

## Comment l'hydrogène vert rend l'Europe plus indépendante

L'hydrogène est une option importante dans l'objectif de l'Union vers des sources d'énergie non fossiles.

André Wolf



L'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable sera un élément polyvalent sur la voie de l'indépendance énergétique. Condition préalable : une politique de promotion intelligente. Elle doit éliminer les obstacles réglementaires et tenir compte des forces et des faiblesses techniques.

Thèses principales :

- ▶ **Un marché paneuropéen de l'hydrogène** peut poser les bases d'une nouvelle division du travail industriel en Europe, qui favorise l'efficacité.
- ▶ **La disponibilité suffisante d'électricité SER (système d'énergie renouvelable) constitue** le goulot d'étranglement décisif pour la viabilité économique de l'hydrogène.
- ▶ **Les efforts politiques pour le lancement du marché** devraient se concentrer en premier lieu sur la promotion des capacités de production d'électricité nationales, et sur la mise en place d'infrastructures pour l'hydrogène. C'est ensuite le marché qui décidera de la manière dont l'hydrogène sera valorisé.
- ▶ **Les prix du CO<sub>2</sub> fixés par contrat** et d'autres formes de prise de risque peuvent contribuer à atténuer les

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Potentiel d'Utilisation de l'Hydrogène Vert</b> .....	<b>4</b>
2.1	Champs d'Application Actuels de l'Hydrogène.....	4
2.2	Champs d'Application Futurs.....	5
2.2.1	L'Hydrogène Vert comme Réservoir d'Énergie.....	5
2.2.2	Utilisation dans l'Industrie.....	6
2.2.3	Utilisation dans le Chauffage de Bâtiments.....	7
2.2.4	Utilisation dans le Secteur de la Mobilité.....	7
<b>3</b>	<b>Production d'Hydrogène en Europe</b> .....	<b>9</b>
3.1	Répartition Spatiale.....	9
3.2	Obstacles au Développement des Capacités d'Électrolyse.....	10
3.2.1	Obstacles Techniques.....	10
3.2.2	Obstacles réglementaires.....	11
3.3	Évolution des coûts.....	12
<b>4</b>	<b>Promotion des marchés de l'hydrogène dans l'UE</b> .....	<b>13</b>
4.1	La stratégie de l'UE en matière d'hydrogène.....	13
4.2	Le Rôle de l'Hydrogène dans les Propositions de Loi « Fit for 55 ».....	14
4.3	Le Paquet Législatif de l'Union sur l'Hydrogène et le Gaz Décarbonisé.....	15
<b>5</b>	<b>Mesures Possibles pour Accélérer le Démarrage du Marché</b> .....	<b>16</b>
5.1	Mesures visant à Renforcer la Production.....	16
5.2	Mesures visant à Renforcer l'Utilisation et le Transport.....	17
<b>6</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>18</b>

## Liste des figures

Graphique 1 : Filières mondiales actuelles de production et d'utilisation de l'hydrogène.....	5
Graphique 2 : Répartition actuelle de la production d'hydrogène en Europe.....	9
Graphique 3 : Structure de la stratégie européenne pour l'hydrogène.....	14

## 1 Contexte

L'attaque de la Russie contre l'Ukraine a non seulement déclenché un débat au sein de l'Union européenne sur le renforcement des sanctions contre la Russie, mais a également donné un coup de fouet aux efforts visant à réduire la dépendance générale de l'Union vis-à-vis des importations de combustibles, et à diversifier les pays d'approvisionnement. En guise de réponse provisoire, la Commission européenne a présenté le 8 mars 2022 son plan *RePowerEU*<sup>1</sup>, dont l'un des objectifs est de rendre l'Europe indépendante des importations de combustibles fossiles encore plus rapidement que prévu.<sup>2</sup> Outre la diversification des sources d'approvisionnement en gaz naturel et l'augmentation de l'efficacité énergétique, l'accélération du développement des énergies renouvelables est une pierre angulaire de la stratégie. Il ne s'agit pas seulement de l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire dans la production d'électricité, mais aussi explicitement de la production et de l'utilisation accrues de gaz renouvelables. Les espoirs reposent notamment sur l'hydrogène « vert ». Il s'agit d'hydrogène obtenu par la décomposition électrolytique de molécules d'eau, en utilisant comme source d'énergie exclusivement de l'électricité issue de sources renouvelables. L'hydrogène ainsi produit est non seulement presque neutre pour le climat, mais il peut aussi être utilisé de diverses manières. Outre son rôle de stockage à long terme de l'énergie, et donc d'aide à l'intégration dans le système de la production d'électricité volatile issue du vent et du soleil, il est disponible pour de nombreuses applications finales dans les secteurs du chauffage, des transports et de la mobilité. Dans de nombreux cas, il se substitue directement au gaz naturel ou aux produits pétroliers, ce qui la rend particulièrement attractive dans la situation actuelle. Contrairement à l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie alternative, les problèmes liés à l'utilisation des sols sont également moindres. En s'inspirant de l'idée de marketing des exportateurs d'énergie américains, on pourrait ainsi parler de l'hydrogène vert comme d'un « green freedom gas ».

Au-delà de la question de l'approvisionnement, l'hydrogène vert, en tant que technologie émergente, est également potentiellement très important d'un point de vue stratégique pour la politique industrielle. Grâce à son statut de précurseur dans la mise en place de chaînes de valorisation internationales, l'Europe pourrait garantir la création de valeur industrielle dans les segments concernés par la transformation. Elle pourrait également utiliser la montée en puissance du marché comme un moyen de définir des normes mondiales (par ex. des exigences en matière de sécurité, de pureté, de durabilité dans la production et le transport). Elle pourrait ainsi créer un terrain d'entente pour les entreprises de l'Union sur les marchés mondiaux de l'avenir, comme l'a récemment montré la stratégie de normalisation de l'Union. En raison de ses multiples applications, l'hydrogène se prête particulièrement bien à un tel objectif de politique industrielle.

Le potentiel de l'hydrogène vert est connu depuis un certain temps déjà et a été abordé au niveau européen dans la stratégie européenne pour l'hydrogène. Or, le climat politique pour le développement d'une économie de l'hydrogène vert en Europe est actuellement plus favorable que jamais. Outre la guerre en Ukraine, cela est également dû aux renforcements de la politique climatique de l'Union proposés dans le paquet « Fit-for-55 ». Il reste néanmoins des obstacles techniques et réglementaires

<sup>1</sup> Commission européenne (2022). [REPowerEU: Action européenne conjointe pour une énergie plus abordable, plus sûre et plus durable. Communication](#). COM(2022) 108 final.

<sup>2</sup> Voir à ce sujet : Reichert, G., Schwind, S., Menner, M. (2022). [REPowerEU : lutter pour la souveraineté énergétique de l'UE](#). Adhoc du cep n° 4/2022.

à la montée en puissance de l'hydrogène vert sur le marché. Ainsi, les coûts fixes élevés de l'électrolyse et les propriétés chimiques de l'hydrogène (volatilité, réactivité) pèsent sur la compétitivité des prix. Dans la plupart des champs d'application possibles, l'hydrogène est confronté à une forte concurrence avec l'utilisation directe d'électricité renouvelable sans impact sur le climat. Le développement trop lent des capacités de production d'électricité éolienne, et le manque d'infrastructures de transport constituent en outre des goulets d'étranglement externes du point de vue des capacités. Il en résulte une incertitude en matière de planification ainsi qu'un comportement hésitant en matière d'investissement. Sans nouvelles impulsions politiques, un marché européen de l'hydrogène ne pourra pas voir le jour. Dans ce contexte, le rôle de l'hydrogène vert dans la future décarbonisation de l'Europe doit être soigneusement examiné. La question se pose notamment de savoir quels instruments réglementaires peuvent accélérer le lancement du marché et sur quels domaines d'application le cadre de soutien doit se concentrer. Cet article apporte des pistes de réflexion à ce sujet. Il donne un aperçu des potentiels d'utilisation de l'hydrogène vert, met en évidence les obstacles actuels et discute des approches pour des mesures complémentaires.

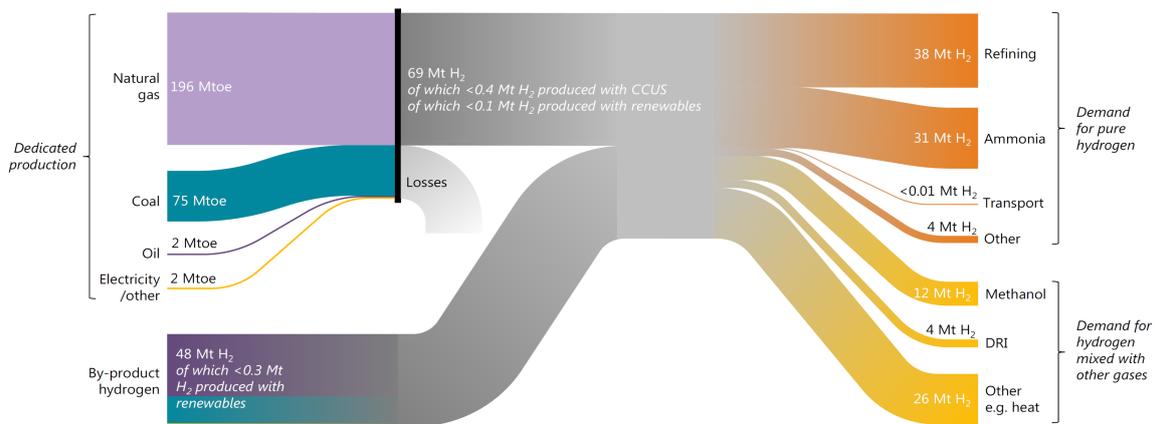
## 2 Potentiel d'Utilisation de l'Hydrogène Vert

### 2.1 Champs d'Application Actuels de l'Hydrogène

Le domaine d'application de l'hydrogène se limite actuellement encore largement au secteur industriel. L'utilisation comme matière première y est clairement dominante. Deux industries se trouvent au cœur de cette utilisation : l'industrie chimique et l'industrie pétrolière. Dans l'industrie chimique, l'hydrogène pur est utilisé avec de l'azote pour la production d'ammoniac et d'autres engrais qui en sont dérivés. En combinaison avec le CO<sub>2</sub>, l'hydrogène permet de produire du méthanol, un produit chimique de base qui est important. La production d'autres carburants synthétiques suit des processus similaires. Dans l'industrie pétrolière, l'hydrogène est utilisé, à la fois comme matière première, et comme source d'énergie dans le traitement du pétrole brut. Dans différents procédés d'hydrogénation, il sert à éliminer les impuretés, notamment le soufre.<sup>3</sup> En revanche, l'utilisation en tant que vecteur d'énergie dans le secteur des transports et du chauffage ne joue jusqu'à présent qu'un rôle secondaire à l'échelle mondiale. La production d'hydrogène à usage industriel est actuellement loin d'être durable. Il est en grande partie produit sous forme d'hydrogène dit « gris », via un processus de reformage à la vapeur du gaz naturel, ce qui entraîne des émissions de CO<sub>2</sub> (voir figure 1). La gazéification du lignite ou de la houille (hydrogène « brun » ou « noir ») est également une voie de production fréquente et également très émettrice. En revanche, la production d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité n'en est encore qu'à ses débuts.

<sup>3</sup> AIE (2019). [L'avenir de l'hydrogène](#). Agence internationale de l'énergie.

**Graphique 1 : Filières mondiales actuelles de production et d'utilisation de l'hydrogène**



Source : AIE (2019).

## 2.2 Champs d'Application Futurs

### 2.2.1 L'Hydrogène Vert comme Réservoir d'Énergie

L'utilisation de l'électricité d'origine éolienne et solaire dans la production d'hydrogène permet de transformer une forme d'énergie, dont l'offre varie dans le temps, en un vecteur énergétique stable et facile à stocker. L'hydrogène produit peut être stocké à long terme de différentes manières : il peut être comprimé et stocké, dans des réservoirs sous pression, ou des cavernes de stockage, il peut être refroidi à l'état liquide et ainsi stocké dans des réservoirs de gaz liquide, ou adsorbé dans certains solides. Il est possible à tout moment de le reconverter en énergie électrique, par exemple en l'utilisant comme combustible dans des centrales à gaz ou des installations de production combinée de chaleur et d'électricité.<sup>4</sup>

Compte tenu des grandes capacités de stockage potentielles, l'hydrogène vert peut jouer un rôle important en tant que fournisseur de services système dans le système énergétique européen de demain. Avec l'augmentation de la part des sources d'énergie volatiles, la fréquence des excédents temporaires de production d'électricité continue de croître. Pour la partie des excédents qui ne peut pas être utilisée immédiatement de manière judicieuse dans d'autres secteurs, il faut créer une possibilité de stockage comme solution intermédiaire. La conversion en hydrogène peut ici agir comme un complément à d'autres technologies de stockage, comme le stockage par batterie ou l'accumulation par pompage.

La rentabilité économique résulte de l'exploitation des fluctuations de prix : L'électricité peut être transformée pour être stockée à bas prix pendant les périodes de surplus, puis réinjectée dans le réseau pendant les périodes de prix élevés. Dans ce contexte, il est également possible d'agir en tant que fournisseur sur le marché de l'énergie de réglage avec une rémunération correspondante du service de réseau. Des estimations montrent que l'hydrogène présente surtout des avantages pour le stockage à long terme de l'électricité (pour surmonter les pénuries d'offre à long terme et la variabilité saisonnière). Elles montrent aussi qu'il sera à moyen terme supérieur, en termes de coûts, aux technologies alternatives telles que le pompage-turbinage.<sup>5</sup> Les conditions préalables sont la disponibilité de

<sup>4</sup> IPP (2019). Étude de potentiel de l'économie de l'hydrogène. IPP ESN Power Engineering.

<sup>5</sup> Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I. (2019). Projeter le futur coût nivelisé des technologies de stockage de l'électricité. *Joule*, 3(1), 81-100.

grandes quantités d'énergie renouvelable excédentaire et l'amélioration du rendement des étapes de conversion (voir section 3.2). Cela a également un impact sur la contribution à l'efficacité du système énergétique dans son ensemble. Ainsi, si le recours au « power-to-gas » en tant que technique de stockage entraîne des coûts plus élevés à moyen terme, les coûts du système sont moins élevés avec l'hydrogène que sans, dans le cadre d'objectifs climatiques ambitieux à long terme (réduction des gaz à effet de serre de 95% ou plus).<sup>6</sup> Le stockage d'hydrogène doit donc être considéré en premier lieu comme une option pour la phase avancée de la transformation du système vers la neutralité climatique.

### 2.2.2 Utilisation dans l'Industrie

À l'avenir également, l'hydrogène restera une matière première indispensable pour la production d'engrais azotés et donc pour le maintien de la productivité agricole. L'utilisation d'hydrogène produit à partir d'électricité renouvelable n'améliore pas seulement le bilan climatique de la production d'engrais. Le risque actuel d'une interdiction à long terme des exportations d'engrais minéraux russes représente également une chance pour l'Europe d'acquiescer son indépendance en développant sa production nationale dans ce domaine. Un défi concret pour la production d'ammoniac consiste à générer non seulement de l'hydrogène, mais aussi de l'azote, également obtenu par le processus de reformage à la vapeur, par des procédés alternatifs. A cet effet, on étudie actuellement des technologies qui génèrent de l'azote sous forme pure à partir de la décomposition du mélange de substances de l'air, notamment en utilisant également des procédés d'électrolyse.<sup>7</sup>

Par ailleurs, le développement technologique ouvre également de nouveaux champs d'application pour l'utilisation de l'hydrogène dans l'industrie. Ainsi, le méthanol peut être produit à partir d'hydrogène en combinaison avec du CO<sub>2</sub> séparé. Outre son rôle de matière première pour la fabrication d'une multitude de produits chimiques (notamment le formaldéhyde, l'acide acétique), le méthane est très intéressant dans la perspective de l'indépendance énergétique. Il l'est notamment dans son rôle potentiel de carburant synthétique pour le secteur de la mobilité (voir section 2.2.4).<sup>8</sup> La conversion de la production de méthanol, jusqu'à présent largement basée sur le gaz naturel, en hydrogène vert crée donc, outre une décarbonisation immédiate de ce secteur industriel, une marge d'application supplémentaire pour l'énergie renouvelable stockée.

Outre son utilisation comme matière première, l'hydrogène peut également contribuer indirectement à la décarbonisation des processus industriels en tant qu'adjuvant des processus chimiques. L'accent est mis ici sur la contribution à de nouveaux procédés de production pour l'industrie sidérurgique, jusqu'ici grande émettrice de CO<sub>2</sub>. La production traditionnelle d'acier, qui rejette beaucoup de CO<sub>2</sub>, et qui consiste à faire fondre le minerai de fer en utilisant du coke dans des hauts fourneaux, peut être remplacée par des procédés dits de réduction directe. Dans ce cas, le minerai de fer n'est pas fondu, mais réduit en éponge de fer solide, les agents réducteurs pouvant être aussi bien du gaz naturel que de l'hydrogène. L'utilisation d'hydrogène vert peut ainsi améliorer considérablement le bilan de CO<sub>2</sub>

<sup>6</sup> Michalski, J., Altmann, M., Bünger, U., & Weindorf, W. (2019). Étude sur l'hydrogène en Rhénanie-du-Nord-Westphalie. Ministère de l'économie, de l'innovation, de la numérisation et de l'énergie du Land de Rhénanie-du-Nord-Westphalie : Düsseldorf, Allemagne.

<sup>7</sup> [Institut Fraunhofer des systèmes et technologies céramiques \(IKTS\) \(2020\).](#)

<sup>8</sup> Gulden, J., Sklarow, A., & Luschtinetz, T. (2018). New means of hydrogen storage-the potentials of methanol as energy storage for excessive windpower in North Germany. In E3S Web of Conferences (Vol. 70, p. 01004). EDP Sciences.

du processus. Pour la transformation ultérieure de l'éponge de fer en acier brut, il faut toutefois passer par un processus de fusion dans des fours à arc électrique, ce qui nécessite de grandes quantités d'électricité comme source d'énergie.<sup>9</sup> Outre la contribution à la décarbonisation, l'évaluation d'un passage à des processus basés sur H<sub>2</sub> doit donc toujours tenir compte de l'effet sur le bilan énergétique de l'ensemble du système.

### 2.2.3 Utilisation dans le Chauffage de Bâtiments

En tant que combustible, l'hydrogène peut en principe être utilisé pour chauffer des installations de production, des logements, ou d'autres types de bâtiments. Il peut être brûlé dans des chaudières à gaz à condensation pour l'approvisionnement local en chaleur, ou bien utilisé dans des centrales de cogénération pour l'approvisionnement en chaleur via des réseaux de chauffage urbain. Dans certaines limites techniques, il est possible de recourir à l'infrastructure de réseau de gaz existante pour le transport nécessaire de l'hydrogène vert vers les consommateurs de chaleur. Son utilisation dans le secteur du chauffage est toutefois confrontée à une forte concurrence d'autres technologies de chauffage climatiquement neutres. Il s'agit notamment de l'utilisation directe d'électricité issue d'énergies renouvelables (power-to-heat), sous forme de pompes à chaleur et de chaudières à électrodes. Dans ce cas, des rendements proches de 100%, voire largement supérieurs à 100% dans le cas des pompes à chaleur, sont en principe possibles. C'est justement ce qui fait que la technologie « Power-to-Gas » restera dans l'ombre du point de vue de l'efficacité dans ce domaine d'application, même en cas d'augmentation future du rendement.<sup>10</sup> À cela s'ajoute l'utilisation de sources d'énergie biologiques (biométhane, pellets de bois) et, dans le domaine du chauffage urbain, des rejets thermiques industriels, qui constituent d'autres alternatives de chauffage respectueuses du climat. Dans ce domaine, l'hydrogène vert est donc surtout intéressant pour une phase de transition au cours de laquelle il s'agit de réduire le plus rapidement possible l'empreinte carbone du secteur européen du chauffage sur la base du parc actuel de technologies de chauffage. Cela est particulièrement vrai pour les pays où le gaz représente actuellement une part importante du mix thermique. Les chaudières à gaz à condensation modernes peuvent supporter des taux d'incorporation d'hydrogène relativement élevés (jusqu'à 30% selon le fabricant Vaillant<sup>11</sup>). Tout en encourageant les investissements dans les technologies de chauffage renouvelables à haut rendement, l'hydrogène vert pourrait ainsi préparer le terrain pour un abandon progressif du chauffage fossile.

### 2.2.4 Utilisation dans le Secteur de la Mobilité

Plusieurs technologies sont potentiellement disponibles pour l'utilisation de l'hydrogène vert comme moyen de propulsion des véhicules. La technologie de la pile à combustible est celle qui fait le plus parler d'elle. Dans la pile à combustible à hydrogène, l'énergie issue de la réaction chimique de l'hydrogène et de l'oxygène est convertie en électricité. Les véhicules à pile à combustible font donc le plein d'hydrogène et utilisent l'électricité obtenue comme énergie de propulsion. Il est également pos-

<sup>9</sup> Dena (2022). [Domaines d'application pour les Power Fuels](#).

<sup>10</sup> Gerhardt, N., Bard, J., Schmitz, R., Beil, M., Pfennig, M., & Kneiske, T. (2020). L'hydrogène dans le système énergétique du futur : focus sur le chauffage des bâtiments. Étude sur l'utilisation de H<sub>2</sub> dans le système énergétique du futur, avec une attention particulière pour le chauffage des bâtiments.

<sup>11</sup> BBB (2022). [De nouveaux appareils de chauffage promettent une percée dans le domaine de l'hydrogène](#). BundesBauBlatt 1-2/2022.

sible d'utiliser directement l'hydrogène comme carburant grâce à des moteurs à combustion à hydrogène. Pour ce faire, l'hydrogène est préalablement comprimé ou liquéfié. Alternativement, l'hydrogène vert peut aussi contribuer indirectement à la transition des transports en tant que point de départ pour la production de carburants synthétiques neutres pour le climat. Les possibilités d'utilisation des technologies et la situation de concurrence avec les véhicules électriques à batterie diffèrent selon le mode de transport.

En raison de la teneur énergétique élevée de l'hydrogène (à l'état comprimé), les moteurs à hydrogène présentent en principe des avantages en termes d'autonomie par rapport aux véhicules à batterie. De plus, le processus de ravitaillement prend également beaucoup moins de temps.<sup>12</sup> Ces avantages sont toutefois contrebalancés par un rendement nettement inférieur à celui des véhicules à batterie. Une étude de Horváth & Partners estime que les valeurs moyennes se situent entre 25% et 35%, contre 70% à 80% pour les véhicules électriques à batterie.<sup>13</sup> Le nombre plus élevé d'étapes de conversion est en partie responsable de cette situation. De plus, les pertes de conversion dans la pile à combustible elle-même sont nettement plus élevées que dans la batterie classique. La production de carburants synthétiques à base d'hydrogène présente un rendement encore plus faible en raison de l'étape de production supplémentaire. De plus, la production est rendue encore plus coûteuse par l'utilisation de métaux rares comme accélérateurs de réaction. L'avantage décisif de cette source d'énergie réside toutefois dans le fait qu'elle se présente sous forme liquide et qu'elle possède des propriétés comparables à celles des carburants traditionnels à base d'huile minérale. L'infrastructure de transport et de stockage existante pour les carburants liquides peut donc être utilisée directement. Les carburants synthétiques peuvent également être mélangés à l'essence pour les moteurs à essence ou ces derniers peuvent être adaptés à peu de frais à l'utilisation complète de carburants synthétiques. En cas d'utilisation de méthanol comme carburant synthétique, une autre technologie de propulsion innovante est disponible avec la pile à combustible au méthanol.<sup>14</sup>

En ce qui concerne le transport routier, il existe un large consensus sur le fait que les moteurs à hydrogène devraient se concentrer sur le transport de marchandises sur de longues distances, en premier lieu sur le transport de marchandises lourdes. Dans ce segment de mobilité, la propulsion par pile à combustible peut faire valoir son principal avantage, à savoir une densité énergétique plus élevée que celle des véhicules à batterie : Une plus grande autonomie assure ici la rentabilité. Les carburants synthétiques à base d'hydrogène peuvent ainsi constituer une option complémentaire dans ce segment afin de décarboniser rapidement le parc de camions existant. Dans le transport maritime et aérien, les conditions sont différentes. Les moteurs électriques à batterie y sont largement impraticables sur de grandes distances. L'hydrogène vert jouera donc un rôle clé dans la décarbonisation de ces modes de transport. Dans le transport maritime, différentes technologies de l'hydrogène sont en concurrence directe. Outre la pile à combustible et le développement de carburants marins synthétiques, l'utilisation directe via des moteurs à combustion à hydrogène est également étudiée. Enfin, dans le secteur de l'aviation, l'hydrogène vert jouera, à l'avenir, un rôle décisif en tant que composant de base pour la production de kérosène synthétique.<sup>15</sup> En l'absence d'alternatives viables, les objectifs à long terme de réduction des GES dans l'aviation ne pourront être atteints, du moins sur les longues distances, que

<sup>12</sup> VDI/VDE (2019). Véhicules à pile à combustible et à batterie - importance pour l'électromobilité. Étude VDI/VDE mai 2019.

<sup>13</sup> Horváth & Partners (2019). Industrie automobile 2035 - Prévisions pour l'avenir.

<sup>14</sup> INWL (2018). Analyse du potentiel du méthanol en tant que source d'énergie neutre en termes d'émissions pour la navigation et le secteur énergétique. Document stratégique. INWL Institut pour une économie et une logistique durables.

<sup>15</sup> IPP (2019). Étude de potentiel de l'économie de l'hydrogène. IPP ESN Power Engineering.

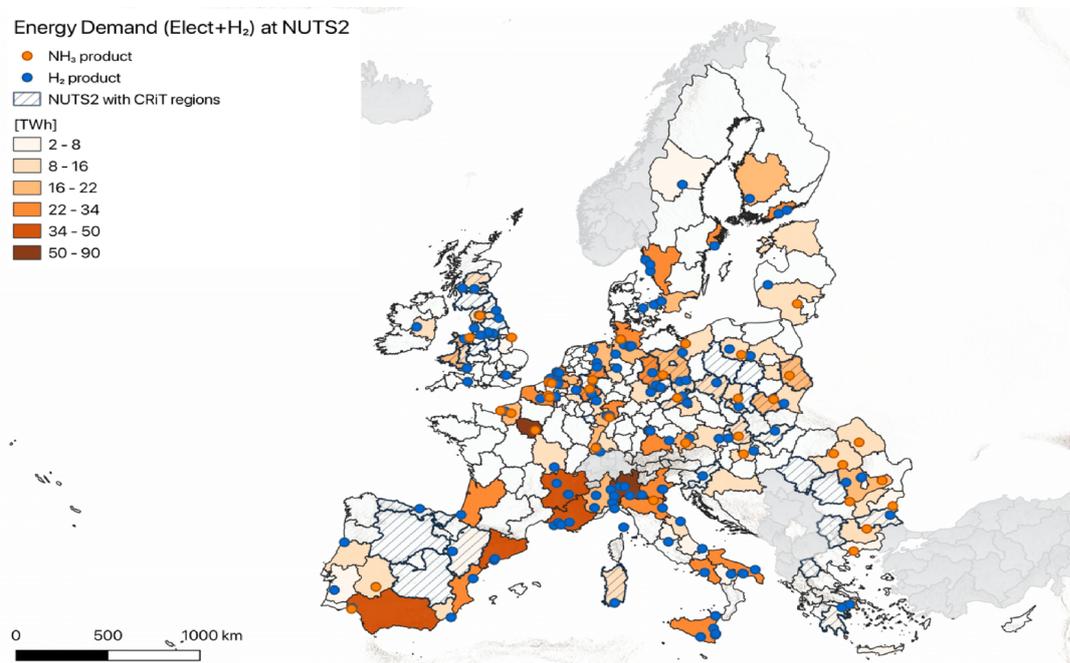
par le remplacement à grande échelle du kérosène fossile par du kérosène synthétique, complété par l'utilisation de biocarburants.

### 3 Production d'Hydrogène en Europe

#### 3.1 Répartition Spatiale

Il n'existe pas de statistiques officielles permettant de comparer le niveau actuel de production d'hydrogène dans l'Union entre les différents pays. Plus récemment, une étude de Kakoulaki et al. (2021) a estimé la répartition des sites de production sur l'ensemble du continent européen à petite échelle, sur la base de données provenant de différentes bases de données industrielles. Le graphique 2 met en évidence les plateformes actuelles de production d'hydrogène (points bleus) et d'ammoniac à base d'hydrogène (points orange) en Europe. La coloration des surfaces des régions (régions NUTS 2) indique les besoins estimés des régions en électricité, pour un scénario dans lequel le niveau actuel de production d'hydrogène serait entièrement converti à l'électrolyse.<sup>16</sup> On constate une forte concentration spatiale au sein de l'Union. En cohérence avec les domaines d'application décrits, il s'agit principalement d'agglomérations industrielles. Outre les régions côtières, on y trouve également quelques agglomérations éloignées des côtes, dont le potentiel éolien est plutôt faible. Si la répartition spatiale de la production d'hydrogène reste inchangée à l'avenir, cela devrait signifier un besoin croissant de capacité pour les réseaux longue distance de transport d'électricité.

**Graphique 2 : Répartition actuelle de la production d'hydrogène en Europe**



Source : Kakoulaki et al. (2021) ; cercles : Emplacement des hubs de production actuels ; couleur des surfaces régionales : Niveau de la demande régionale d'électricité dans le scénario hydrogène ; surfaces de régions hachurées : Régions charbonnières actuelles (EU Coal Regions in Transition).

<sup>16</sup> Kakoulaki, G., Kougias, I., Taylor, N., Dolci, F., Moya, J., & Jäger-Waldau, A. (2021). Green hydrogen in Europe - A regional assessment : Substituting existing production with electrolysis powered by renewables. *Energy Conversion and Management*, 228, 113649.

## 3.2 Obstacles au Développement des Capacités d'Électrolyse

### 3.2.1 Obstacles Techniques

La structure des coûts de la production d'hydrogène vert constitue un obstacle majeur à la croissance. La création de capacités de production nécessite la mise en place d'un système complexe de différents composants. Outre les piles d'électrolyse elles-mêmes, cela comprend divers dispositifs d'échange de matière et de chaleur, ainsi que de séchage et de refroidissement du gaz.<sup>17</sup> Il en résulte un besoin d'investissement initial élevé pour la construction de capacités dans les installations d'électrolyse (électrolyseurs) et donc des coûts de capital élevés pour la phase suivante de l'exploitation. Du point de vue économique, les économies d'échelle jouent donc un rôle décisif dans l'électrolyse : un taux d'utilisation élevé des installations est nécessaire pour couvrir les coûts fixes du capital. En même temps, on espère pouvoir réaliser à l'avenir des baisses de coûts unitaires du point de vue de l'efficacité en optimisant la construction et le fonctionnement des installations.<sup>18</sup> La condition préalable à de tels effets d'apprentissage est de disposer de suffisamment de valeurs empiriques issues de l'exploitation pratique, de sorte qu'il existe également à cet égard une dépendance vis-à-vis du volume de production. Dans ce contexte, l'approvisionnement en électricité à partir de sources renouvelables constitue un facteur essentiel pour la rentabilité des électrolyseurs. Actuellement, dans de nombreux endroits, les électrolyseurs utilisent en premier lieu l'électricité excédentaire issue de l'exploitation d'éoliennes, qui serait sinon coupée (électricité dite « jetable »). Afin de parvenir à un nombre d'heures d'exploitation suffisant pour la rentabilité dans le cadre de l'échelonnement du marché, de telles phases de surabondance sur le marché de l'électricité devraient à l'avenir être nettement plus fréquentes et plus intenses. Il existe également un problème au niveau des coûts variables d'exploitation. L'utilisation d'électricité dans la production d'hydrogène est liée à des pertes de conversion d'énergie. Il en résulte un besoin élevé en kilowattheures d'électricité par kilogramme d'hydrogène produit et donc des coûts d'achat d'électricité élevés. Cela renforce non seulement le problème de la pénurie, mais crée également une forte dépendance vis-à-vis du niveau des prix de l'électricité, y compris des composantes gouvernementales du prix de l'électricité.

Dans les domaines du stockage et du transport, les propriétés chimiques de l'hydrogène constituent un défi. Le faible poids et - ce qui va de pair - la forte volatilité des molécules d'hydrogène comportent un risque de pertes d'énergie importantes. La grande réactivité exige en outre de prêter attention à la question du maintien de la pureté de l'hydrogène. Cela est particulièrement vrai lorsqu'il est mélangé à d'autres substances, comme dans le cas du transport dans le réseau de gaz naturel. Étant donné que la pile à combustible, par exemple, pose des exigences élevées en matière de pureté de l'hydrogène utilisé, il peut en résulter des conséquences pour l'efficacité énergétique des applications de l'hydrogène.<sup>19</sup> En cas de mélange dans les réseaux d'infrastructure existants, il pourrait également y avoir un risque que l'hydrogène se diffuse dans les parois des conduits et les endommage de cette manière. La compatibilité des matériaux fait actuellement l'objet de recherches intensives.

<sup>17</sup> Smolinka, T., Wiebe, N., Sterchele, P., Palzer, A., Lehner, F., Jansen, M., ... & Zimmermann, F. (2018). Industrialisation de l'électrolyse de l'eau en Allemagne : opportunités et défis pour un hydrogène durable pour les transports. Électricité et chaleur.

<sup>18</sup> AIE (2019). [L'avenir de l'hydrogène - saisir les opportunités d'aujourd'hui](#). Agence internationale de l'énergie.

<sup>19</sup> ALPIQ (2021). [Hydrogène - Défis pour l'infrastructure](#).

La mise en place de réseaux d'hydrogène autonomes peut constituer un moyen d'éviter ces risques. Cela peut impliquer la transformation des réseaux de gaz naturel existants en vue d'un passage (complet) au transport d'hydrogène et la construction de leurs propres conduits d'hydrogène. Selon une étude récente de Ready4H2, une association de gestionnaires de réseaux de distribution de gaz en Europe, 96% des réseaux de gaz existants en Europe seraient déjà techniquement prêts à être convertis au transport d'hydrogène. L'étude de la compatibilité des différents composants n'est toutefois pas encore terminée.<sup>20</sup> Outre les coûts de la conversion, les coûts variables du transport de l'énergie peuvent également augmenter en raison de la densité énergétique plus faible de l'hydrogène, à moins que cela ne puisse être compensé par une augmentation de la vitesse du courant. Le transport par bateau peut constituer une alternative en fonction de la géographie. Cependant, pour augmenter la densité de l'hydrogène, il faut d'abord le comprimer ou le refroidir à l'état liquide, ce qui nécessite une grande quantité d'énergie.<sup>21</sup>

Du côté de l'utilisation, les interfaces avec les futures applications finales font encore défaut dans de nombreux cas. Cela concerne surtout le manque de stations-service d'hydrogène dans le secteur de la mobilité. Il s'agit ici du problème classique de la poule et de l'œuf : les incitations à investir dans la construction d'un réseau de stations-service présupposent la perspective d'un nombre suffisant d'utilisateurs. Or, la demande de mobilité basée sur l'hydrogène dépend de manière décisive de la disponibilité d'une infrastructure de ravitaillement locale.

### 3.2.2 Obstacles réglementaires

Outre les défis techniques tout au long de la chaîne de création de valeur, le paysage réglementaire en Europe constitue actuellement encore un obstacle sur la voie de la rentabilité. Du côté de la production, cela concerne par exemple les taxes sur l'achat d'électricité par les électrolyseurs. Dans la mesure où aucune réglementation spéciale ne s'applique aux électrolyseurs en tant qu'intermédiaires énergétiques, ils devraient, malgré leur contribution au service du réseau, payer aussi bien des taxes pour la promotion des énergies renouvelables que des tarifs de réseau. La situation juridique actuelle au sein de l'Union n'est pas uniforme. Tandis que certains pays prévoient déjà une exonération (partielle) des éléments du prix de l'électricité fixés par l'État dans certaines limites de capacité, les électrolyseurs opérant librement sur le marché supporteraient dans d'autres pays l'intégralité des taxes. Cela augmente en outre les coûts d'exploitation et empêche la réalisation d'économies d'échelle.

Du côté des utilisateurs, l'incertitude fondamentale concernant l'environnement réglementaire est également un facteur important. La conversion des processus de production ou des émissions de véhicules aux technologies basées sur l'hydrogène est une décision d'investissement fondamentale qui a des conséquences à long terme sur les paramètres de son propre modèle d'entreprise. Compte tenu des changements disruptifs survenus ces dernières années dans la politique énergétique, la question de la sécurité de la planification se pose pour les entrepreneurs. Cela concerne en particulier l'évolution à long terme du prix du CO<sub>2</sub> en tant que facteur déterminant important pour la rentabilité opérationnelle d'un tel investissement. Au niveau sectoriel, il en va de même pour la question de la comptabilisation de l'hydrogène vert dans les objectifs sectoriels de réduction des émissions.

<sup>20</sup> Ready4H2 (2021). [PART 1 : Les réseaux de gaz locaux se préparent à la conversion](#). Les réseaux locaux d'hydrogène en Europe.

<sup>21</sup> Conseil national de l'hydrogène (2021). [Document de position sur le transport de l'hydrogène](#).

### 3.3 Évolution des coûts

Le succès économique à long terme de l'hydrogène vert ne dépend pas seulement de l'efficacité du vecteur énergétique par rapport aux alternatives respectueuses du climat. Les coûts de production doivent également atteindre un niveau compétitif par rapport aux autres formes de production d'hydrogène. En fonction d'hypothèses spécifiques sur la technologie d'électrolyse, les taux d'utilisation et les sites de production, différents chiffres circulent sur le montant des coûts/kg d'hydrogène produit. Il existe un consensus sur le fait qu'à l'heure actuelle, l'hydrogène vert ne peut pas encore concurrencer l'hydrogène issu de sources fossiles en termes de coûts. Dans le même temps, on prévoit un rattrapage important dans un avenir proche, en raison de la combinaison de plusieurs facteurs : les progrès de la productivité de l'électrolyse, l'augmentation des prix du CO<sub>2</sub> et le renchérissement du gaz naturel. Greenpeace (2020) estime que l'hydrogène vert sera compétitif en termes de prix par ses propres moyens au plus tard en 2050, et dès 2030 dans le cas d'une baisse significative des prix des électrolyseurs considérée comme possible.<sup>22</sup> Bloomberg NEF (2020) estime également qu'une parité des prix est possible dès 2030 en cas d'évolution optimiste des coûts du capital.<sup>23</sup> D'autres sources sont plus réservées à cet égard et ne prévoient une compétitivité des prix qu'aux alentours de 2050.<sup>24</sup> Dans toutes les simulations, l'évolution attendue des taux d'utilisation des installations d'électrolyse revêt une importance décisive. Il apparaît ainsi clairement qu'il ne s'agit en aucun cas d'un scénario sans politique. Ce n'est que si, du côté politique, les obstacles actuels à la mise en place d'un marché de l'hydrogène vert sont surmontés que l'augmentation de la demande permettra la dégressivité attendue des coûts. La question principale qui se pose est donc de savoir quels sont les instruments utiles à la construction d'un marché européen.

<sup>22</sup> Greenpeace (2020). Étude succincte sur l'hydrogène bleu - Perspectives et limites d'une nouvelle voie technologique. Greenpeace Energy.

<sup>23</sup> BloombergNEF (2020). Perspectives de l'économie de l'hydrogène - Messages clés. Bloomberg Finance L.P.

<sup>24</sup> Par exemple : Agora Energiewende (2019). Industrie climatiquement neutre : présentation détaillée des technologies clés pour les secteurs de l'acier, de la chimie et du ciment. Agora Energiewende.

## 4 Promotion des marchés de l'hydrogène dans l'UE

### 4.1 La stratégie de l'UE en matière d'hydrogène

En juillet 2020, l'Union européenne (UE) a publié sa « Stratégie hydrogène pour une Europe neutre en carbone ».<sup>25</sup> Elle consiste en une feuille de route pour la création et l'expansion de chaînes de valeur basées sur la production d'hydrogène « vert ». Selon la définition de l'Union, l'hydrogène est considéré comme vert lorsqu'il est produit par électrolyse de l'eau, à condition que l'énergie électrique utilisée comme intrant provienne de sources renouvelables. La feuille de route esquisse un parcours en trois phases. Dans la phase à court terme, jusqu'en 2024, l'accent est mis sur la production d'hydrogène vert pour les applications existantes. Celles-ci se limitent en grande partie à l'industrie chimique. Parallèlement, de nouveaux domaines d'application doivent également être encouragés. À cette fin, des électrolyseurs d'une capacité totale de 6 GW seront mis en place et produiront jusqu'à un million de tonnes d'hydrogène vert par an. À moyen terme (2025-2030), l'objectif est d'accélérer le déploiement des électrolyseurs, l'hydrogène devant conquérir de nouveaux domaines d'application, dont le rôle de vecteur énergétique dans les industries à forte consommation d'énergie (par exemple l'acier) et diverses applications dans le domaine des transports. La capacité totale des électrolyseurs devrait atteindre 40 GW en 2030, associée à une production annuelle effective pouvant atteindre 10 millions de tonnes d'hydrogène. À long terme, c'est-à-dire à partir de 2030, l'objectif est de généraliser l'utilisation de l'hydrogène vert dans tous les domaines d'application où il est techniquement réalisable et présente des avantages en termes de coûts par rapport aux technologies vertes alternatives.

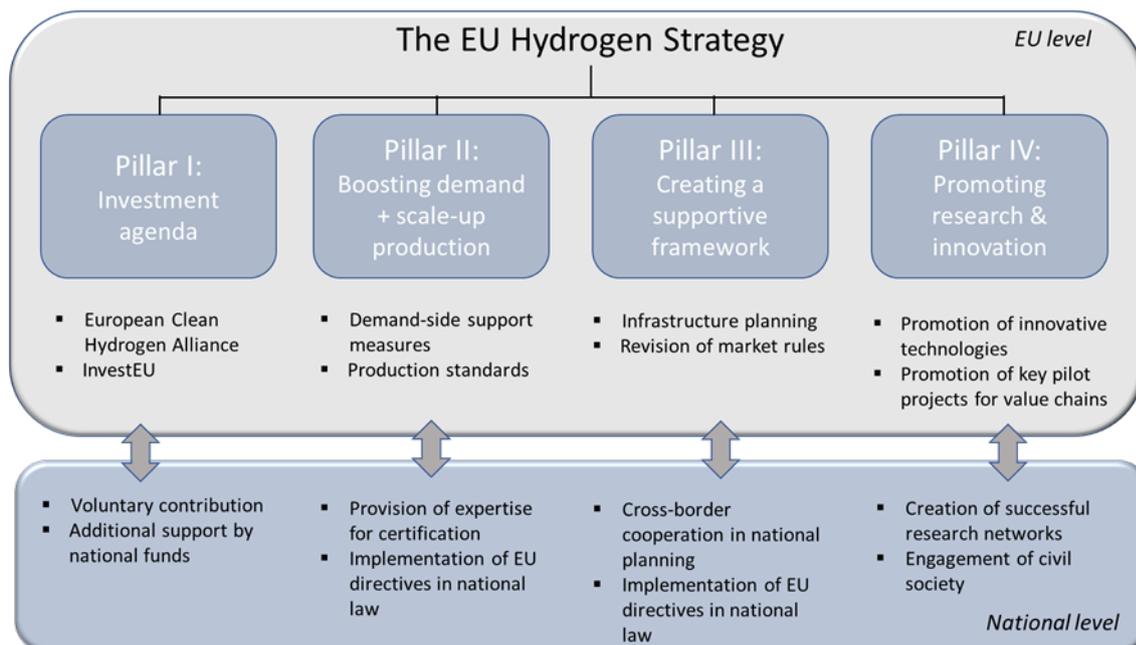
Afin d'encourager un déploiement en temps utile, plusieurs mesures ont été conçues au niveau de l'Union, regroupées en quatre piliers. Le premier pilier consiste à encourager les investissements, les fonds d'*InvestEU* servant de soutien financier, et l'*Alliance européenne pour l'hydrogène propre* de plateforme pour les parties prenantes, afin de coordonner un programme d'investissement. Le deuxième pilier consiste en des mesures visant à soutenir la croissance de l'offre et de la demande d'applications basées sur l'hydrogène, y compris des incitations fiscales telles qu'un programme de prix du carbone garantis par l'État (Carbon Contracts for Difference). Le troisième pilier comprend des mesures visant à créer un cadre de soutien à la croissance du marché, mais aussi la planification de l'infrastructure physique pour les chaînes de valeur basées sur l'hydrogène, ainsi que la révision des règles du marché afin de faciliter l'accès de l'hydrogène sur les marchés de détail. Le quatrième pilier vise à promouvoir l'innovation en finançant des projets pilotes et de démonstration, par le biais des fonds régionaux européens. Enfin, les mesures nationales sont complétées par des plans visant à renforcer la coopération avec des partenaires extérieurs à l'Union sur des questions telles que la réglementation et les infrastructures.

Bien que ces mesures soient conçues au niveau européen, leur mise en œuvre requiert la participation active des législateurs et des acteurs privés dans tous les États membres. Le graphique 3 illustre les relations entre les mesures prises au niveau européen, et celles prises au niveau national. Cela concerne les quatre piliers de la stratégie de l'Union. L'ampleur réelle du soutien à l'investissement dans les projets hydroélectriques dépendra de la volonté des États membres de consacrer une partie de leur budget européen à *InvestEU*, et de la mise en œuvre de leurs propres instruments financiers au

<sup>25</sup> Voir à ce sujet : Reichert, G., Menner, M. (2020). Stratégie de l'UE en matière d'hydrogène. [Analyse du cep 14/2020](#).

niveau national. L'efficacité des mesures de soutien réglementaire à l'échelle de l'Union, pour le déploiement de la production d'hydrogène, suppose la transposition en temps utile des directives européennes correspondantes au niveau national. Le développement d'une infrastructure de l'hydrogène à l'échelle européenne nécessite une priorité suffisante dans la planification nationale des infrastructures. Le succès des projets pilotes dépend de la force des réseaux entre les acteurs publics et privés dans les États membres et de la volonté de coopération transfrontalière.

**Graphique 3 : Structure de la stratégie européenne pour l'hydrogène**



Source : Wolf & Zander (2021)<sup>26</sup>

## 4.2 Le Rôle de l'Hydrogène dans les Propositions de Loi « Fit for 55 »

Le vaste paquet de propositions législatives en matière de politique climatique de la Commission européenne de juillet 2021 (« Fit-for-55 ») donne des impulsions à différents endroits pour le développement de la production d'hydrogène vert. Cela commence par des objectifs fondamentalement plus stricts pour la politique climatique, exprimés par exemple par une baisse plus raide du plafond dans l'échange de quotas d'émission (**directive sur l'échange de quotas d'émission**), des objectifs plus stricts en matière de CO<sub>2</sub> pour les pays dans les secteurs non-ETS (**règlement sur le partage de la charge**), ainsi que des objectifs plus stricts pour l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie au niveau sectoriel (**directive sur les énergies renouvelables**). Le projet d'amendement de cette dernière directive définit en même temps des directives concrètes pour la prise en compte dans les objectifs SER (système d'énergie renouvelable). L'énergie produite à partir de combustibles renouvelables d'origine non biogénique, ne doit pouvoir être prise en compte dans les objectifs nationaux en matière d'énergies renouvelables, que si les économies de gaz à effet de serre ainsi réalisées atteignent au moins 70% [art. 29a, paragraphe 1]. Parallèlement, le projet précise que les combustibles produits à l'aide d'électricité verte ne seront reconnus comme renouvelables

<sup>26</sup> Wolf, A., Zander, N. (2021). L'hydrogène vert en Europe : les stratégies répondent-elles aux attentes ? *Intereconomics*, 56(6), 316-323.

que sous certaines conditions. Les critères qui seront prochainement développés dans un acte délégué seront étendus du secteur des transports à tous les domaines d'application. En l'état actuel des connaissances, il s'agit notamment d'exigences strictes concernant l'additionnalité de l'électricité SER utilisée par les électrolyseurs (en grande partie limitée aux nouvelles installations), ainsi que la proximité temporelle et spatiale de la production d'électricité et de son utilisation dans l'électrolyse.<sup>27</sup>

**Le projet de règlement relatif au déploiement d'une infrastructure pour carburants alternatifs** définit des objectifs spécifiques pour le développement d'infrastructures côté utilisateur dans le secteur des transports. Selon ce projet, les États membres doivent veiller, d'ici 2030, à ce qu'un réseau de stations-service d'hydrogène accessibles au public soit mis en place, avec une distance maximale de 150 km entre les stations-service et au moins une station-service à chaque nœud urbain [article 6, paragraphe 1]. La possibilité de paiement électronique doit alors être garantie [art. 7]. Pour le secteur de l'aviation, **le projet de règlement ReFuelEU Aviation** prévoit de promouvoir explicitement l'utilisation de carburants synthétiques. Les fournisseurs de carburant seraient donc tenus d'incorporer un pourcentage minimum de carburant synthétique dans chaque carburant d'aviation proposé dans un aéroport européen [article 4]. Parallèlement, les aéroports seraient tenus de mettre à disposition l'infrastructure nécessaire pour le ravitaillement en carburant synthétique [article 6]. Le montant de la part minimale doit toutefois encore être défini dans la suite de la procédure.

### 4.3 Le Paquet Législatif de l'Union sur l'Hydrogène et le Gaz Décarbonisé

En décembre 2021, la Commission européenne a proposé un paquet spécifique pour la réglementation des futurs marchés des gaz renouvelables.<sup>28</sup> Les propositions, qui consistent en une directive et un règlement, doivent contribuer à la décarbonisation du secteur du gaz. Ils doivent aussi concourir à la mise en place d'une infrastructure pour les gaz alternatifs, qui comprend explicitement les solutions à base d'hydrogène en plus des biocarburants. La Commission considère ce paquet comme un complément aux propositions « Fit for 55 » dans le domaine des énergies renouvelables et de l'échange de quotas d'émission.

**La proposition de règlement concernant les marchés intérieurs des gaz, du gaz naturel renouvelables et de l'hydrogène** est une refonte du règlement (CE) n° 715/2009 concernant les conditions d'accès aux réseaux de transport de gaz naturel. L'objectif principal est de créer un marché intérieur de l'hydrogène dans l'Union, analogue au marché existant pour le gaz naturel, qui permette des échanges transfrontaliers équitables et tienne ainsi compte des différentes conditions naturelles des États membres pour la production d'hydrogène vert. Un réseau européen des gestionnaires de réseaux d'hydrogène (European Network of Network Operators for Hydrogen ou **ENNOH**) doit être créé afin de promouvoir la planification et l'exploitation transfrontalières des infrastructures de transport [article 40]. Ses tâches consisteront notamment à établir des plans décennaux de développement du réseau et des rapports de suivi sur la qualité de l'hydrogène, ainsi qu'à promouvoir la coopération avec les gestionnaires de réseaux de gaz [art. 42]. Une série d'avantages est prévue afin de promouvoir le transport de gaz renouvelables et à faible teneur en CO<sub>2</sub>. Ainsi, en ce qui concerne les tarifs de réseau, des réductions tarifaires de 75% seront appliquées aux points d'entrée des installations de production,

<sup>27</sup> Énergies renouvelables Hambourg (2021). [Économie verte de l'hydrogène - Appel à l'UE pour un lancement réussi sur le marché](#) ! Papier de position - état au 04.11.2021-

<sup>28</sup> Commission européenne (2021). [Paquet législatif sur l'hydrogène et le gaz décarbonisé](#).

tout comme aux points d'entrée et de sortie des installations de stockage. En outre, les tarifs transfrontaliers pour le commerce de ces gaz seront supprimés [article 16]. De plus, les gestionnaires de réseau de transport seront tenus de garantir des capacités obligatoires pour l'injection de gaz renouvelables et de gaz à faible teneur en CO<sub>2</sub> [art. 18]. D'autre part, ils devront accepter dès 2025, aux points de passage des réseaux entre les États membres, l'admission de gaz contenant jusqu'à 5% d'hydrogène [art. 20].

La **directive complémentaire concernant les règles communes pour les marchés intérieurs des gaz renouvelables, du gaz naturel et de l'hydrogène**, une révision de la directive 2009/73/CE concernant des règles communes pour le marché intérieur du gaz naturel, met l'accent sur les questions de concurrence. Elle prévoit une obligation de certification pour les gaz renouvelables [article 8]. Pour les futurs réseaux d'hydrogène mis en place, les États membres doivent développer un système de régulation garantissant un accès non discriminatoire pour les tiers, ainsi que des tarifs calculés de manière transparente [art. 31]. Pour l'exploitation des réseaux d'hydrogène, une dissociation horizontale est prévue en plus de la dissociation verticale habituelle : Les gestionnaires de réseau faisant partie d'une entreprise qui exploite également des réseaux d'électricité ou de gaz naturel doivent être indépendants au moins sur le plan de la forme juridique [art. 63]. Cela exige également une organisation indépendante, ainsi qu'une dotation en capital propre. Le subventionnement croisé du développement des réseaux d'hydrogène par le transport de gaz est donc strictement limité. Cela pourrait entraîner à l'avenir des structures administratives parallèles coûteuses.

## 5 Mesures Possibles pour Accélérer le Démarrage du Marché

Dans le contexte de la crise actuelle, la question se pose de savoir quelles mesures complémentaires pourraient accélérer le passage à une économie verte de l'hydrogène. La coordination européenne est essentielle à cet égard, mais il est également nécessaire d'agir au niveau national et régional.

### 5.1 Mesures visant à Renforcer la Production

- **Facilités administratives pour le développement de l'énergie éolienne** : un approvisionnement stable en quantités suffisantes d'électricité SER est une condition préalable à une utilisation suffisante des capacités d'électrolyse mises en place, et donc à une meilleure rentabilité grâce à la dégressivité des coûts. Compte tenu de la situation de concurrence avec l'utilisation directe de l'électricité, cela suppose des trajectoires cibles encore plus ambitieuses pour le développement des capacités de production renouvelable, en particulier pour l'énergie éolienne. Outre l'augmentation des capacités sur les sites existants, l'accent devrait également être mis sur les régions à fort potentiel éolien, peu développées jusqu'à présent en termes de production, afin de renforcer la division européenne du travail dans la production d'électricité et de réduire la dépendance vis-à-vis des fluctuations locales de la production. Les longues procédures de planification et d'autorisation constituent toujours un obstacle pratique à l'augmentation des capacités. Il s'agit ici d'exploiter les potentiels d'allègement, par exemple en raccourcissant les processus de contrôle par des normes et des présomptions de règles et en réduisant les instances de recours.
- **Exigences plus souples en matière d'achat d'électricité** : les projets actuels de la Commission européenne concernant l'éligibilité de l'hydrogène vert aux objectifs sectoriels (voir section 4.2) pourraient s'avérer être un obstacle majeur à la création de capacités d'électrolyse en

Europe, compte tenu de la lenteur du développement des SER. Un lien avec l'achat d'électricité à partir de capacités SER, créées en même temps que les électrolyseurs, entraînerait une incertitude générale en matière de planification et, dans de nombreux cas, un retard dans la réalisation. La corrélation temporelle étroite exigée entre la production et l'utilisation de l'électricité pourrait, du côté des électrolyseurs, grever davantage la production en raison des adaptations de capacité nécessaires. Il convient ici de tenir compte de la nature de la technologie « Power-to-Gas » en accordant une plus grande flexibilité aux installations mises en place, du moins pendant la phase de démarrage du marché.

- **Politique d'implantation intelligente des électrolyseurs** : la grande importance des économies d'échelle dans la production d'hydrogène vert plaide en faveur du regroupement des capacités d'électrolyse plutôt sur des sites disposant d'importantes capacités régionales d'électricité renouvelable, afin de pouvoir garantir un nombre suffisant d'heures à pleine charge. La distance à parcourir jusqu'aux centres industriels européens, c'est-à-dire les futurs gros consommateurs d'hydrogène, peut alors être comblée en grande partie par le transport dans des gazoducs réaménagés et un nouveau réseau d'hydrogène. Cela pourrait non seulement constituer la base d'une nouvelle forme de division du travail industriel en Europe, mais aussi s'avérer judicieux du point de vue de la politique de cohésion, car les régions productrices et consommatrices pourraient ainsi participer de la même manière, sur le plan économique, aux chaînes de création de valeur qui se mettent en place.
- **Développement d'une stratégie d'importation durable au sein de l'Union** : l'exploitation des potentiels de production internes à l'Union devrait être une priorité dans le cadre du développement des marchés de l'hydrogène. Toutefois, compte tenu des limites naturelles de capacité de l'électricité éolienne et solaire en Europe, une économie de l'hydrogène diversifiée nécessitera à l'avenir des importations complémentaires en provenance de régions extra-européennes. Une approche coordonnée offre à l'Union la possibilité d'exercer un pouvoir sur le marché et de définir des normes pour une future économie mondiale de l'hydrogène. Les pays dont les coûts de production d'électricité sont globalement avantageux sont des partenaires naturels. Mais d'autres critères comptent également pour l'évaluation de la rentabilité à long terme, comme la proximité géographique (montant des coûts de transport) ainsi que la stabilité politique et les questions de durabilité dans la région de production.

## 5.2 Mesures visant à Renforcer l'Utilisation et le Transport

- **Réduction des risques d'investissement grâce aux contrats carbone pour la différence** : le passage à l'utilisation de l'hydrogène vert dans le secteur industriel nécessite également des investissements importants et à long terme de la part de l'utilisateur. Compte tenu des adaptations réglementaires en cours et des prix fluctuants du CO<sub>2</sub>, l'incertitude de la planification constitue un obstacle majeur. Un prix fixe du CO<sub>2</sub> garanti par l'État sur une base contractuelle permettrait aux investisseurs de mieux calculer les économies de coûts futurs résultant de la prévention des émissions de CO<sub>2</sub> en tant qu'élément essentiel du retour sur investissement. L'État compense sur une période convenue la différence entre le prix fixé par contrat et le prix du marché en vigueur sur le marché des quotas d'émission. Compte tenu des hausses de prix attendues à long terme sur le marché des certificats, la durée du contrat peut être limitée dans le temps, ce qui permet de minimiser les risques budgétaires de l'État.

- **Mise en place cohérente d'une infrastructure transnationale pour l'hydrogène** : afin de maximiser les effets sur la croissance et l'emploi d'une économie européenne de l'hydrogène, il convient d'exploiter les potentiels offerts par une nouvelle division européenne du travail, tant en ce qui concerne la production que l'utilisation de l'hydrogène obtenu. La possibilité d'un transport transfrontalier sur de grandes distances est une condition préalable. La mise en place rapide d'une infrastructure de transport non discriminatoire à l'échelle européenne devrait donc être une priorité absolue dans la conception d'un futur marché intérieur de l'hydrogène. Afin d'accélérer les processus de planification et d'autorisation, mais aussi de réduire les coûts de construction, il convient d'autoriser la conversion des réseaux de gaz existants lorsque cela est techniquement possible. Les obstacles financiers liés aux exigences de dissociation devraient être réduits au minimum dans l'intérêt de coûts de transport abordables pendant la phase de lancement, sans pour autant négliger le risque de concentration des fournisseurs.

## 6 Conclusion

Il est apparu clairement que l'hydrogène vert peut jouer un rôle important dans la transformation du système énergétique européen grâce à sa polyvalence, ainsi qu'à sa complémentarité avec la production d'électricité à partir de sources renouvelables. Toutefois, les contraintes techniques et la concurrence avec des technologies plus efficaces sur le plan énergétique et neutres sur le plan climatique limitent sa fonction d'énergie à tout faire. Pour l'avenir, il faudra concentrer judicieusement son utilisation dans des domaines d'application où les avantages spécifiques de l'hydrogène vert seront mis en valeur. Il s'agit notamment de son utilisation comme matière première, comme agent réducteur et comme carburant dans les domaines où les technologies de batteries ne sont pas appropriées. Sur le plan sectoriel, l'utilisation se concentrera donc probablement sur le secteur industriel, sur le stockage d'énergie à long terme, et sur certains segments du secteur des transports (transport aérien et maritime, transport de marchandises à longue distance).

Pour que le marché soit durable, il convient de suivre une feuille de route claire en ce qui concerne l'ordre chronologique de la promotion. Dans la phase de lancement actuelle, la priorité est d'augmenter rapidement les capacités d'électrolyse. Pour ce faire, il est nécessaire de développer l'énergie éolienne à proximité des électrolyseurs et de mettre en place des capacités de pipeline pour le transport à longue distance. L'utilisation ou la transformation des gazoducs en direction des centres de consommation européens actuels peut constituer un bon point de départ. Au début, les domaines d'application commerciaux envisageables sont surtout les applications dans lesquelles l'utilisation d'hydrogène est déjà immanente à la technologie (par ex. production d'engrais, de méthanol) ou dans lesquelles une conversion (dans certaines limites) peut se faire sans coûts d'adaptation élevés (par ex. en tant que mélange dans des chaudières à condensation au gaz). La dégressivité des coûts fixes obtenue et les valeurs empiriques acquises peuvent ensuite être utilisées à moyen terme pour diversifier les champs d'application. En revanche, la mise en place d'une économie d'importation doit être considérée comme une tâche à long terme, qui gagnera en pertinence lorsque les capacités de production d'énergie éolienne à l'échelle européenne seront largement épuisées. Il convient toutefois de poser dès aujourd'hui les jalons nécessaires sous la forme d'une stratégie d'importation européenne durable.

D'un point de vue économique, la création d'un marché de l'hydrogène à l'échelle de l'Union offre de nouveaux potentiels de division du travail intra-européenne en termes de production et de consommation. Cela pourrait non seulement faire avancer l'intégration du système énergétique européen, mais aussi contribuer à augmenter l'efficacité énergétique et la compétitivité du secteur industriel européen. Dans cette optique, la Commission européenne a déjà présenté quelques propositions visant à supprimer les obstacles réglementaires existants. Cette démarche repose sur la conscience que la combinaison de la dégression des coûts fixes dans la production, de l'incertitude de la planification des investissements et de la problématique de l'œuf et de la poule dans le développement des infrastructures nécessite des impulsions de la part de l'État. Un suivi continu de la réglementation ainsi que des mesures complémentaires au niveau national et local seront nécessaires pour assurer à l'hydrogène vert un terrain d'égalité dans la concurrence entre les sources d'énergie. La question de savoir dans quelle mesure l'hydrogène peut réellement devenir le « green freedom gas » dans le cadre d'une telle concurrence loyale entre les technologies est alors l'objet d'une décision entrepreneuriale et non politique.

**Auteur :**

Dr. André Wolf

[wolf@cep.eu](mailto:wolf@cep.eu)**Centre de politique européenne** FREIBURG | BERLIN

Kaiser-Joseph-Straße 266 | D-79098 Fribourg

Schiffbauerdamm 40 Salle 4315 | D-10117 Berlin

Tél. + 49 761 38693-0

Le **Centrum für Europäische Politik** FREIBURG | BERLIN,Le **Centre de Politique Européenne** PARIS, etLe **Centro Politiche Europee** ROMA, formentLe **Centres for European Policy Network** FREIBURG | BERLIN | PARIS | ROMA.

Le Centre de Politique Européenne, reconnu d'utilité publique, analyse et évalue la politique de l'Union européenne indépendamment des intérêts particuliers et partisans, dans une orientation fondamentalement favorable à l'intégration et sur la base des principes réglementaires d'un ordre libéral et d'une économie de marché.