



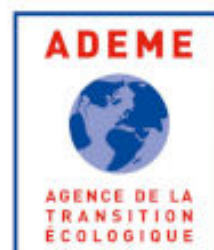
**Territoires communautaires –
Alliance Inter-métropolitaine Loire-Bretagne**

Note de synthèse – Analyse comparative pour une production locale d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Novembre 2023

www.aecenergie.fr

18, rue de la Pépinière – 75008 PARIS
+33(0)1 44 70 78 10
contact@aecenergie.fr



Décarbonation de l'hydrogène

Le dihydrogène H_2 , plus communément appelé hydrogène, est un vecteur énergétique et non une source d'énergie primaire. En effet, cette molécule est très peu abondante sur terre et il est donc nécessaire de la produire à partir de la transformation d'une source d'énergie primaire qui est naturellement disponible sur terre et donc directement utilisable. L'hydrogène peut être extrait à partir de matières premières selon différents procédés :

- A partir de ressources fossiles :

- Par vaporeformage du gaz naturel (40% de la production actuelle) ;
- Par oxydation d'hydrocarbures (40% de la production actuelle) ;
- Par gazéification du charbon (15% de la production actuelle).

- A partir de ressources renouvelables :

- Par électrolyse de l'eau ;
- Par pyrogazéification de la biomasse (bois) ;
- Par vaporeformage de biogaz (issu de la biomasse).

Ainsi, si l'utilisation d'hydrogène n'émet pas en tant que telle de gaz à effet de serre (GES), sa production - reposant aujourd'hui essentiellement sur la transformation d'hydrocarbures - est fortement émettrice de GES. **L'intérêt environnemental de son usage dépend de son mode de production.**

En France, les orientations publiques définies dans la loi Energie-Climat donnent une priorité à la **décarbonation de l'hydrogène** actuellement utilisé dans l'industrie. Il est donc nécessaire **de développer la production d'hydrogène renouvelable et bas carbone**. Ces deux appellations ont été définies réglementairement au niveau national et européen.

Hydrogène renouvelable

L'hydrogène est renouvelable s'il est produit par électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité issue de sources renouvelables ou toute autre technologie utilisant ces sources sans conflit d'usage, et respecte un **seuil de réduction d'émissions de gaz à effet de serre de 70 %**. Compte tenu du facteur d'émission de l'hydrogène carboné, dit « gris », de 11,1 kgCO₂eq/kgH₂, le seuil pour l'hydrogène renouvelable est donc fixé à environ 3,3 kgCO₂eq/kgH₂. L'hydrogène renouvelable peut donc par exemple être produit par :

- Electrolyse raccordée à un parc éolien ou photovoltaïque en autoconsommation ;
- Electrolyse raccordée au réseau électrique national avec accord d'achat d'électricité renouvelable.

L'électrolyse de l'eau apparaît comme la technologie privilégiée en France par rapport à la pyrogazéification ou le vaporeformage de biogaz compte tenu des gisements limités de biomasse destinés en priorité à d'autres usages (thermique notamment), comme préconisé dans la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC).

Hydrogène bas carbone

L'hydrogène est bas carbone si son contenu énergétique est dérivé de sources non-renouvelables et respecte un **seuil de réduction d'émissions de gaz à effet de serre de 70 %**, soit 3,3 kgCO₂/kgH₂. Par exemple :

- Electrolyse raccordée au réseau électrique national ;
- Vaporeformage de gaz naturel avec captage et stockage du CO₂.

La SNBC préconise un recours limité aux technologies de capture et de stockage de CO₂. La production d'H₂ par électrolyse de l'eau à partir d'électricité décarbonée est donc bien la piste à privilégier.

Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau apparaît ainsi comme la principale voie de développement de l'hydrogène renouvelable et bas carbone en France. Cette technologie consiste à « casser » les molécules d'eau (H₂O) afin d'en extraire le dihydrogène (H₂) à l'aide d'un courant électrique (via l'électrolyseur). Elle est néanmoins **très consommatrice d'électricité**. Avec les techniques actuelles, il faut 56 kWh d'électricité pour produire 1kg d'H₂. **L'enjeu réside donc dans le choix de la source d'électricité couplée au système de production d'hydrogène.**

Modes de production locale d'H₂ par électrolyse

Différents **modes de fonctionnement des électrolyseurs** peuvent être envisagés. L'électrolyseur peut être raccordé au réseau électrique national ou couplé avec un système de production d'électricité renouvelable locale (parc éolien, centrale photovoltaïque, installation hydraulique, ...). Ainsi, pour atteindre un même objectif en matière de volume de production d'H₂, le **dimensionnement des électrolyseurs**, les **enjeux de stockage** de l'hydrogène, les **impacts environnementaux** et **économiques** peuvent être très différents en fonction du mode opératoire des électrolyseurs.

Dans la suite de cette note, les modes de fonctionnement suivant seront comparés :

- Production d'hydrogène bas carbone à partir d'électrolyseurs **raccordés au réseau électrique national** ;
- Production d'hydrogène renouvelable à partir d'électrolyseurs soit **raccordé au réseau avec un contrat d'achat d'électricité renouvelable**, soit **couplés avec un système de production d'électricité renouvelable locale en autoconsommation**. Pour ce dernier mode, plusieurs cas sont distingués : couplage avec un parc éolien, avec une centrale solaire photovoltaïque au sol et avec une installation hydroélectrique.

Pour chaque mode de fonctionnement, les analyses présentées se basent sur un volume de production d'H₂ permettant de couvrir les besoins estimés sur le territoire de l'AILB en 2030 pour le scénario mixte, soit **4 200 tonnes d'H₂**.

L'ADEME estime que l'efficacité énergétique des électrolyseurs en 2030 s'élèvera à 51 kWhé/kgH₂. A cette échéance, **214 GWh d'électricité** seront donc nécessaires à la production des 4 200 tonnes d'hydrogène.

Dimensionnements des électrolyseurs

Pour atteindre le même volume de production d'hydrogène (renouvelable ou bas carbone), le mode de fonctionnement des électrolyseurs implique un dimensionnement très différent de ces installations. En effet, la puissance d'électrolyseurs à installer pour répondre au besoin dépend du **facteur de charge des électrolyseurs**. Le facteur de charge s'exprime en pourcentage et correspond au nombre d'heure durant lequel l'électrolyseur est utilisé à sa puissance nominale rapporté au nombre d'heure total dans une année. Il **dépend de l'approvisionnement de l'électrolyseur en électricité** :

- Un électrolyseur couplé avec un système de production d'électricité renouvelable en autoconsommation ne pourra fonctionner que sur les périodes de production de l'installation renouvelable (période d'ensoleillement pour centrale photovoltaïque par exemple), et donc de manière intermittente sur un nombre limité d'heure sur l'année. Dans ce cas, le facteur de charge de l'électrolyseur correspond au facteur de charge du système de production d'électricité renouvelable. Le surplus d'électricité produite est vendu sur le réseau.
- Un électrolyseur raccordé au réseau électrique national peut fonctionner de manière continue car il bénéficie d'un approvisionnement en électricité à tout instant. Dans la pratique, le facteur de charge de l'électrolyseur n'atteint pas 100% car des temps de maintenance, de chargement et déchargement du combustible sont nécessaires au cours de l'année. Par ailleurs, dans le but de fournir des services de flexibilité au réseau électrique, l'électrolyseur peut s'effacer lors des situations de tension sur le réseau.

Source électrique	Facteur de charge
Réseau national – Mix France	90%
Réseau – Mix EnR	90%
Photovoltaïque	14%
Eolien onshore	25%
Eolien offshore	40%
Hydraulique	25%

Tableau 1 : Facteur de charge de l'électrolyseur en fonction de la source d'électricité (source : RTE)

Ainsi, **plus le facteur de charge des électrolyseurs est faible, plus la puissance totale d'électrolyseur à installer doit être importante** afin de produire le volume requis d'H₂ sur un temps de fonctionnement plus limité. De la même manière, la capacité installée de production d'électricité renouvelable doit être surdimensionnée afin de fournir une quantité d'électricité suffisante sur les périodes de production. Le graphique ci-dessous représente la capacité d'électrolyseur nécessaire à la production d'H₂ pour le scénario mixte en 2030 selon la source d'approvisionnement en électricité :

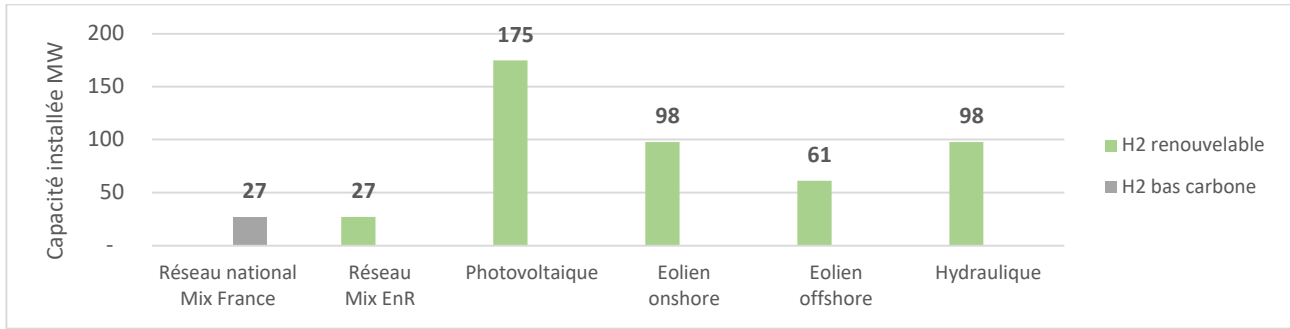


Figure 1 : Dimensionnement du parc d'électrolyseur (en MW) nécessaire au scénario mixte en 2030 en fonction de la source d'électricité

En pratique, il est également possible de recourir à un mode de fonctionnement intermédiaire : l'électrolyseur peut être couplé avec un système de production d'électricité renouvelable et renforcé par le réseau. Lorsque la centrale d'énergie renouvelable ne peut pas produire d'électricité en raison de facteurs tels que la faible vitesse du vent ou un ensoleillement limité, l'électricité du réseau est sollicitée pour compenser le déficit de production d'électricité. Cela permet d'assurer un fonctionnement continu de l'électrolyseur.

Enjeux de stockage

Les contraintes industrielles et en particulier le besoin de continuité d'approvisionnement en H₂ implique des enjeux de stockage de l'hydrogène produit dans le cas où le fonctionnement des électrolyseurs n'est pas continu, et ce, de manière d'autant plus importante que le facteur de charge est faible. Un parc d'électrolyseur qui serait uniquement couplé avec des systèmes de production d'électricité renouvelable (dans le cas d'une production d'hydrogène renouvelable) doit alors être accompagné d'une solution de stockage. Ce paramètre est à intégrer à l'analyse de la faisabilité technique et économique du système de production d'hydrogène.

Impacts environnementaux

Les impacts en matière d'émissions GES peuvent être différenciés selon le mode de fonctionnement de l'électrolyseur. Ils sont directement liés au facteur d'émission de GES de la production d'électricité approvisionnant l'électrolyseur.

Les producteurs pourront être incités à produire de l'H₂ à plus faible émissions GES, via des normes, des signaux économiques (taxes, subventions, ...) ou encore des enjeux de marketing.

Le graphique ci-dessous représente les émissions de GES induites par la production d'H₂ pour le scénario mixte en 2030 selon la source d'approvisionnement en électricité :

Source électrique	Facteur d'émission (kg CO ₂ eq/kg H ₂)
Réseau national - Mix France	2,77
Réseau - Mix EnR	1,59
Photovoltaïque	2,58
Eolien	0,7
Hydraulique	0,45

Tableau 2 : Facteur d'émissions en kg CO₂eq/kg H₂ pour la production d'H₂ sur site par électrolyse de l'eau selon la source d'électricité (source : base carbone de l'ADEME)

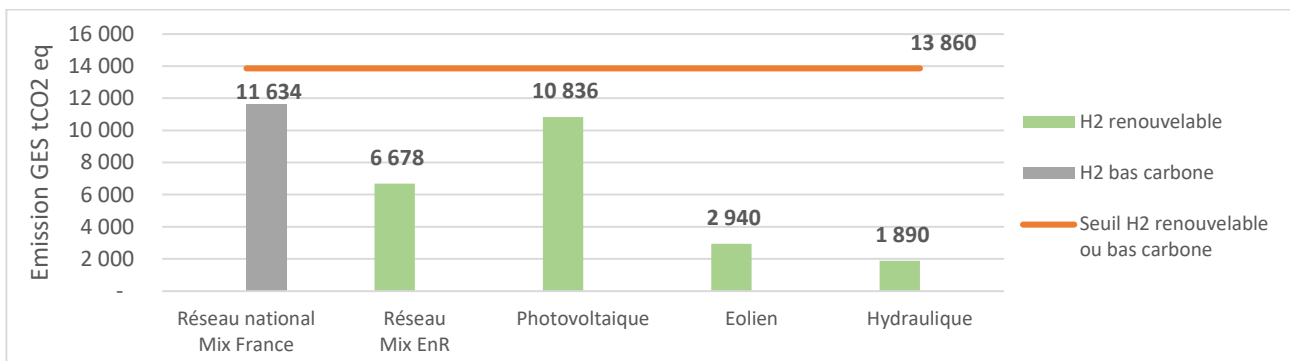


Figure 2 : Emissions de GES (en tCO₂eq) liées à la production d'H₂ pour le scénario mixte en 2030 selon la source d'électricité

Impacts économiques

Pour un même volume produit et à efficacité et durée de vie de l'électrolyseur constant, le prix final de l'H₂ produit dépend de plusieurs variables, notamment :

- Les **coûts du système de production** estimés de 87 à 100 €/kW/an (pour une durée longue d'utilisation, les cellules sont remplacées plus fréquemment) à horizon 2035 d'après RTE. Ils dépendent du dimensionnement du système (puissance installée) et donc du facteur de charge de l'installation. Cette estimation prend en compte les CAPEX et OPEX des électrolyseurs et des équipements annexes.
- Le **coût de l'électricité** (voir tableau 3 ci-contre) approvisionnant l'électrolyseur pouvant représenter jusqu'à 85% du prix de production. Ce coût inclut le **prix du CO₂**, sous-estimé dans ces études par rapport à l'estimation de l'IEA en 2030 s'élevant à 90€/tCO₂eq et qui pourrait encore augmenter l'écart entre ces prix.
- Le **coût lié au besoin de stockage** estimé à 15 €/MWh déstocké, selon RTE.

Source électrique	Coûts de l'électricité (€/MWh)
Réseau national - Mix France	88**
Photovoltaïque	41*
Eolien onshore	45*
Eolien offshore	72*
Hydraulique	75*

Tableau 3 : Coûts de l'électricité estimés en 2030 en €/MWh (source : *ADEME et **RTE)

Le graphique ci-dessous représente les différents coûts évoqués (hors coûts liés au stockage dont le volume n'a pas été estimé ici) pour la production d'H₂ pour le scénario mixte en 2030 selon la source d'approvisionnement en électricité :

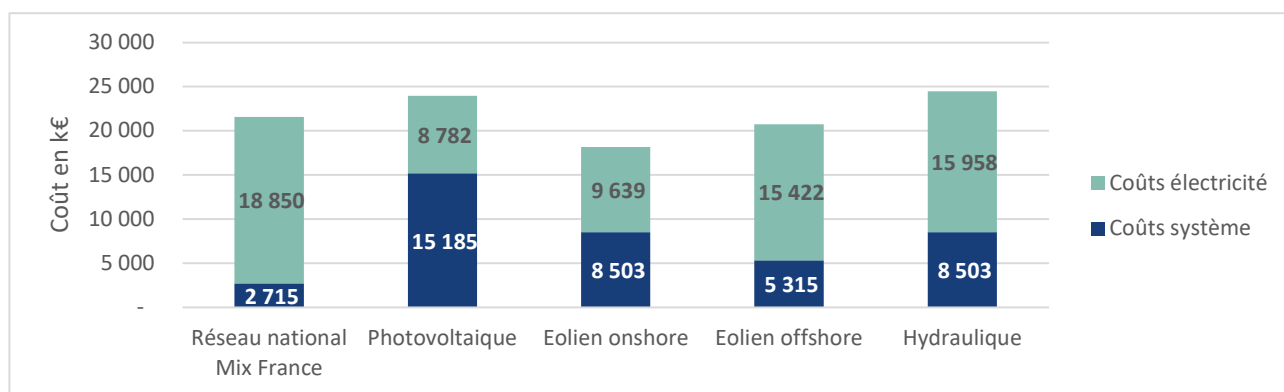


Figure 3 : Coûts estimés (en k€) pour la production d'H₂ pour le scénario mixte en 2030 selon la source d'électricité

Synthèse

Hydrogène renouvelable

- + Coût de l'électricité intéressant et contrôlé
- + Très forte réduction des émissions de GES
- Durée de fonction faible induisant un surdimensionnement des électrolyseurs, et donc des coûts d'investissement élevée amorti sur des courtes durées
- Une production intermittente pouvant impliquer des besoins de stockages afin d'assurer une continuité d'approvisionnement dans le cas d'un usage contraint

Hydrogène bas carbone

- + Forte réduction des émissions GES
- + Fonctionnement de l'électrolyseur en continu permettant un bon amortissement des coûts fixes de l'électrolyse et une bonne continuité de production d'hydrogène sans recours à une solution de stockage
- Coût d'approvisionnement en électricité qui reste élevé sur certaines périodes, et sensible au prix de marché de l'électricité donc à l'évolution

Bibliographie

ADEME, *Base carbone*

ADEME, *Développer l'hydrogène renouvelable et bas carbone*, 2021

RTE, *La transition vers un hydrogène bas carbone*, 2020

RTE, *Bilan prévisionnel édition 2023*, 2023

ADEME, *Coûts des énergies renouvelables et de récupération en France*, 2020

CEREME, *Etude des coûts complets de l'hydrogène*, 2023