas est plutôt utilisé pour le secteur électrique et le pouvoir calorifique haut plutôt pour les applications de chaleur. Leur utilisation est plus une question d'accord et, puisque les valeurs diffèrent, on devrait être clairement indiquer laquelle est employée.

Malgré cela, la consultation de la documentation courante, particulièrement les statistiques, même les plus officielles, cette attente ne semble pas vraiment être remplie. Pas plus qu'il n'est fait mention de la qualité de l'énergie, c'est-à-dire de son potentiel d'être convertie dans d'autres formes d'énergie. En général, un kilowatt est toujours un kilowatt, que ce soit de l'électricité ou de l'eau tiède. Cependant, avec l'électricité on peut faire de l'eau tiède avec un bon rendement, le contraire n'est pas si aisé. Néanmoins, la classification par applications donne une indication indirecte là-dessus.

Nous utiliserons pour notre comparaison le pouvoir calorifique haut pour les applications de chaleur et les piles à combustible. Pour les applications de forces – entraînements, centrales, etc. – nous utiliserons le pouvoir calorifique bas. Les tableaux suivants montrent les différents pouvoirs calorifiques pour des combustibles et des carburants typiques.

Matière	Hydrogène	Méthane	Méthanol	Charbon	Huile de chauffage/Diesel
Pouvoir calorifique haut(MJ/kg)	120	50	19.9	25 – 32.7	43

Tableau 1 : Pouvoir calorifique haut

Matière	Hydrogène	Méthane	Méthanol	Kérosène	Benzine	Diesel
Pouvoir calorifique bas (MJ/kg)	143	55.5	22.7	43	47	45.4

Tableau 2 : Pouvoir calorifique bas

Il faut noter que divers produits comme le kérosène, le Diesel ou le charbon sont des mélanges de plusieurs composants. Cela signifie que des valeurs particulières peuvent être appliquées dans des cas spécifiques. Les valeurs données ici sont celles qui sont le plus couramment spécifiées.

4.6 Combien d'hydrogène faut-il pour produire une substance ?

Là où l'hydrogène est le fournisseur de matière première pour la formation d'une nouvelle substance, la quantité requise est déterminée en utilisant le poids atomique ou le poids moléculaire de la même manière que dans le chapitre 4.3.

Cette méthode peut être appliquées pour déterminer la quantité de toute substance présente dans la nouvelle molécule.

On détermine tout d'abord le poids moléculaire. Ensuite le poids total des atomes d'hydrogène. Cela permet de calculer leur proportion du poids moléculaire et le poids de l'hydrogène par kilogramme du produit final.

Il faut bien préciser que cela ne traite que de l'hydrogène requis pour la formation de la molécule. L'énergie requise pour fournir les autres substances et la synthèse n'est pas comprise ici.

5. De quelles quantités de remplacement parle-t-on ? – Quelques exemples

Notre futur sera caractérisé pour beaucoup par l'hydrogène comme vecteur énergétique. Nous voulons voir maintenant ce que cela signifierait. Les statistiques officielles de l'Office Fédéral de l'Énergie (OFEN, Statistiques de l'énergie en Suisse 2024) seront considérées comme base.

5.1 Remplacer notre consommation d'électricité non-renouvelable

Voyons tout d'abord l'électricité. En 2024, nous en avons consommé 57'512 GWh. De cela, 22'983 GWh ont été produits par des centrales nucléaires, 1'433 GWh par des centrales utilisant des sources non-renouvelables et 7'204 GWh de diverses sources d'énergie renouvelable. Le reste vient des centrales hydrauliques.

Cela signifie que 24'416 GWh seraient encore produits par des sources non-renouvelables. Nous pouvons cependant admettre que les autres sources renouvelables aient encore un potentiel de développement et pourraient grossièrement doubler leur production. Cela nous laisserait 17'000 GWh d'électricité à fournir avec l'aide de l'hydrogène.

Mous avons vu que 0.06 kg d'hydrogène sont nécessaire pour produire 1 kWh d'électricité. Pour produire 17'000' GWh d'électricité il faut donc $17'000'000'000 \text{ kWh} \times 0.06 \text{ kg} = 1'020'000'000 \text{ kg}$ ou 1'020'000 tonnes d'hydrogène.

Comme l'hydrogène n'est pas disponible comme ça mais doit être produit par électrolyse et donc nécessite de l'électricité, il faut donc mettre pour cela, $1'020'000'000 \text{ kg} \times 55.62 \text{ kWh/kg} = 56'732'400'000 \text{ kWh}$ d'électricité verte à disposition.

5.2 Couvrir le déficit hivernal d'électricité

Nous avons tout d'abord le problème de quantifier ce déficit. D'une part parce que prévoir le futur est toujours une entreprise hasardeuse et, d'autre part, parce que ce chiffre est politiquement très sensible.

Selon les Perspectives énergétiques 2050+ - Annexe sur l'électricité hivernale (2021) - de l'OFEN, le surplus d'importations en hiver peut être utilisé comme mesure pour cela. Nous pouvons donc conclure de ces chiffres qu'il est raisonnable d'admettre un manque de production d'électricité domestique de l'ordre de 6 TWh pour assurer un approvisionnement suffisant.

Etant donné que la centrale de Mühleberg a maintenant été arrêtée et que la consommation d'électricité a augmenté, le manque d'électricité domestique est plus que probablement plus grand. La valeur de 10 TWh citée parfois n'est probablement pas entièrement incorrecte, mais elle ne sera atteinte que dans quelques années. Pour permettre une comparaison avec les valeurs de consommation actuelle, nous estimons ce manque à 7 TWh aujourd'hui.

Là, nous avons deux options. La première est de stocker l'hydrogène et de l'utiliser en hiver. Dans ce cas, on peut déterminer l'électricité verte comme avant. Par une règle de trois, on arrive aisément à la valeur correspondante : $7/17 = x/56.732$. La quantité d'électricité requise est de $x = 23.360 \text{ TWh}$.

L'autre option est de stocker cette énergie dans une autre substance comme le méthane ou le méthanol. Bien que cette solution ait des désavantages au niveau énergétique, elle offre des avantages importants pour ce qui concerne le transport, le stockage, la distribution et la manutention.

Pour fournir 7 TWh d'électricité en hiver par le biais de piles à combustible alimentées par du méthane, la demande de méthane est de $7 \text{ TWh} \times 1/0.5 = 14 \text{ TWh}$ d'énergie. En utilisant du méthane avec un pouvoir calorifique haut de 13.89 kWh/kg, cela correspond à mettre à disposition 1'007'919 tonnes de méthane.

La formule chimique du méthane est CH_4 . Nous avons donc un poids moléculaire de $1 \times 12.011 + 4 \times 1.00784 = 16.0424$. Le poids de l'hydrogène représente ainsi 25.13%. Cela veut dire que 0.2516 kg d'hydrogène sont requis pour produire 1 kg de méthane. Pour fournir 1'007'919'000 kg de méthane, il faut donc produire 253'290'040 kg d'hydrogène. Cette production requiert elle $253'290'040 \text{ kg} \times 55.62 \text{ kWh/kg} = 14'087'992'000 \text{ kWh}$ ou 14.087 TWh.

Cela ne prend pas en compte l'énergie nécessaire pour fournir le carbone et pour la synthèse.

5.3 Remplacement de l'huile diesel

Afin d'atteindre le but de la neutralité climatique ou de la décarbonisation, les 2'455'000 tonnes d'huile diesel consommées chaque année devraient être remplacées. Une procédure similaire devrait aussi être suivie pour les 2'050'000 tonnes de benzine ou les 1'799'000 tonnes de carburant pour l'aviation.

Là aussi, nous avons en principe les mêmes deux options que pour couvrir le déficit hivernal. Remplacement direct par un entraînement propulsé par l'hydrogène ou remplacement indirect par un carburant intermédiaire qui est compatible avec la technologie actuelle, comme le méthane.

Nous admettons pour des raisons de simplicité que les rendements de conversion des entraînements ne sont pas identiques mais très semblables à ceux des entraînements diesel. Finalement, il est question avant tout des ordres de grandeur. Nous pouvons donc déterminer la quantité nécessaire d'hydrogène et celle de méthane en utilisant les pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur.

Remplacer 2'455'000 tonnes d'huile diesel avec un pouvoir calorifique supérieur de 11.94 kWh/kg par de l'hydrogène demande 880'261 tonnes d'hydrogène. La production de cet hydrogène demande elle $880'261'000 \times 55.62 = 48'960'117'300 \text{ kWh}$ ou 48.96 TWh.

Pour calculer le remplacement de cette quantité d'huile diesel avec du méthane dans les moteurs, le pouvoir calorifique inférieur est utilisé. Remplacer 2'455'000 tonnes de diesel avec un pouvoir calorifique inférieur de 12.61 kWh/kg par du méthane avec un pouvoir calorifique inférieur de 15.42 kWh/kg demande l'approvisionnement de 2'007'623 tonnes de méthane.

Comme nous l'avons vu précédemment, il faut 0.2513 kg d'hydrogène pour produire 1 kg de méthane. Pour produire la quantité demandée de méthane (2'007'623 tonnes), 507'928.7 tonnes d'hydrogène sont donc nécessaires. La production de cette quantité d'hydrogène demande elle, $28'250'993'000 \text{ kWh}$ ou 28.25 TWh.

5.4 L'hydrogène pour la synthèse de nombreuses substances

Comme déjà mentionné, le pétrole, le gaz naturel et le charbon sont aussi des sources de matières premières pour l'industrie, particulièrement l'industrie chimique. Le pétrole en particulier consiste en de nombreux composants. Ces composants sont séparés par des processus correspondants et utilisés comme produits ou comme matériaux de base pour la formation de nouveaux composés.

Si nous voulons nous passer du pétrole, nous devons alors soit renoncer à ces composés chimiques soit développer des processus de synthèse et fournir les matériaux de base tels que l'hydrogène et le carbone. L'hydrogène et l'oxygène sont mis à disposition par électrolyse.

Nous pouvons estimer ce que cela signifie en regardant un produit bien connu dans notre société mais pas spécialement important en chimie : le PET.

Environ 5 millions de tonnes de PET sont produits annuellement dans l'UE. Sa formule chimique de base est $C_{10}H_8O_4$ et a un poids moléculaire de 192.17. Les huit atomes d'hydrogène représentent donc 4.19% du poids moléculaire. Cela signifie que 209'500 tonnes d'hydrogène doivent être fournies pour la production susmentionnée de 5 millions de tonnes. Produire cette quantité par électrolyse consommerait environ 11.65 TWh.

L'oxygène pourrait provenir de l'électrolyse de l'eau. L'énergie requise pour fournir le carbone – séparation du CO_2 de l'air et fractionnement du CO_2 – ainsi que pour la synthèse serait à ajouter.

Nous pouvons appliquer de telles considérations pour pratiquement chaque produit.

6. Conclusions

Les résultats de ces exemples montrent actuellement où est le cœur du problème. Ce n'est pas une question de technologie ou de rendement. C'est un problème de quantité. C'est aussi un problème sociétal et social. Certes, ce problème n'est pas unique pour la Suisse. C'est un problème rencontré par chaque pays, bien qu'à des degrés différents.

Le remplacement de juste un peu moins de 30% de notre consommation d'électricité par de « l'hydrogène vert » demande une consommation supplémentaire équivalente à notre consommation annuelle. Cela nous donne une indication sur la surexploitation de nos ressources naturelles.

Le déficit électrique hivernal est le résultat de la différence entre la capacité de production et la consommation d'électricité. Aujourd'hui, ce déficit est avant tout dû à la consommation supérieure en hiver. Dans une petite mesure, il est aussi dû à une production saisonnière légèrement plus basse. Couvrir ce déficit avec l'hydrogène comme source d'énergie causerait de devoir produire 40% de notre consommation actuelle en plus avec des énergies renouvelables.

Comme mentionné, cette production doit être faite en utilisant des sources d'énergie renouvelable. Cela devrait clairement augmenter le déficit saisonnier. En conséquence, l'électricité additionnelle pourrait bien être de l'ordre de grandeur de la consommation courante. Est-ce que ce n'est pas aussi un signe pour retourner à un rythme de vie plus naturel ?

Pour l'instant, nous n'avons considéré que la consommation d'électricité. Qu'en est-il du transport de marchandises et de personnes ?

A peine mieux. Pour remplacer le diesel, nous avons besoin d'une quantité supplémentaire d'énergie d'électricité pour produire l'hydrogène nécessaire d'environ la moitié de notre consommation totale. Nous avons ensuite la benzine et les carburants d'aviation qui sont grossièrement du même ordre de grandeur.

En plus de ça, en quantités semblables, il y a le volume d'huile de chauffage pour la production de chaleur. Cela représente en tout deux fois la consommation d'électricité à produire en plus pour remplacer les combustibles et les carburants.

Ainsi, si nous voulons couvrir nos besoins en énergie par le chemin « vert », nous aurions besoin, grossièrement, une capacité additionnelle de production d'électricité « verte » d'environ 200 TWh pour produire l'hydrogène nécessaire. Certaines personnes ont reconnu ce besoin, en tous cas partiellement, et ont tenté de le couvrir avec des productions alternatives, d'où les nombreuses couleurs d'hydrogène.

Si nous voulons décarboniser l'économie, l'hydrogène devrait aussi être produit pour synthétiser les produits et substances qui ne peuvent plus être obtenus du pétrole. L'énergie nécessaire pour produire l'hydrogène requis pour cela est également de l'ordre de grandeur des TWh pour la plupart. Note : 1 Twh (térawatt heure) = 1'000'000'000 kWh.

Comment cette énorme demande peut-elle être couverte ? Quelles sont les sources d'énergie disponibles ? Où sont-elles ?

Il ne suffit pas de dire que c'est faisable. Même les énormes progrès promis en termes de rendement restent marginaux. Tout reste dans le domaine du térawatt.

Certains pensent avoir trouvé la solution avec les centrales nucléaires. C'est vrai qu'elles permettraient de simplifier le problème en réduisant le besoin de remplacement d'électricité et en couvrant l'augmentation de la demande. Cependant, la dimension du problème est si grande, que le nombre de ce genre de centrales poserait des contraintes excessives pour d'autres ressources.

Pour d'autres, des centrales gigantesques devraient être construites dans des régions ensoleillées et l'électricité transportée vers la côte la plus proche où d'énormes installations de production d'hydrogène auraient été construites. De là, l'hydrogène serait transporté chez nous.

Mais pourquoi ? Est-ce qu'il ne serait pas plus sensé de placer les installations industrielles friandes en énergie là où l'électricité et l'hydrogène convergent ?

Pae exemple, les aciéries, les installations chimiques ou la production d'aluminium. Cela raccourcirait les chemins de transport et permettrait de ne donner qu'une petite note grise à la production verte.

La plupart des installations actuelles devraient subir des modifications importantes ou même être entièrement reconstruites pour une économie de l'hydrogène. Pourquoi pas là-bas ? Mais cela changerait toute la chaîne de plus-value ainsi que tout le rapport de forces international.

Il semble vraiment que l'hydrogène vert ne deviendra pas la source d'énergie globale du futur. Néanmoins, des applications locales sont certainement possibles et aussi pleines de sens. Les différents projets, déjà réalisés ou au stade de la planification le démontrent. Sur des îles où le vent et le soleil dominant et la demande est limitée aux résidents locaux et à une petite économie d'artisans.

Pour une telle économie, il n'y a aucun besoin d'un réseau d'hydrogène global de la taille du réseau de gaz actuel. Il semble que nombreux sont ceux qui pour le moins ont pressenti ou en ont eu conscience. La réserve observée a permis, au moins pour le moment, d'éviter des investissements gigantesques pour rien du tout.

Est-ce qu'il ne serait pas plus sensé de ne pas voir les vecteurs fossiles comme les coupables, mais plutôt de les respecter et les apprécier comme des aides de haute valeur ? Ou de repenser nos habitudes de consommation ? Ou de rechercher d'autres sources de satisfaction que l'excès matériel ? Ou aussi de réaliser que les temps de l'énergie (trop) bon marché sont révolus ?

7. Résumé

Nous avons vu que le problème de l'utilisation de l'hydrogène pour couvrir nos besoins énergétiques et pour décarboniser l'économie n'était pas principalement technique ou technologique.

Nous savons comment produire l'hydrogène. Nous savons aussi comment le transporter et le stocker. Nous pouvons également le transformer en chaleur ou en électricité pour répondre à nos besoins énergétiques. Les technologies pour le transformer en d'autres substances pour l'usage de tous les jours et industriel ont déjà été développées, sont en cours de le devenir ou sont encore à être inventées.

Il y a certainement encore un grand champ pour des améliorations. C'est important pour les performances économiques des applications. Cependant, cela ne résout pas le problème fondamental.

Le problème ne réside pas non plus dans une limitation des possibilités d'application de l'hydrogène. Au contraire, elles sont très diverses et tendent plutôt à exacerber la situation.

Non, le problème fondamental est simplement une question d'échelle. La demande en hydrogène est simplement gigantesque. Nous en avons besoin pour remplacer les énergies fossiles et nucléaires qui ne peuvent pas être remplacées entièrement par de l'énergie verte produite localement. Nous en avons aussi besoin pour couvrir le déficit électrique hivernal.

Ce n'est cependant que la pointe de l'iceberg. Les vecteurs fossiles ne sont pas seulement des sources d'énergie mais, peut-être même surtout, des fournisseurs de matières premières. Si nous voulons faire sans eux dans le futur dans le cadre de la décarbonisation de l'économie, l'oxygène et le carbone doivent aussi être mis à disposition en même temps que l'hydrogène. Pour la plupart des politiciens, économistes, hommes d'affaires et bien d'autres encore, le calcul est simple : pas de problèmes, il y a assez d'eau, nous obtenons l'oxygène et l'hydrogène d'un seul coup et nous pouvons extraire le carbone de l'air. Il n'y en a de toutes façons que trop.

Cela signifie que, théoriquement, nous pouvons produire les carburants, les huiles de chauffage et les produits plastiques dont nous avons besoin.

Le hic dans cette approche est que tous ces procédés demandent énormément d'énergie, avant tout sous forme d'électricité, principalement sous forme « d'hydrogène vert ». Les chiffres calculés pour la Suisse donnent une idée à quelle échelle les quantités attendues se trouvent et ne sont pas particulièrement encourageants pour une application globale.

Ainsi en Suisse, nous avons besoin de 1.5 fois notre consommation totale annuelle en plus pour couvrir nos besoins électriques sans le fossile et le nucléaire. Si nous additionnons à cela l'électricité nécessaire pour produire des carburants pour le transport, nous avons besoin d'encore 2 fois la consommation annuelle. En 2024, elle était de 57.5 TWh

La production d'électricité requise pour la production d'hydrogène pour la synthèse de matières plastiques relativement simples comme le PET, est par exemple aussi de l'ordre des TWh. La situation n'est pas bien meilleure dans d'autres pays bien que les conditions extérieures soient différentes. Le problème de base est le même.

Une économie globale de l'hydrogène, comme la rêvent beaucoup d'entre nous, ne pourrait seulement être réalisée qu'en construisant d'énormes centrales solaire ou éoliennes dans des endroits où il y a beaucoup d'eau propre. De tels endroits n'existent pratiquement pas sur terre ; pour le moins pas là où les centres industriels sont situés. Cela pose la question de savoir si le vieux modèle colonial a encore sa place ou si les industries friandes en énergie ne devraient pas être placées nouvellement dans de tels sites. La transition vers l'hydrogène demandera probablement que ces installations devront être nouvellement construites ou pour le moins fortement rénovées.

Ainsi, une telle économie n'est probablement pas réalisable. Cependant, cela ne signifie pas que l'hydrogène ne jouera aucun rôle dans le futur. – bien au contraire. Dans des régions isolées, les îles, les régions éloignées des centres ou celles avec une consommation d'énergie principalement donnée par les besoins domestiques, les activités commerciales et d'artisanat, il sera certainement parmi les tous premiers choix. Un réseau global d'hydrogène n'est certainement pas la solution pour cela.

Les chiffres établis montrent aussi à quel point notre économie est excessive. Les termes « énergies renouvelables » et « décarbonisation » pourraient faire éclater cette bulle. Quelles alternatives avons-nous à disposition ? Est-ce que de nouveaux modèles économiques et industriels doivent être créés ?

J'espère que cet article aura aidé à clarifier le problème et à apporter une meilleure compréhension du sujet. Cela permettrait d'ouvrir le chemin à des options plus réalistes qui seraient libres de dogmes et de contraintes politiques.

Votre Jean-Pierre Rickli

Septembre 2025

Faites participer vos amis et connaissances à ce bulletin. Il suffit de le faire suivre ou mieux laissez-les s'inscrire !

Les numéros antérieurs du JPR-Focus sont accessibles sous News/Archiv de notre site ou t en cliquant ici : <http://www.jpr.ch/newsarchiv.cfm>

JPR Concepts & Innovation

J.-P. Rickli

Coaching - Gestion du savoir - Innovation - Energie

Höchstrasse 47

8610 Uster

Tél. : +41 (0) 44 9404642

Courriel : jprickli@JPR.ch

Inscription et désinscription : simplement par le site web www.JPR.ch ou par courriel à jprickli@JPR.ch