



ÉTAT DES LIEUX DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE À LA RÉUNION



Sommaire

1	Préambule	2
2	Introduction	3
2.1	De la découverte de l'hydrogène à son utilisation industrielle aujourd'hui	3
2.2	L'hydrogène vert dans le contexte de la transition énergétique	3
2.3	Un intérêt croissant dans le monde	4
3	Quelques données techniques sur l'hydrogène	6
3.1	Méthode de production de l'hydrogène et couleurs associées	6
3.2	Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau	6
3.3	Coût de production de l'hydrogène vert	8
3.4	L'hydrogène comme source d'énergie	8
4	Production et usages potentiels de l'hydrogène vert à La Réunion	10
4.1	Quel intérêt de l'hydrogène par rapport aux objectifs énergétiques du territoire? . .	10
4.2	Potentiels de production d'hydrogène vert à La Réunion	11
4.3	Usages de l'hydrogène comme matière première pour l'industrie	12
4.4	Usage de l'hydrogène comme carburant pour la mobilité	13
4.4.1	Le véhicule hydrogène en complément du véhicule électrique à batteries pour le transport routier	13
4.4.2	L'hydrogène pour décarboner les usages non électrifiables dans le secteur maritime et aérien	15
4.5	Usage de l'hydrogène comme solution de stockage pour la production d'électricité .	17
5	Quelle dynamique hydrogène sur le territoire réunionnais ?	19
5.1	Projets identifiés	19
5.2	Acteurs rencontrés	20
5.3	Guichets de financements des projets hydrogène	21
5.4	Formation	23
6	Conclusion	24
A	Annexes	25
A.1	Quelques chiffres sur l'hydrogène	25
A.2	Synthèses des réponses diffusées aux membres de l'ADIR "Avez-vous pensez à l'hydrogène pour décarboner vos activités?"	26
A.3	Quel impact sur le réchauffement climatique des fuites d'hydrogène?	28

1 Préambule

L'hydrogène décarboné est appelé à être l'un des principaux vecteurs énergétiques permettant, en substitution des énergies fossiles, la transition énergétique. L'hydrogène peut donc jouer un rôle majeur dans l'objectif d'autonomie énergétique des zones non interconnectées, notamment en raison des services de flexibilités qu'il peut rendre au système énergétique, ainsi que pour la décarbonation de la mobilité.

Dans ce contexte, la Région Réunion souhaite définir, en concertation avec les acteurs locaux, un Plan hydrogène qui intégrera une stratégie à moyen et long terme pour le développement de la filière.

Pour ce faire, la Région Réunion a tout d'abord mandaté la Fédération de Recherche hydrogène (FRH2) du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) pour une mission d'expertise qui a permis de rencontrer les principaux acteurs locaux intéressés par l'hydrogène. La note stratégique réalisée par la FRH2, diffusée aux acteurs réunionnais, émet un certain nombre de recommandations pour appuyer le développement de la filière, et notamment la nécessité de désigner un référent unique hydrogène régional dont le rôle sera de favoriser les synergies à l'échelle du territoire.

Suite au retour positif de la FRH2 sur la dynamique hydrogène locale, la Région Réunion a confié en février 2023 à la SPL Horizon Réunion, l'élaboration d'une feuille de route pour le déploiement de l'hydrogène sur le territoire, en collaboration avec les acteurs locaux, ainsi que l'animation autour de l'opération.

Ainsi, le présent rapport constitue le livrable de la première phase "Etat des lieux" de la mission confiée à la SPL Horizon Réunion. Sur la base des données collectées par la FRH2 lors de sa mission en 2022, cet état des lieux permet de dresser un panorama complet de la filière hydrogène : contexte national et international, usages potentiels sur le territoire réunionnais, acteurs locaux susceptibles de déployer des solutions hydrogène, projets en cours d'étude sur le territoire, etc.

2 Introduction

2.1 De la découverte de l'hydrogène à son utilisation industrielle aujourd'hui

L'hydrogène est le plus léger et le plus abondant des éléments de l'univers, constituant environ 75% de la matière observable. À température et pression ambiante, l'hydrogène se présente sous forme de gaz incolore et inodore, le Dihydrogène (H₂).

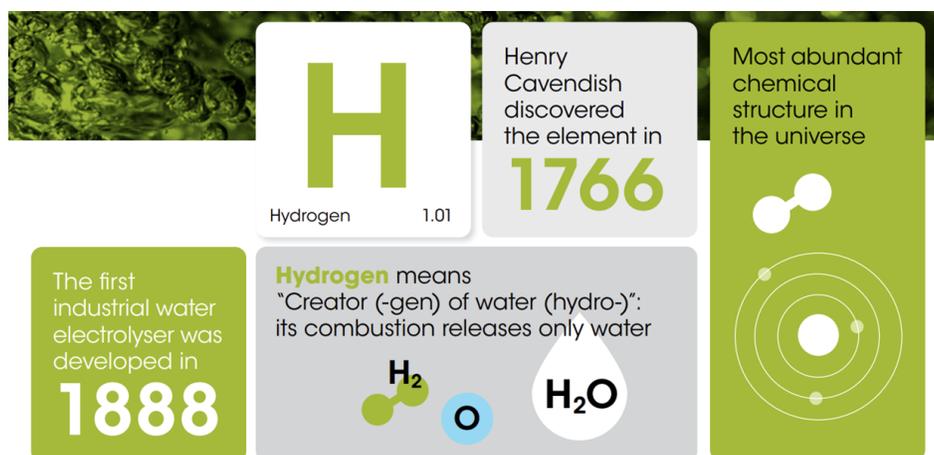


FIGURE 1 – Chiffres et faits sur l'hydrogène [IRENA, 2020]

Découvert en 1766, l'hydrogène alimentait déjà un moteur à combustion il y a plus de 200 ans tandis que les premières démonstrations d'électrolyseurs et de piles à combustibles voyaient le jour au XIXe siècle. Utilisé comme carburant dans le domaine spatial dès 1960, les applications de l'hydrogène se concentrent aujourd'hui majoritairement dans l'industrie. L'hydrogène est utilisé dans la synthèse de produits chimiques, le raffinage du pétrole ou le traitement de métaux. Ces dernières décennies, la **demande mondiale pour l'hydrogène** n'a fait que croître pour atteindre, selon l'International Energy Agency (IEA), **94 millions de tonnes** en 2021, soit cinq fois plus qu'en 1975 [IEA, 2022].

2.2 L'hydrogène vert dans le contexte de la transition énergétique

L'hydrogène apparaît aujourd'hui comme une alternative prometteuse pour la transition énergétique car **son utilisation ne génère pas d'émission directe de CO₂ ou autre polluant**¹. L'hydrogène peut servir de matière première pour la synthèse produits chimiques, de carburant en substitution des combustibles fossiles dans le secteur de la mobilité ou de vecteur énergétique afin de stocker et/ou transporter l'électricité sous forme de gaz. Ainsi, ses applications sont nombreuses pour décarboner les secteurs de l'industrie, des transports, de la production d'électricité et du bâtiment.

Cependant, aujourd'hui, 99% de l'hydrogène est produit à partir de ressources fossiles. En 2021, la production d'hydrogène est responsable de l'émission de près de 900 millions de tonnes de CO₂ [IEA, 2022], soit les émissions combinées du Royaume-Uni et de l'Indonésie. Cela représente environ 10 tonnes de CO₂ pour 1 tonne d'hydrogène produite.

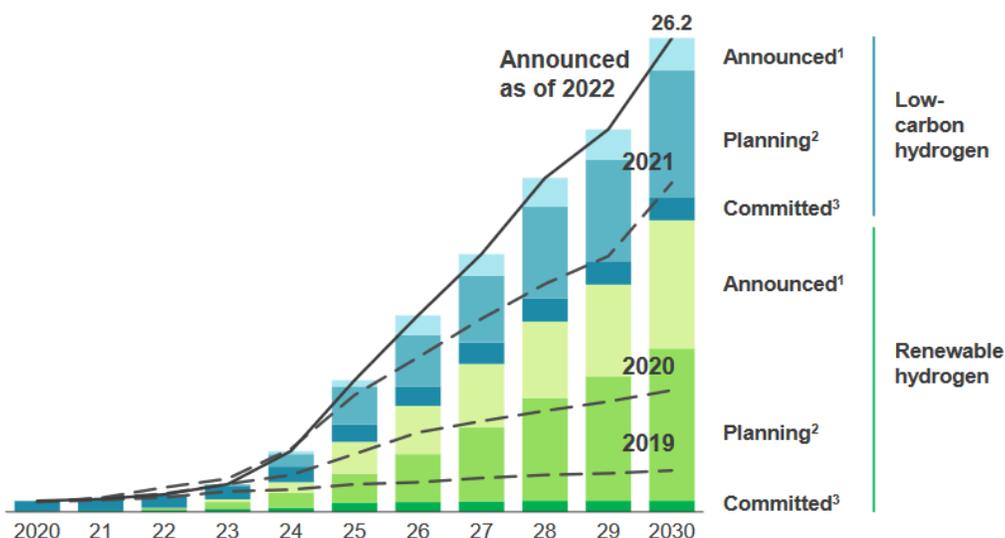
1. Cf Annexe A.3

L'enjeu est donc de décarboner la production d'hydrogène en le produisant à partir de ressources renouvelables.

2.3 Un intérêt croissant dans le monde

Face à l'urgence climatique et le besoin de sécurité énergétique, l'intérêt pour l'hydrogène a considérablement augmenté ces dernières années et les investissements progressent très rapidement. Selon l'AIE, 5,5 GW d'électrolyseurs sont annoncés en 2023, soit 10 fois plus qu'en 2021. Les capacités d'électrolyseurs installées pourraient atteindre 240GW à l'horizon 2030 [IEA, 2021]. Selon l'étude réalisée en 2022 par Mc Kinsey sur demande de Hydrogen Council [Hydrogen Council, 2021], la production d'hydrogène décarboné atteindrait 26 millions de tonnes à l'horizon 2030 (cf Figure 2).

Cumulative production capacity, MT p.a.
As of May 8, 2022



- ¹ Preliminary studies or at press announcement stage
- ² Feasibility study or front-end engineering and design stage
- ³ Final investment decision has been taken, under construction, commissioned or operational

FIGURE 2 – Production d'hydrogène décarboné annoncée à l'Horizon 2030. MT p.a. : Millions de tonnes par an. [Hydrogen Council, 2021]

En 2023, **49 pays ont adopté un document stratégique H2 national** et 40 en préparent un (cf Figure 3). Ils représentent 93% du PIB mondial et 91% des émissions de CO2. Si les pays industriels (Japon, Chine, Corée du Sud) misent sur la production en série d'équipements, les pays bénéficiant de potentiels ENR importants (Chili, Maroc, Australie) se concentrent sur l'export d'hydrogène à destination des pays demandeurs (Allemagne, Belgique). De nombreux accords diplomatiques se mettent en place (autoroute maritime H2 reliant le Portugal et les Pays-Bas) et plusieurs institutions internationales émergent pour favoriser le dialogue international : **Hydrogen Council** (regroupement d'entreprises leaders dans le secteur de l'énergie, du transport, de l'industrie et de l'investissement), **Task Force Hydrogen** (visibilité internationale des acteurs économiques français).

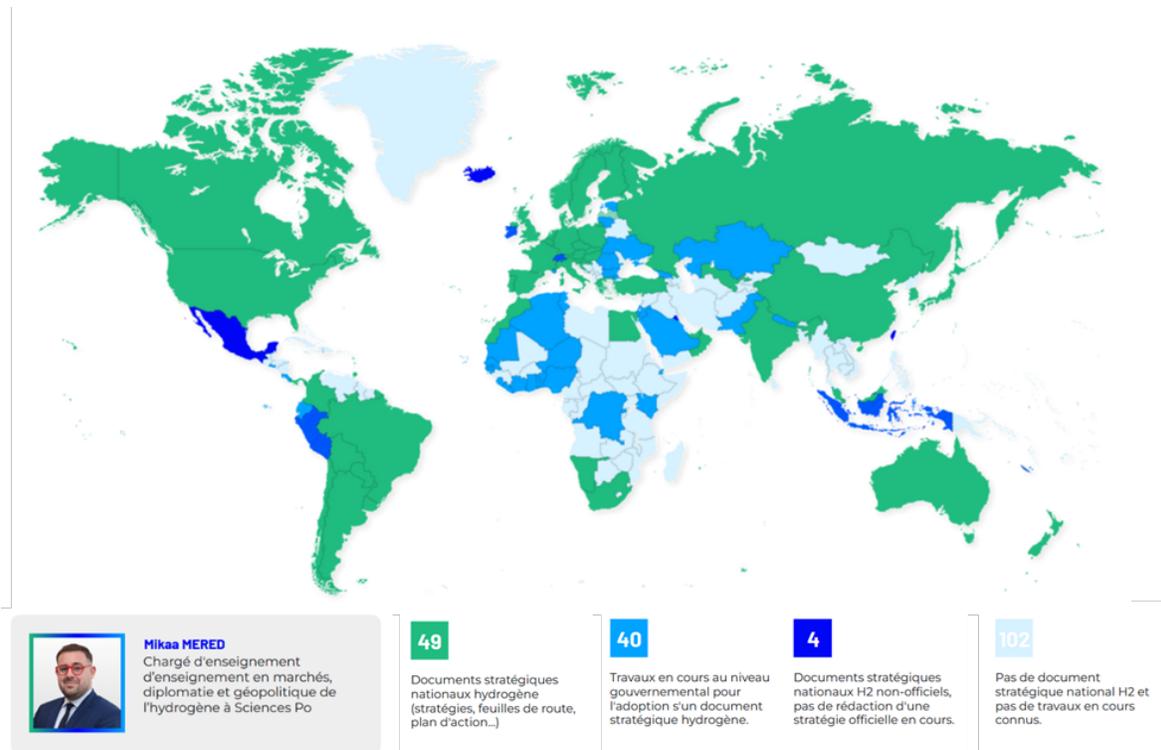


FIGURE 3 – État des lieux des stratégies hydrogène dans le monde. Source : © Mikaa Mered (Janvier 2023)

La France, quant à elle, mise sur le développement d'écosystèmes complets (production des équipements, production d'hydrogène et usages) grâce à l'émergence d'une filière française de l'électrolyseur. La stratégie nationale de développement de l'hydrogène, publiée en 2020, fixe trois priorités [MEFSIN, 2021] :

1. **Décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française de l'électrolyse** (6,5 GW d'électrolyseurs en 2030 et 50 000 à 150 000 emplois créés)
2. **Développer une mobilité lourde à l'hydrogène décarboné**, en complément des solutions batteries et bioGNV, pour répondre aux besoins de forte puissance motrice, de forte autonomie et de temps de recharge faible.
3. **Soutenir la recherche, l'innovation et le développement de compétences**, former à la spécificité du gaz hydrogène afin de soutenir le développement des usages sur le territoire.

3 Quelques données techniques sur l'hydrogène

3.1 Méthode de production de l'hydrogène et couleurs associées

Aujourd'hui, l'hydrogène est essentiellement produit à partir de combustibles fossiles, principalement par reformage du gaz naturel (réaction du méthane CH₄ avec de la vapeur d'eau H₂O pour former de l'hydrogène et du CO₂) ou par gazéification du charbon. L'hydrogène produit est alors qualifié de "gris". Afin de décarboner la production d'hydrogène, le dioxyde de carbone émis lors du reformage peut être capté et stocké. On parle alors d'hydrogène "bleu" (cf. Figure 4).

L'hydrogène peut également être qualifié de "vert" ou "renouvelable", s'il est produit à partir de ressources renouvelables. A ce jour, la technologie la plus utilisée pour produire de l'hydrogène renouvelable est l'**électrolyse de l'eau, une réaction qui permet, grâce à un apport d'électricité d'origine renouvelable, de scinder les molécules d'eau en deux composés gazeux : le Dioxygène (O₂) et le Dihydrogène (H₂)**. D'autres méthodes de production d'hydrogène à partir de ressources renouvelables existent, comme la thermolyse de l'eau ou la pyrogazéification de la biomasse (cf Section 4.2), mais ces procédés ne sont, à ce jour, pas encore industrialisés.

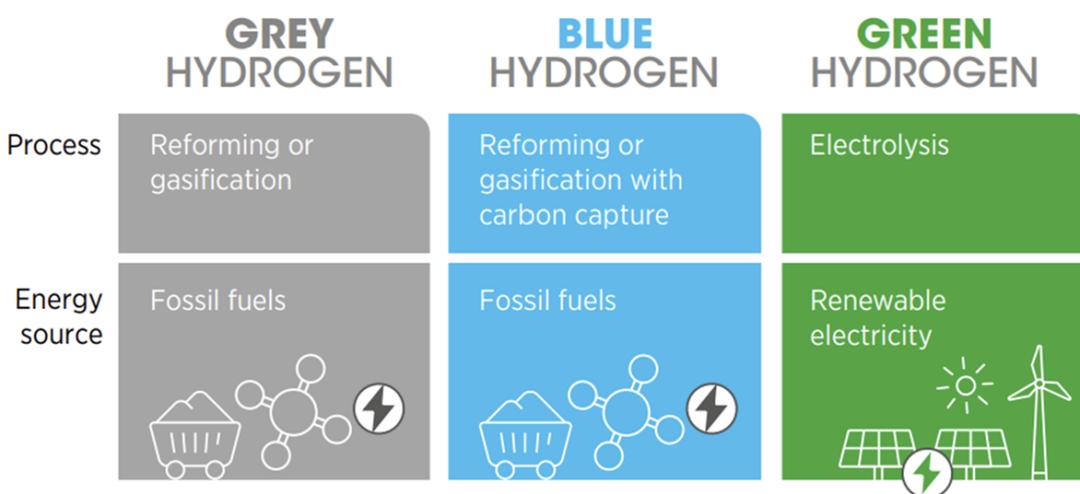


FIGURE 4 – Les couleurs de l'hydrogène [IRENA, 2020]

D'autres couleurs peuvent qualifier l'hydrogène, selon sa méthode de production, même si ces nomenclatures ne sont pas officielles. Ainsi, l'hydrogène produit par électrolyse à partir d'électricité d'origine nucléaire est dit rose, violet ou parfois jaune. Par ailleurs, l'hydrogène peut également être présent naturellement dans le sous-sol terrestre, dans des quantités et localisations encore indéterminées à ce jour. Plusieurs études de gisement de cet hydrogène dit « Blanc » sont en cours, y compris en France, dans les Pyrénées-Atlantiques ou en Lorraine. En mai 2023, la société Française de l'Energie (FDE) a d'ailleurs obtenu un permis exclusif pour l'exploration d'hydrogène dans le bassin houiller lorrain où le gisement pourrait atteindre 46 milliards de tonnes (soit la moitié de la production mondiale annuelle d'hydrogène) [L'Usine Nouvelle, 2023].

3.2 Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

L'hydrogène peut être produit lors de réactions électrochimiques qui ont lieu à la surface des électrodes d'une cellule d'électrolyse. Celle-ci est constituée des éléments visibles sur la Figure 5 :

1. Deux électrodes : l'anode (production de dioxygène) et la cathode (production dihydrogène)

- Un électrolyte qui permet la circulation des ions. Il est étanche au gaz pour empêcher le mélange du dihydrogène et du dioxygène produits.
- Une alimentation en eau (environ 10L pour produire 1kg d'H2 [France Hydrogène, 2023])

L'empilement de ces cellules d'électrolyse constitue un stack. Un électrolyseur est constitué d'un stack ainsi que d'un ensemble de composants auxiliaires nécessaires à son fonctionnement. Il en existe différents types qui se différencient par la nature de l'électrolyte utilisé, les matériaux en jeu et les conditions de température et de pression sous lesquelles ils fonctionnent. Le tableau 6 ci-dessous résume les principales caractéristiques, avantages et inconvénients de principaux électrolyseurs commercialisés ou au stade d'étude aujourd'hui.

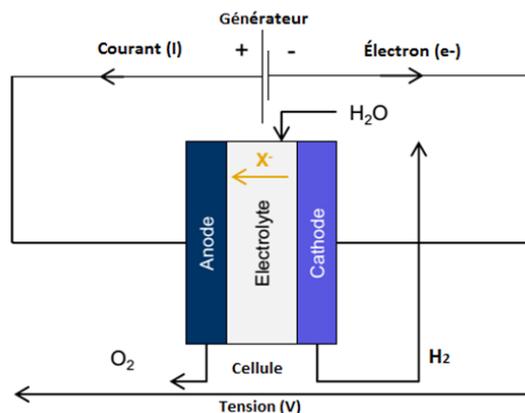


FIGURE 5 – Cellule d'électrolyse [Encyclopédie de l'énergie, 2016]

Type d'électrolyseur	Alcalin	Membrane Echangeuse de Protons (PEM)	Haute Température à oxyde solide (SOEC)	Membrane Echange d'Anions (AEM)
Electrolyte	Liquide : solution alcaline (potasse KOH)	Solide : Membrane polymère (Nafion)	Solide : oxydes solides (Céramiques)	Solique et liquide : membrane imbibée d'une solution à 1% de potasse
Maturité de la technologie	Commercialisée	Commercialisée	Démonstrateurs	Prototypes
Rendement	60-75%	70-90%	85-100%	75-85%
CAPEX (USD/kWe)	500-1400	1100-1800		-
Caractéristique de la maintenance	Recharge en électrolyte (liquide corrosif) : précautions nécessaires + assez coûteux	Maintenance simple, coût faible	-	-
Durée de vie (h)	120 000	100 000	Aujourd'hui < 20 000h (dégradation des matériaux à haute température)	-
Principal avantage	Faible CAPEX	Très bon délais de réponse aux variations de charge (ENR)	Diminution de 15 à 30% de l'apport d'électricité	Pas de métaux rares
Principal inconvénient	Peu flexible, inertie	Utilisation de métaux rares (platine, irridium, titane, ...)	Apport de chaleur nécessaire (700 à 1000°)	Petits prototypes aujourd'hui
Producteur français	Mc Phy	Elogen	Genvia (CEA), Sylfen	Gen-Hy

FIGURE 6 – Principales caractéristiques des électrolyseurs commercialisés et au stade d'étude en 2023. Tableau réalisé par la SPL Horizon Réunion à partir des données de différentes sources [Norouzi, 2021],[H2 mobile, 2021], [France Hydrogène, 2023], [IEA, 2021]

3.3 Coût de production de l'hydrogène vert

Le coût de production de l'hydrogène vert a été jusqu'à ce jour un des obstacles majeurs à son déploiement. En 2021, l'IEA estime que le coût moyen de production d'hydrogène par électrolyse est compris entre 4 et 9\$/kg contre 1 à 2,5\$/kg pour l'hydrogène gris et 1,5 à 3\$/kg pour l'hydrogène bleu [IEA, 2023].

Cependant, suite à l'invasion de l'Ukraine en 2022 et l'augmentation du prix du gaz naturel, le coût de production de l'hydrogène gris a triplé pour atteindre 4.8-7.8\$/kg H₂, rendant l'hydrogène vert compétitif dans certaines régions du monde. Sur le long terme, **le développement massif de capacités renouvelables et le besoin de sécurité énergétique pourront jouer en faveur de la baisse des coûts et du déploiement à grande échelle de l'hydrogène vert**. La France estime que le coût de production de l'hydrogène pourrait atteindre 2 à 3 euros/kg à l'horizon 2028 [MEFSIN, 2021].

Pour un projet donné, le coût de production de l'hydrogène prend en compte l'amortissement des coûts d'investissement (électrolyseur, installation, raccordement) et des coûts opérationnels (consommation d'eau et d'électricité, maintenance). Il sera principalement influencé par :

1. Le **coût de l'électricité qui alimente l'électrolyseur**.
2. La **technologie d'électrolyseur choisie** (coût, durée de vie, opération de maintenance...). Cf Tableau 6.
3. Le **taux de charge de l'électrolyseur**. Un électrolyseur alimenté par une énergie intermittente (solaire ou éolien), fonctionnera avec un taux de charge faible et sera plus long à rentabiliser, ce qui se répercutera sur le coût de l'hydrogène produit.

3.4 L'hydrogène comme source d'énergie

L'hydrogène est un **vecteur énergétique**. Lorsqu'il est produit par électrolyse de l'eau, il permet de stocker l'électricité sous forme de gaz. Sous cette forme, il se transporte facilement et peut être conservé sur des durées très longues sans se dégrader (contrairement à une batterie). L'énergie contenue dans un kilogramme d'hydrogène peut être restituée de deux façons :

- En le brûlant : la **combustion** d'un kilogramme d'hydrogène libère trois fois plus d'énergie que celle d'un kilogramme d'essence et ne produit que de l'eau (cf Tableau A.1). L'hydrogène, embarqué sur un véhicule peut alors être utilisé comme carburant.
- Par une **pile à combustible** : l'hydrogène couplé à un apport d'air et introduit dans une pile à combustible permet de produire de l'électricité en ne rejetant que de l'eau. C'est l'inverse de l'électrolyse. L'électricité générée peut alors directement être utilisée (injection sur le réseau, alimentation d'un site donné) ou alimenter le moteur électrique d'un véhicule.

Le principal inconvénient de l'hydrogène gazeux est qu'il est très peu dense (0,09kg/m³), 10 000 fois moins que l'essence. A température et pression ambiante, il faut 13 m³ pour stocker un kilogramme d'hydrogène ! Pour une voiture consommant 2 à 3 kg d'hydrogène aux 100 km, il est nécessaire de mettre cet hydrogène sous pression, d'où les coûts importants qui en résultent. Quelques éléments sur le stockage d'hydrogène sont donnés sur la Figure 7.

Par ailleurs, l'hydrogène produit par électrolyse peut être recombéné à de l'azote pour former de l'ammoniac. Associé à du dioxyde de carbone, il peut former du méthane, du méthanol ou d'autres dérivés hydrocarbonés (cf Figure 8). Ces composés sont énergiquement denses à température et pression ambiante : il n'y a donc pas besoin de maintenir des conditions particulières pour les stocker et les transporter contrairement à l'hydrogène (cf Figure 7). Par ailleurs, ils peuvent directement remplacer les carburants fossiles dans l'ensemble des secteurs où ils sont utilisés. Dans

le transport, par exemple, ils peuvent être incorporés aux carburants traditionnels et injectés dans les réservoirs actuels sans qu'aucune modification ne soit nécessaire. Ces **carburants de synthèse renouvelables** sont regroupés par la Commission Européenne sous le sigle de RFNBO (Renewable Fuel of Non-Biological Origin). Ils sont également parfois désignés d'e-fuel (e pour électrolyse) : e-kérosène, e-méthanol, etc. Dans le cadre de la révision de la directive européenne sur les énergies renouvelables (RED III), une cible de 1% de RFNBOs dans le secteur des transports à l'horizon 2030 a été proposée. [European Council, 2023].

Stockage	Stockage H2 gazeux	Stockage H2 liquide	Stockage H2 sous forme d'hydrures métalliques	Stockage sous forme de composés dérivés de l'H2
Principe	Compression	Liquéfaction	Réaction chimique pour former un hydrures métallique solide (MgH, BrH) ou liquide (SiH)	Réaction chimique pour former des composés azotés (NH3) ou carbonés (CH4, méthanol) liquides ou gazeux
Conditions de température et de pression à maintenir	Haute pression. 350 à 700 bars selon les réservoirs.	Basse température. -253°C.	Pressions et températures normales.	
Volume occupé par l'Hydrogène	5kg d'Hydrogène dans un réservoir de 125L	5kg d'Hydrogène dans un réservoir de 75L	-	-
Principales contraintes	Apport énergétique important pour la compression ou la liquéfaction et pour le maintien des conditions de température et de pression. Risque sécuritaire (brûlure, explosion)		La réaction doit être réversible, avec une cinétique rapide. Le composé doit rester stable à température et pression ambiante	
Utilisation aujourd'hui	Réservoirs automobiles	Lanceurs spatiaux	Phase expérimentale	Injection dans les réseaux de gaz ou réservoirs traditionnels

FIGURE 7 – Quelques éléments sur les méthodes de stockage de l'hydrogène. Tableau réalisé par la SPL Horizon Réunion à partir de données issues de différentes sources [IEA, 2022] [France Hydrogène, 2023]

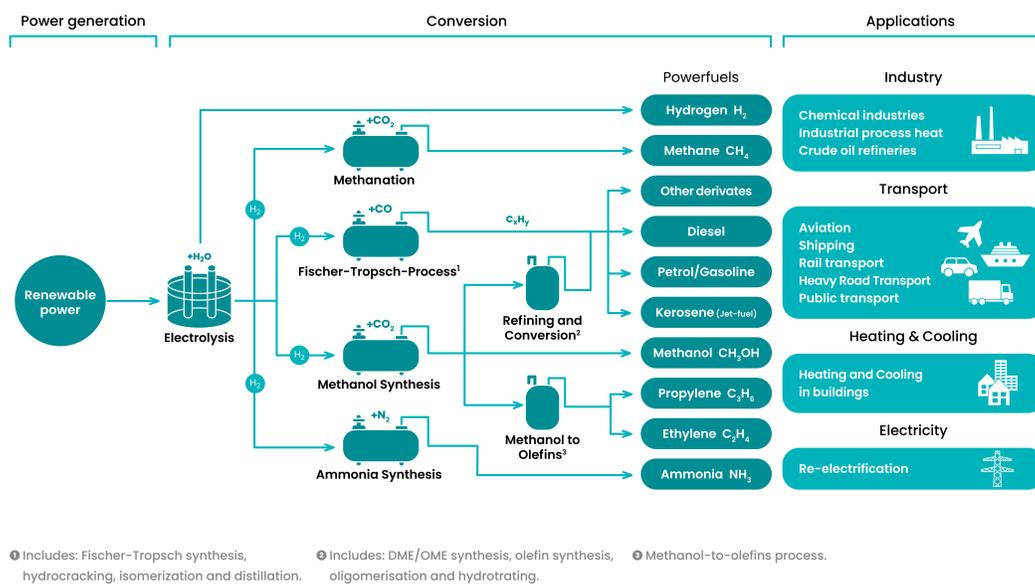


FIGURE 8 – Conversion de l'hydrogène en composés dérivés azotés ou carbonés. Source : Global Alliance Powerfuels

4 Production et usages potentiels de l'hydrogène vert à La Réunion

4.1 Quel intérêt de l'hydrogène par rapport aux objectifs énergétiques du territoire ?

Les enjeux énergétiques du territoire réunionnais sont nombreux, à savoir :

1. Autonomie énergétique du territoire

La Réunion est très fortement dépendante de l'importation de combustibles fossiles pour la production électrique et le transport, deux secteurs qui représentent respectivement 46% et 49% de la consommation de combustibles fossiles en 2021 [OER, 2021]. Avec un taux de dépendance énergétique de 88% en 2021, La Réunion est encore loin des objectifs d'autonomie énergétique des DOM à l'horizon 2030 fixés dans le Code de l'Energie. La souveraineté énergétique du territoire ne pourra être atteinte sans une intégration massive de capacités renouvelables locales dans le mix électrique, le développement de mobilités alternatives et la mise en place d'actions fortes de maîtrise de la demande en énergie. La mise en oeuvre de ces objectifs fixés dans la PPE de La Réunion devrait permettre de réduire à 69% la dépendance énergétique du territoire en 2028 [PPE, 2022] .

2. Intégration d'ENR locales dans le mix électrique et flexibilité du réseau électrique

Le mix électrique réunionnais est aujourd'hui très fortement carboné (732 gCO₂/kWh en 2021 [OER, 2021]) tandis que la part des énergies renouvelables dans ce mix n'est que de 30%. Dès 2024, la conversion des centrales fossiles de l'île à la biomasse, devrait permettre d'atteindre un mix électrique proche de 100% d'ENR. Cependant, cette biomasse sera en grande partie importée par manque de ressources locales. Pour atteindre l'autonomie électrique, d'autres capacités ENR locales devront être massivement déployées (solaire, éolien terrestre et off-shore, géothermie, etc.). La PPE fixe un taux d'intégration des énergies renouvelables intermittentes de 55% en 2028 pour accompagner le déploiement de +250 MW de photovoltaïque et +75MW d'éolien terrestre. Pour compenser la fluctuation des énergies intermittentes et le manque de moyens de production pilotables, de nouvelles capacités de stockage devront alors être déployées. A noter que le plan hydrogène national, identifie les ZNI comme territoires prioritaires pour le déploiement d'expérimentations de stockage hydrogène. [Plan H2, 2018] :

« En outre, au regard de l'objectif d'autonomie énergétique à 2030 dans les zones non interconnectées (ZNI) et des besoins forts pour la flexibilité des réseaux, ces territoires sont identifiés comme prioritaires pour des expérimentations et déploiements pilotes dans le domaine du stockage et notamment de l'hydrogène. »

3. Développement de mobilité durable

Le secteur des transports est aujourd'hui responsable de l'émission de 2 millions de tonnes de CO₂ à La Réunion, soit 46% des émissions de l'île [OER, 2021]. La PPE encourage le déploiement de la mobilité électrique et fixe un objectif de réduction de 22% de la consommation de carburants routiers d'ici 2028. En complément des véhicules électriques à batterie, l'hydrogène apparaît alors de plus en plus comme une alternative pour décarboner les usages

difficiles à électrifier comme le transport lourd (bus, camions) ou le transport maritime et aérien.

Produit à partir de ressources renouvelables locales, l'hydrogène est donc un élément essentiel pour atteindre l'autonomie énergétique du territoire en complément d'autres solutions de décarbonation. L'hydrogène pourra notamment permettre une intégration massive de ressources renouvelables intermittentes dans le mix électrique et participer au développement d'une mobilité 0-émission.

4.2 Potentiels de production d'hydrogène vert à La Réunion

Afin de s'inscrire dans les objectifs énergétiques de l'île évoqués ci-dessous, l'enjeu est de produire de l'hydrogène à partir de **ressources renouvelables locales**.

Pour produire de l'hydrogène par électrolyse à La Réunion, le **photovoltaïque** est la technologie la plus robuste et la moins coûteuse à déployer aujourd'hui. Cependant, le facteur de charge de l'énergie solaire est assez faible (13,7% à La Réunion [OER, 2021]) et une grande quantité d'électricité est nécessaire pour produire de l'hydrogène (55 kWh_e pour 1 kg d'hydrogène [France Hydrogène, 2023]). La surface de panneaux photovoltaïques à installer serait donc très élevée. A titre d'exemple, il serait nécessaire d'installer une centrale photovoltaïque de 900 kW_c, soit environ la surface d'un terrain de foot, pour alimenter deux bus hydrogène. Pour limiter l'emprise au sol des projets, les centrales photovoltaïques pourraient donc être installées en toiture (bâtiments, ombrières de parkings, serres agricoles, etc.).

A plus long terme, la PPE prévoit l'intégration de nouvelles capacités renouvelables sur le territoire réunionnais qui pourraient se coupler avec une production d'hydrogène (cf données en Annexe A.1). Ainsi, à l'horizon 2028, l'éolien off-shore représenterait un potentiel non négligeable pour la production d'hydrogène (turbines de plusieurs MW) à condition de réaliser les développements nécessaires pour l'exploitation de cette ressource énergétique. Une centrale thermique, tout comme une installation géothermique ou une installation de valorisation de déchets, sont à l'origine d'une cogénération d'électricité et de chaleur, deux éléments nécessaires au fonctionnement de futurs électrolyseurs haute température (cf. Figure 6).

Dans le cadre du déploiement de ces nouvelles capacités renouvelables, la possibilité d'adosser à ces nouvelles installations un électrolyseur pour une production d'hydrogène renouvelable pourra donc être étudiée. Cet hydrogène pourra servir de solution de stockage pour permettre une meilleure intégration des ressources intermittentes sur le réseau électrique (photovoltaïque, éolien off-shore) ou servir de carburant dans le domaine de la mobilité.

Raccordement d'un électrolyseur au réseau électrique

Selon l'acte adopté par la Commission Européenne le 13 février 2023, l'hydrogène peut être qualifié de renouvelable si l'électrolyseur est alimenté par une source d'électricité provenant :

1. De capacités renouvelables nouvellement installées (principe d'additionnalité).
2. Du réseau électrique si la part d'énergies renouvelables est dominante et que le taux de fonctionnement de l'électrolyseur n'excède pas cette part.
3. Du réseau électrique si celui-ci est décarboné (moins de 65g CO₂e/kWh)
4. Du réseau électrique si la consommation électrique mobilisée est équivalente à celle d'une nouvelle infrastructure renouvelable, fonctionnant dans les mêmes heures et dans la même zone géographique que l'installation de production d'hydrogène

A l'horizon 2024-2025, avec la conversion des centrales fossiles de La Réunion, un électrolyseur alimenté en partie par le réseau électrique produirait donc de l'hydrogène renouvelable selon les critères de la Commission Européenne (cas n°2). Cependant, les cas n°1 et n°4 sont à privilégier au regard des objectifs de souveraineté énergétique du territoire.

L'intérêt d'un raccordement de l'électrolyseur au réseau électrique est d'optimiser son taux de charge et donc de diviser les coûts de production de l'hydrogène (division par 2). Par ailleurs, un électrolyseur pourrait apporter au système électrique une certaine flexibilité (réserve, effacement).

A noter également que d'autres technologies de production d'hydrogène renouvelable, sans électricité, font l'objet d'études ou de réflexions sur le territoire comme :

- La pyrogazéification de la biomasse ou de déchets (déchets verts, plastiques non-recyclés, déchets ménagers, ...). Cette opération consiste à chauffer les déchets à très haute température (900 à 1200°) et en présence d'une faible quantité d'oxygène afin d'obtenir un mélange de gaz (syngaz) dont l'hydrogène.
- La production d'hydrogène par procédés biologiques. Certains micro-organismes (algues ou bactéries) peuvent décomposer des substances organiques pour former de l'hydrogène, avec ou sans apport de lumière, et sans rejet de gaz à effet de serre. Ce procédé est encore au stade de R&D, l'enjeu étant de comprendre les procédés métaboliques impliqués et les conditions adéquates pour la culture de micro-algues ou bactéries.
- La thermolyse ou photolyse de l'eau, deux réactions consistant à dissocier une molécule d'eau grâce à un apport de chaleur (thermo) ou de rayonnement (photon) provenant de la lumière solaire.

4.3 Usages de l'hydrogène comme matière première pour l'industrie

En France, la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène fixe comme priorité n°1 l'installation de 6,5 GW d'électrolyseurs pour décarboner la production d'hydrogène utilisé comme matière première dans l'industrie [MEFSIN, 2021].

Or à La Réunion, il n'y a **pas de forte demande d'hydrogène pour des clients industriels**, contrairement à d'autres DOM comme la Martinique (où la raffinerie excédentaire en Hydrogène) ou la Guyane (consommation par le centre spatial de Kourou pour du transport de marchandises). A La Réunion, une faible quantité d'hydrogène est importée, principalement pour réaliser des mélanges de gaz à la demande de certains clients (laboratoires, industriels de l'agro-alimentaire, etc.).

Une enquête diffusée aux adhérents de l'ADIR a cependant permis de confirmer que les industriels locaux s'intéressent à l'hydrogène pour la décarbonation de leurs activités, notamment pour :

- La mobilité lourde : véhicules utilitaires, chariots élévateurs et engins de manutention, poids lourds, navires, Cf Section 4.4
- L'alimentation autonome de certains sites (entrepôts, bâtiments industriels). Cf Section 4.5.
- La production de chaleur (chaudière H2)
- La production de carburants de synthèse pour le secteur maritime. Cf Section 4.4

Un synthèse des résultats obtenus suite à la diffusion de ce questionnaire est présentée en Annexe A.2.

4.4 Usage de l'hydrogène comme carburant pour la mobilité

À La Réunion, le transport routier et aérien représente respectivement 33% et 12% des émissions de CO2 de l'île [OER, 2021]. Pour atteindre les objectifs de réduction de la consommation des carburants fossiles fixés par la PPE (cf Figure 9), il est urgent de développer les mobilités alternatives en complément d'autres mesures (développement des modes de transport doux, optimisation du parc de véhicules, taux de remplissage des véhicules, etc.).

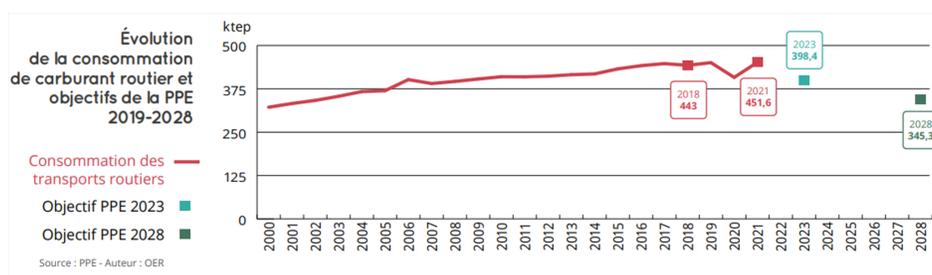


FIGURE 9 – Consommation de carburants routiers à La Réunion

Sur le plan réglementaire, il est à noter que le texte de la Commission Européenne proposant d'interdire la commercialisation des véhicules thermiques neufs en 2035 n'a pas encore été validé. En effet, l'Allemagne demande une dérogation autorisant la vente de véhicules thermiques neufs fonctionnant à partir de carburants de synthèse exclusivement (RFNBOs, cf Section 3.4).

4.4.1 Le véhicule hydrogène en complément du véhicule électrique à batteries pour le transport routier

Les véhicules électriques à batteries s'imposent peu à peu comme alternative au véhicule thermique. À La Réunion, la révision de la PPE renforce l'objectif de développement du réseau de bornes de recharge pour véhicules électriques (1 700 bornes pour accompagner le déploiement d'environ 34 000 véhicules en 2028) [PPE, 2022]. Il est important de préciser que le principal frein au développement d'un véhicule hydrogène est son rendement par rapport à la solution à batteries électrochimiques (27% VS 70%) [ADEME, 2022]. Il faut en effet, trois fois plus de surface de panneaux photovoltaïques pour alimenter un véhicule électrique à hydrogène plutôt qu'un véhicule électrique à batteries à cause des différentes pertes lors des conversions électricité-gaz-électricité (cf Figure 10).

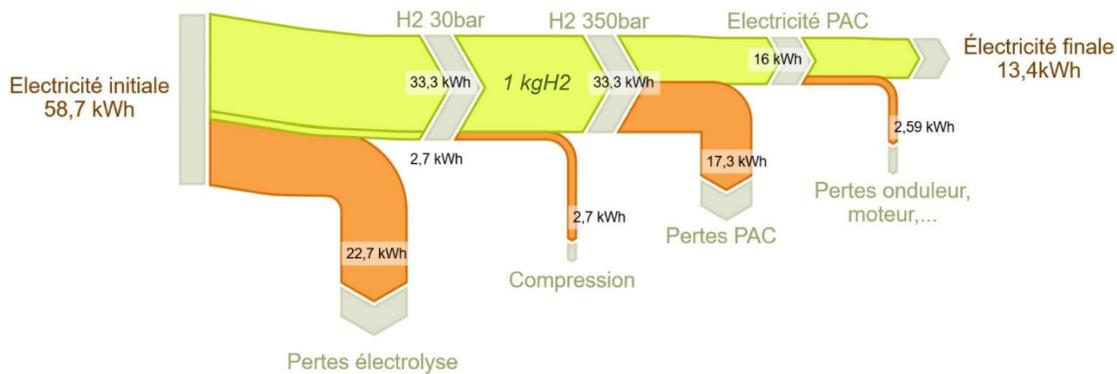


FIGURE 10 – Rendement de la chaîne hydrogène [ADEME, 2022]

Ainsi, **le véhicule à hydrogène est à même de se développer en complément de la solution batterie sur les usages où le véhicule électrique ne peut, à ce jour², satisfaire les contraintes opérationnelles** à savoir :

- Assurer une recharge rapide pour des véhicules effectuant des déplacements intensifs : flottes de taxi, véhicules de livraison, engins de manutention fonctionnant à temps plein, etc.
- Ne pas surcharger le réseau électrique aux heures où la demande déjà est importante. Un bus devra dans la majorité des cas faire le plein à la fin de son service, en fin de journée, ce qui coïncide avec le pic de consommation journalier. Pour ne pas surcharger le réseau électrique déjà en tension en rechargeant un bus électrique à batteries, il peut être préférable de disposer d'un véhicule hydrogène qui sera alimenté grâce à de l'hydrogène produit en journée.
- Assurer les besoins d'autonomie importants de certains poids lourds, véhicules de transport de passagers ou bennes à ordures ménagères que ne peut remplir la solution électrique à batteries.

Ainsi, **il est peu probable que le véhicule hydrogène se développe pour de la mobilité individuelle** puisque l'autonomie des véhicules électrique à batteries est suffisante pour couvrir l'essentiel des déplacements effectués sur l'île. En revanche, des études réalisées par des acteurs locaux comme Transdev, Akuo ou Albioma ont montré que la solution électrique à batteries ne convenait pas sur les usages intensifs de certains camions de livraisons de marchandises ou véhicules de transport de passagers. En effet, les véhicules lourds à batteries ont généralement une autonomie limitée par leur poids, les forts reliefs observés à La Réunion et les besoins de climatisation importants. Sur ces usages spécifiques, il serait alors nécessaire de doubler la flotte de véhicules électrique pour assurer les mêmes rotations qu'avec un véhicule thermique ou mettre en place des solutions de recharge sur le parcours des véhicules, ce qui augmente les coûts. Or, les autonomies annoncées par les constructeurs de véhicules lourds à hydrogène (300-400km) sont à ce jour proches des équivalents thermiques. Une phase de test permettrait donc de valider la pertinence de la solution hydrogène sur le territoire réunionnais, sur les usages qui ne peuvent être couverts par les véhicules électriques à batteries.

À La Réunion, **le véhicule à hydrogène a également l'avantage de résoudre en partie la problématique du traitement des batteries Li-Ion**. Aujourd'hui ces batteries ne peuvent être recyclées localement et il est souvent difficile de les exporter en raison de leur explosivité. Elles sont donc stockées au Port dans l'attente de disposer d'une solution pour les recycler localement ou les exporter. A noter que les véhicules électriques hydrogène sont eux aussi équipés d'une batterie

2. Plusieurs activités R&D sont en cours sur la recharge rapide de batteries, la recharge par induction ou le "battery swap" (échange de batteries)

Li-Ion, notamment pour les appels de puissance (démarrage, accélération, ...) mais celle-ci est de taille très réduite par rapport à un véhicule électrique à batteries.

A terme, des véhicules équipés d'un moteur hydrogène, c'est-à-dire un moteur à combustion utilisant de l'hydrogène gazeux comme carburant, pourraient trouver leur place sur le marché des véhicules hydrogène. **Une propulsion hydrogène présente l'avantage principal de limiter la place des composants embarqués**, notamment en supprimant l'espace nécessaire pour la pile à combustible et en réduisant la taille de la batterie. Ce type de propulsion pourrait donc être pertinent pour les usages où l'espace est très contraint comme les poids-lourds. Les moteurs actuels doivent cependant être adaptés pour pouvoir fonctionner avec un carburant gazeux et très volatil comme l'hydrogène. Par ailleurs, ces moteurs rejettent des particules toxiques (NOx), mais en quantité moindre par rapport à leurs équivalents thermiques. Plusieurs moteurs hydrogène sont actuellement en phase de test chez des constructeurs comme **JCB** ou **Roll-Royces**. De premiers prototypes de camions équipés de ces moteurs apparaissent comme le camion Unimog de **Mercedes** mais ces véhicules ne devraient pas être commercialisés avant encore quelques années.

A noter également que pour palier aux limitations du véhicule électrique, **des réflexions et expérimentations sur l'usage de biocarburants liquides ou gazeux sont en cours sur le territoire**. Ainsi, un circuit de collecte des huiles alimentaires usagées a été mis en place par la start-up Biofuel Réunion (label **Arsycle**). Si ces huiles sont aujourd'hui exportées pour alimenter une production de biocarburants en Europe, la start-up estime que cette production pourrait être relocalisée à La Réunion d'ici 2025 [**Les Echos, 2022**]. Par ailleurs, plusieurs collectivités comme la CINOR, la Région Réunion ou la CASUD mènent actuellement des études sur la possibilité de produire localement de bioGNV pour l'alimentation d'autobus et autocars. Cependant, de même que pour la production d'électricité (cf Section 4.1), la ressource biomasse locale reste très limitée et l'import de biocarburants serait alors nécessaire pour couvrir l'ensemble des besoins de la filière.

4.4.2 L'hydrogène pour décarboner les usages non électrifiables dans le secteur maritime et aérien

Les **secteurs maritime et aérien**, très émetteurs de gaz à effet de serre sont aujourd'hui en profonde mutation afin de développer des mobilités alternatives non carbonées. Parmi les solutions envisagées, **l'hydrogène apparaît comme incontournable pour atteindre les objectifs de décarbonation** de ces secteurs.

Selon l'IEA [**IEA, 2022**], l'hydrogène est la seule piste pour parvenir aux objectifs de réduction des émissions de CO2 dans le secteur maritime fixés par l'Organisation Maritime Internationale (-50% en 2050). Des premiers prototypes de bateaux hydrogène commencent à voir le jour comme le **Catamaran hybride de EOdev** ou le **ferry à hydrogène liquide de Norled**. Des carburants de synthèse à base d'hydrogène comme le e-méthanol ou le e-ammoniac pourraient également alimenter les navires de demain (cf Section 3.4).

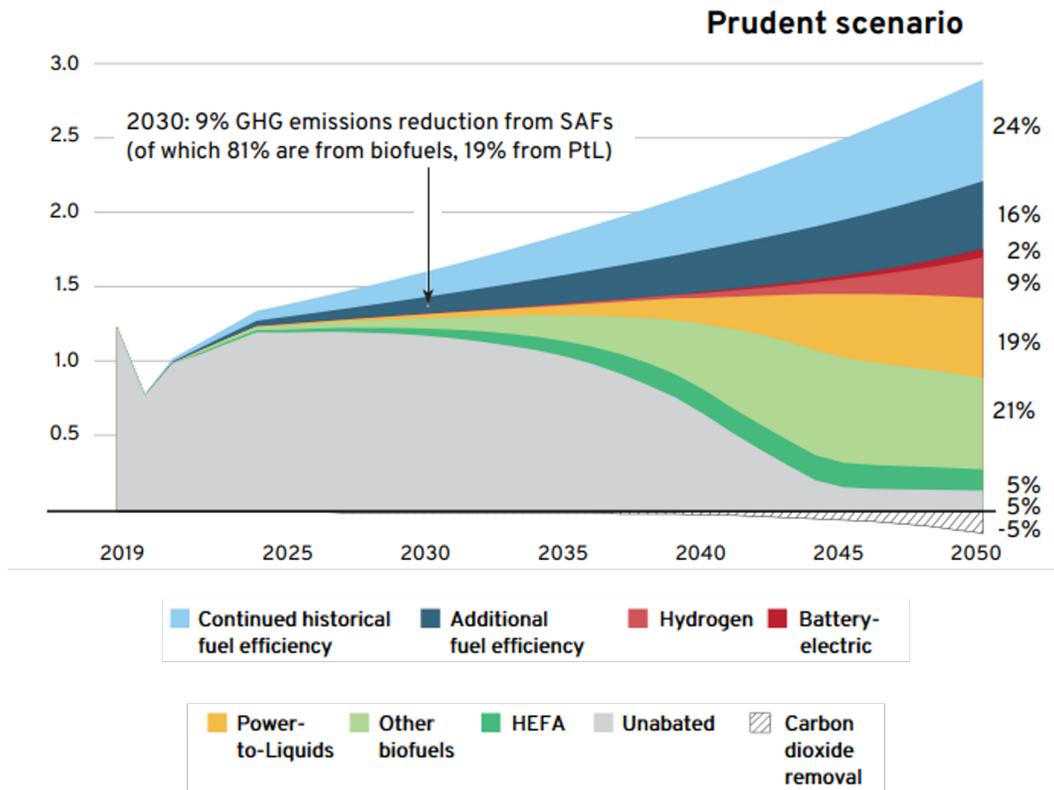


FIGURE 11 – Perspectives de réduction des émissions de CO₂ dans le secteur aérien [Mc Kinsey, 2022]

Selon une étude de Mc Kinsey [Mc Kinsey, 2022], le secteur aérien pourrait représenter 10 à 30% de la demande en hydrogène en 2030. Parmi les solutions de décarbonation de l'aviation envisagées, deux incluent l'hydrogène (cf Figure 11) :

1. Les avions à propulsion hydrogène. Airbus envisage une commercialisation de premiers avions à hydrogène à l'horizon 2035 [L'usine Nouvelle, 2022] pour les petits et moyens courriers (moteurs électriques alimentés par une pile à combustible ou turboréacteurs à hydrogène liquide).
2. Les carburants de synthèse, appelés dans le secteur aéronautique les *Power-To-Liquid*. Ces carburants synthétisés en combinant de l'hydrogène produit par électrolyse et du CO₂ (cf Section 3.4) pourraient contribuer à hauteur de 20% des réductions des émissions de GES du transport aérien à l'horizon 2050 (cf Figure 11).

L'hydrogène gazeux étant très peu dense et la place des composants embarqués limitée dans un navire ou un avion, l'enjeu pour déployer l'hydrogène dans ces secteurs est d'optimiser le stockage de l'hydrogène tout en respectant certaines contraintes de sécurités (cf Section 3.4). Une comparaison des différents systèmes de propulsion hydrogène est donné dans le Tableau 1.

Système de propulsion	Caractéristiques	Rejets	Usages
PAC	Technologie la plus mature aujourd'hui. Confort du moteur électrique.	H2 + O2	Bus, cars, utilitaire, BOM, poids lourds, chariots élévateurs, engins de manutention, navires légers (tourisme, pêche), petits/moyens courriers
Combustion directe d'H2	Besoin de place diminuée. Forte puissance. Nécessité d'adapter les moteurs thermiques au gaz H2	H2 + O2 + quelques composés toxiques (100 fois moins que les combustibles fossiles actuels)	Poids lourds, longs courriers, navires, voitures de course
Combustion de dérivés de l'H2 (RFNBO)	Carburants qui peuvent être injectés dans les moteurs actuels	Composés toxiques (NOx, CO, ...) similaires aux combustibles fossiles actuels	Mêmes usages que les combustibles fossiles actuels

TABLEAU 1 – Comparaison de différents systèmes de propulsion hydrogène. Tableau réalisé par la SPL Horizon Réunion à partir des données collectées dans l'état des lieux.

4.5 Usage de l'hydrogène comme solution de stockage pour la production d'électricité

Enfin, l'hydrogène est une solution de stockage, qui permet de stocker l'électricité sous forme de gaz. Le principal **attrait de l'hydrogène réside dans le stockage à long terme** : une bouteille d'hydrogène peut être conservée sur des durées très longues sans se dégrader alors qu'une batterie se décharge avec le temps.

Ainsi, l'hydrogène peut être retenu comme solution de stockage pour l'alimentation de sites isolés. Des micro-réseaux combinant centrales photovoltaïques, batteries Li-Ion et hydrogène sont notamment en cours de déploiement en Guyane (projet SEOG, plusieurs dizaines de MW) ou dans le Cirque de Mafate à La Réunion (projet SAGES, quelques kW). Ce type d'installation autonome pourrait également alimenter des sites industriels isolés, des entrepôts frigorifiques, des bateaux à quais, etc.

Par ailleurs, la PPE prévoit l'intégration massive de capacités ENR intermittentes dans le mix électrique. Or, dans son bilan prévisionnel d'équilibre offre-demande, EDF identifie un besoin de 80MW de capacités pilotables à l'horizon 2030 lié à la fermeture de certaines centrales et la massification du parc de véhicules électriques à batteries [EDF, 2022]. Ce besoin de puissance pilotable peut en partie être comblé par le déploiement de nouvelles capacités ENR intermittentes associées à des dispositifs de stockage (cf Schéma 12). L'hydrogène, comme d'autres solutions telles que les batteries Li-Ion ou une Station de Transfert des Eaux par Pompage, peut alors être envisagé pour répondre à une partie de ces besoins.

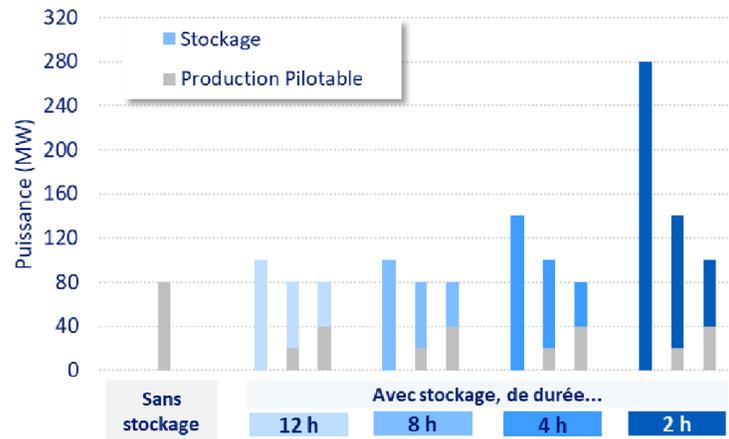


FIGURE 12 – Solutions de stockage (en bleu) en complément à de la puissance pilotable (0, 20 et 40 MW, en gris) pour plusieurs durées de stock. Figure issue du Bilan Prévisionnel de l'équilibre Offre-Demande publié par EDF en 2022 [EDF, 2022]

L'étude de l'ADEME sur la valeur des solutions H2 dans les Zones Non Interconnectées (ZNI) [ADEME, 2020], montre d'ailleurs que dans certains cas, l'exploitation de la capacité d'un électrolyseur préexistant pour apporter de la flexibilité au réseau électrique (effacement, modulation de la charge de l'électrolyseur) est plus rentable que l'installation de nouvelles capacités de batteries. La question du positionnement des électrolyseurs sur le réseau et des services systèmes qu'ils peuvent rendre reste encore à approfondir.

5 Quelle dynamique hydrogène sur le territoire réunionnais ?

5.1 Projets identifiés

Les **projets hydrogène non confidentiels**, identifiés sur le territoire réunionnais début 2023 sont listés dans la Figure 13.

Le micro-réseau de La Nouvelle est le premier projet hydrogène du territoire réunionnais, et est précurseur pour la filière : il s'agit d'un des premiers projets pilotes en France. La partie hydrogène (électrolyseur et pile à combustible) n'est cependant plus en état de marche depuis l'incendie de Juillet 2022, dont l'origine est extérieure à l'installation, et EDF ne prévoit pas sa remise en fonctionnement. Cet incident a soulevé la nécessité de la formation des pompiers à la gestion du risque à proximité d'une installation hydrogène. D'autres micro-réseaux seront déployés dans le cirque de Mafate mais la solution hydrogène n'a pas été retenue (PV et batteries seulement). Ainsi, le second micro-réseau hydrogène qui devait voir le jour à Aurère (lauréat de l'appel à projet Ecosystème ADEME) sera probablement déplacé dans un lieu plus accessible de l'île. L'étude sur la valeurs des solutions H2 dans les ZNI réalisée par l'ADEME montre cependant la pertinence économique des micro-réseaux hybrides H2-batteries par rapport aux micro-réseaux batteries seulement lorsque les besoins d'autonomie sont élevés (supérieurs à 4-5 jours). [ADEME, 2020]

A Sainte-Suzane, le siège du SIDELEC devrait accueillir très prochainement une station de charge pour deux véhicules légers, sous réserve de disponibilité des véhicules hydrogène. La Région Réunion et Albioma étudient également des projets de mobilité lourde à hydrogène, produit grâce à de l'énergie solaire, pour des véhicules ayant des besoins d'autonomie élevés (de 250 à 350km/j).

Stade du projet	Acteurs impliqués	Usage de l'hydrogène	Production d'hydrogène vert	Budget total
En cours de réalisation	SIDELEC	Mobilité légère / 2 véhicules légers (4,5kg d'H2/semaine)	Exédent de la production photovoltaïque non consommée pour les besoins du bâtiments et les bornes de recharge pour véhicules	0,74 M€
En cours de réalisation	SIDELEC, EDF	Alimentation électrique de sites isolés / Aurère ?	Micro-réseau PV + batteries Li-ion + électrolyseur + PAC	0,57 M€
En cours d'étude	Albioma	Mobilité lourde / 10-13 camions	PV 4 à 5 MW (+ batteries ?)	10-13 M€
En cours d'étude	Région Réunion	Mobilité lourde / 10 cars jaunes (250kg d'H2/j)	PV 4 MW (+réseau électrique ?)	12-18 M€
Hors service	SIDELEC, EDF	Alimentation électrique de sites isolés / La Nouvelle	Micro-réseau PV + batteries Li-ion + électrolyseur 5,5kW + PAC	-

FIGURE 13 – Projets recensés sur le territoire réunionnais en mai 2023. Les projets confidentiels sont exclus. PV = photovoltaïque. PAC = Pile A Combustibles.

Les principaux points bloquants au déploiement de projets hydrogène sont les suivants :

- Identification de foncier pour la production d'hydrogène (surface importante nécessaire pour une centrale solaire, respect des distances de sécurité des installations hydrogène)
- Identification de financements pour couvrir les surcoûts d'investissement et d'opération liés à l'hydrogène (électrolyseurs, véhicules, aménagements des dépôts). Cf Section 5.3.

-
- Disponibilité des véhicules auprès des constructeurs qui reçoivent actuellement de nombreuses commandes de véhicules neufs. L'insularité et les particularités climatiques liées au territoire réunionnais peuvent également dissuader certains fournisseurs d'équipements.
 - Engagement de l'utilisateur final malgré les surcoûts d'exploitation

5.2 Acteurs rencontrés

Afin de compléter l'état des lieux de la filière hydrogène, les avis et recommandations d'une quarantaine d'acteurs ont été récoltés lors d'entretiens individuels, d'ateliers collectifs ou grâce à la diffusion de questionnaires. Ces acteurs se positionnent sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène : production, stockage, distribution, utilisation, études et services, recherche et développement, financements, formation, etc. Ces échanges confirment l'intérêt stratégique de l'hydrogène sur le territoire et ont permis d'identifier les différents verrous à lever pour son déploiement sur le territoire.

Cette section ne se veut pas exhaustive : tous les acteurs ayant un intérêt pour l'hydrogène n'ont pu être rencontrés lors de cette phase d'état des lieux. L'objectif est simplement de donner un **premier panorama du positionnement des acteurs locaux vis-à-vis de l'hydrogène**.

Energéticiens

Plusieurs acteurs du domaine de l'énergie ont été rencontrés, comme des producteurs ENR (Albioma, Akuo, Ixeo, Bluefloat), des distributeurs de carburants (SRPP, Vivo Energy) ou de gaz (Air Liquid), ou encore les acteurs de la distribution d'électricité (EDF, SIDELEC).

L'ensemble des acteurs sont en veille sur l'hydrogène et ont un bon niveau de connaissances des technologies en jeu. Plusieurs projets de production d'hydrogène sont étudiés, essentiellement pour des applications dans la mobilité lourde (bus, camions) ou l'alimentation de sites isolés. Dans la majorité des cas, l'hydrogène est produit à partir d'électricité provenant du photovoltaïque mais d'autres pistes de production sont parfois mentionnées. Plusieurs acteurs ont répondu aux Appels à Projets (AAP) hydrogène de l'ADEME (DEMO-TASE, Ecosystème hydrogène) mais une grande partie des projets n'ont pas été retenus ou n'ont pas abouti, très souvent à cause des surcoûts d'exploitation trop importants que représente la solution hydrogène.

Acteurs du transport de passagers

Les acteurs du transport de passagers rencontrés sont principalement des collectivités (Région Réunion et les 5 EPCI de l'île), les exploitants (Transdev, SEMITTEL, GIE ACTIV), les transporteurs (Groupe Mooland) ou le Syndicat Mixte des Transport de La Réunion (SMTR). Ces acteurs sont en réflexion sur la décarbonation de leurs usages. L'hydrogène fait partie des solutions étudiées, aux côtés des véhicules électriques à batteries et des biocarburants (production locale ou importation, cf section 4.4.1). Ainsi, l'hydrogène pourrait répondre à des usages spécifiques où la solution électrique à batterie ne permet pas d'assurer l'exploitation avec les mêmes contraintes opérationnelles que la solution thermique sans doubler la flotte de véhicules (besoins d'autonomie élevés, temps de recharge faibles).

La majorité des acteurs rencontrés ont une très bonne connaissance des enjeux de la mobilité hydrogène : contacts fréquents avec des porteurs de projet en métropole, auto-formation, première étude de faisabilité sur la mobilité hydrogène, veille sur les financements, réponse à des appels d'offres, etc.

L'expérience des bus hybrides diesel-électrique, est très souvent mentionnée mais permet de tirer des enseignements essentiels :

-
- Une phase de test est indispensable avant le déploiement d'un nouveau type de véhicule pour valider la pertinence de la technologie sur le territoire réunionnais (climat tropical, relief important, isolement)
 - Les compétences de maintenance doivent être internalisées et développées localement

Les principaux freins à lever sont bien identifiés par les acteurs : surcoût d'investissement et d'exploitation, formation du personnel à la maintenance des véhicules, adaptation des dépôts aux normes ATEX, sécurité de l'approvisionnement en hydrogène renouvelable, ...

Plateformes logistiques

L'Aéroport de La Réunion Roland-Garros et le Grand-Port Maritime de La Réunion sont deux plateformes logistiques où les applications de l'hydrogène sont nombreuses : propulsion d'engins maritimes et aériens, engins de manutention et véhicules de service, alimentation d'entrepôts et de bâtiments, position stratégique à proximité des grandes réseaux routiers, etc. Ces deux acteurs étudient des solutions de décarbonation de leurs usages, dont certaines incluent l'hydrogène. Le foncier reste néanmoins contraint sur ces deux espaces.

R&D

Les acteurs R&D du territoire (laboratoires de recherche comme le ENERGY-Lab ou Piment, des start-ups, ou des instituts de recherche comme Efficacity) ont une bonne connaissance des perspectives d'évolution de la filière hydrogène. Le laboratoire ENERGY-Lab est d'ailleurs membre de la Fédération de Recherche hydrogène du CNRS (FRH2). Plusieurs projets hydrogène sont en cours de réflexion, notamment concernant de nouvelles voies de production d'hydrogène ne nécessitant pas d'électricité. Les acteurs R&D souhaitent être inclus dans les phases de test des projets afin de participer aux mesures et analyses des données collectées.

Clusters et Associations

Plusieurs clusters et regroupements d'acteurs économiques, présents ou non, sur le territoire réunionnais peuvent contribuer à l'élaboration d'une feuille de route hydrogène, au développement et à l'animation d'une filière hydrogène sur l'île ainsi. Ils peuvent notamment appuyer la SPL Horizon Réunion sur (cf Tableau 2) :

- Le partage d'études ou de données, le recensement des besoins.
- La visibilité et la communication autour d'évènements en lien avec l'hydrogène

5.3 Guichets de financements des projets hydrogène

Quelques éléments sur les **guichets de financements que peut solliciter un porteur de projet hydrogène** sur le territoire sont donnés ci-dessous. La liste proposée n'est pas exhaustive et d'autres mécanismes de financements pourront être sollicités.

Fonds européens (FEDER)

La Région Réunion, autorité de gestion des fonds européens FEDER a publié en Avril 2023 le nouveau **programme FEDER pour la période 2021-2027**. Certaines fiches thématiques concernant notamment les mobilités alternatives ou les énergies propres sont encore en cours de rédaction et pourraient inclure des mécanismes de financement des solutions hydrogène.

Nom	Composition	Appuie
Temergie	Regroupement d'acteurs économique pour favoriser la transition énergétique	Organisation, communication et visibilité d'évènements en lien avec l'hydrogène (Plénières FRhydrogène, Matinales, ...)
Cluster de la Mer	Regroupements des acteurs de la Mer	Etude en cours sur la décarbonation des navires côtiers
ADIR	Regroupements des acteurs industriels	Diffusion d'un questionnaire auprès des adhérents pour recenser les besoins en hydrogène du secteur industriel
France hydrogène	Association visant à promouvoir l'usage de l'hydrogène et assurer la mise en place d'un cadre réglementaire favorable à son déploiement	Les membres bénéficient d'accès à des ressources spécifiques (livres blancs, conférences, REX, ...) et peuvent bénéficier d'un accompagnement local (définition ou mise en œuvre d'une stratégie hydrogène)

TABLEAU 2 – Clusters et associations pouvant appuyer l'élaboration d'une feuille de route et l'animation de la filière hydrogène

France 2030

Parmi les 10 objectifs au programme de France 2030, le second est de **faire de la France le leader de l'hydrogène vert** (2,3 milliards d'euros prévus). De nombreux appels à projets sont disponibles sur le site de **France 2030**. Ces fonds peuvent également être sollicités par les porteurs de projets via plusieurs institutions locales notamment la DRARI pour les projets de R&D innovants ou l'ADEME.

Lancé en 2020, l'**Appel à Projet Ecosystèmes Territoriaux** de l'ADEME, qui avait permis de faire émerger plusieurs projets hydrogène sur le territoire réunionnais a été renouvelé en 2023. Cependant, les nouveaux critères de candidature et de sélection des dossiers de cet AAP national (Capacité de l'électrolyseur > 2MW, projets classés selon le critère "tonnes de CO2 évitées par euro de subvention de l'ADEME") ne sont pas favorables aux projets en Outre-Mer, territoires de petite taille et isolés où les coûts liés à l'énergie sont élevés. Un APP spécifique à l'Outre-Mer pourrait paraître au cours de l'année. A noter également que l'ADEME peut apporter une **aide pour le financement d'études d'opportunités et de faisabilité du déploiement de l'hydrogène sur le territoire**.

Par ailleurs l'appel à manifestation d'intérêt « **Compétences et métiers d'avenir** », opéré par la Banque des Territoires et l'Agence Nationale de la Recherche a également été renouvelé en Mai 2023. Il permet de financer des projets de formation jusqu'à 70% et des diagnostics de besoins en compétences et formation sur les thématiques de France 2030 dont l'hydrogène fait partie.

Le dispositif **France 2030 régionalisé**, financé à parité par l'état et la Région Réunion peut également apporter une aide pour des projets d'innovation ou des projets de structuration de filières.

5.4 Formation

Les acteurs locaux ont de bonnes connaissances générales sur l'hydrogène, assurent une veille constante sur les technologies, participent à des conférences et salons. Néanmoins, la gestion du risque hydrogène n'est pas partagée par tous (distances de sécurité, atmosphères explosives (ATEX), Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE)).

Le déploiement de premiers projets sur le territoire permettra la formation des agents sur le terrain. A ce jour, il n'existe que peu de formations initiales à l'hydrogène en France. Les techniciens, opérateurs et ingénieurs sont essentiellement formés en entreprises grâce à des modules spécifiques. Il s'agit de rajouter une « coloration hydrogène » à des formations existantes.

Dans son livre blanc Compétences métiers [France Hydrogène, 2021], France hydrogène répertorie 84 métiers avec des niveaux de spécialisation dans l'hydrogène plus ou moins importants. Parmi ces métiers, plus de la moitié concernent la conception et la fabrication d'équipements hydrogène, en lien avec l'objectif de développement d'une filière française de l'électrolyseur. Le tableau 3 liste les 28 métiers qui concernent l'exploitation et la maintenance des équipements hydrogène (métiers à développer sur le territoire réunionnais). Parmi ces métiers, seuls 5 nécessitent des connaissances avancées sur l'hydrogène, 2/3 nécessitent des connaissances de base sur l'hydrogène et 1/6 aucune connaissance spécifique.

Expertise sur l'hydrogène	Connaissances de base sur l'hydrogène	Pas de connaissances particulières
Ingénieur R&D Ingénieur électrique Ingénieur de maintenance Ingénieur d'exploitation Ingénieur sûreté, risques*	Ajusteur-Monteur Chauffeur de bus hydrogène Conducteur de camions hydrogène* Ingénieur automaticien* Ingénieur génie climatique Ingénieur généraliste Monteur Assembleur Opérateurs de production sur sites industriels Plombier chauffagiste Réparateur de matériel ATEX* Soudeur* Technicien automaticien * Technicien chimiste* Technicien de maintenance* Technicien gaz* Technicien mécanicien Technicien mise en service Tuyauteur-Canalisateur*	Electromécanicien* Electronicien de puissance Electrotechnicien Ingénieur data Technicien électricité

*certificats demandés : ATEX, HAZOP, HAZID ou ADR

Métiers en rouge : métier en tension (difficultés de recrutements)

TABLEAU 3 – Liste des métiers hydrogène concernant l'exploitation et la maintenance des équipements

6 Conclusion

L'hydrogène est un vecteur énergétique qui présente de nombreuses spécificités et intérêts dans le cadre de la nécessaire transition énergétique, écologique, économique et sociétale. Sa haute densité énergétique lui confère une capacité de recharge rapide si l'on s'intéresse à des applications dans le domaine de la mobilité. Par ailleurs, sa réaction électrochimique contrôlée, dans une pile à combustible à hydrogène, produit de l'électricité, de la chaleur et de l'eau, autant de produits aisément valorisables dans des applications mobiles et stationnaires. Enfin, sa production peut être envisagée à partir de ressources d'origine renouvelable (électricité verte alimentant un électrolyseur, biomasse) et est donc possiblement très peu impactante sur l'environnement.

La France s'affirme aujourd'hui comme l'une des places fortes sur le sujet hydrogène en Europe. Elle s'est munie d'une stratégie nationale dotée de plus de 9 Mds € pour déployer largement la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et ses usages. La dynamique est en route, associant de nombreux acteurs, des TPE aux grands groupes industriels, et devrait permettre d'ici 2030 un large déploiement de l'hydrogène associé à une rentabilité et une forte diminution de la dépendance aux énergies fossiles.

L'hydrogène décarboné est donc appelé à être l'un des principaux vecteurs énergétiques permettant, en substitution des énergies fossiles, la transition énergétique. Ce rapport de l'état des lieux de la filière hydrogène confirme l'intérêt stratégique de l'hydrogène sur le territoire réunionnais, notamment vis-à-vis de l'insularité du territoire et des objectifs de souveraineté énergétique souhaités. Produit à partir de ressources renouvelables locales, l'hydrogène pourra notamment permettre une intégration massive de ressources renouvelables intermittentes dans le mix électrique réunionnais et participer au développement d'une mobilité zéro émission.

Le développement de l'hydrogène sur le territoire réunionnais devrait également permettre une montée en compétence de l'île sur un secteur à fort potentiel d'emploi (environ 1500 postes possiblement attendus d'ici à 2030 pour les activités en lien avec l'hydrogène à l'échelle de la Réunion), et déboucher sur de potentiels nouveaux marchés dans la périmètre de l'océan indien (exportation d'hydrogène vers les territoires environnant, mutualisation de filières de production, maintenance et recyclage/valorisation positionnés à la Réunion).

La mobilisation des acteurs réunionnais lors de cette phase d'état des lieux montre une bonne dynamique sur le territoire. Lors des Plénières de la Fédération de Recherche du CNRS qui ont eu lieu du 22 au 26 mai 2023 à Saint-Gilles-Les-Bains, plus de 120 chercheurs et une trentaine d'acteurs réunionnais se sont mobilisés. Cet événement national a permis de faire le point sur les recherches en cours et à venir sur les dispositifs liés à l'hydrogène et a permis des échanges fructueux entre les différents organismes de recherche nationaux et les industriels locaux.

Ainsi, le présent rapport constitue le livrable de la phase 1 « Etat des lieux » de la mission hydrogène confiée par la Région Réunion à la SPL Horizon Réunion. Les données collectées lors de cet état des lieux permettront d'alimenter plusieurs scénarios de déploiement de l'hydrogène sur le territoire (Phase 2). Ces scénarios seront ensuite analysés et approfondis pour élaborer une stratégie de déploiement de l'hydrogène à La Réunion à l'horizon 2030-2035 (Phase 3).

A Annexes

A.1 Quelques chiffres sur l'hydrogène

hydrogène dans le monde [IEA, 2022] [Plan H2, 2018]	
Production d'hydrogène en 2021 dans le monde	94 Mt
Dont hydrogène décarboné	1%
Production d'hydrogène en 2030 selon les estimations de l'AIE	130 Mt
Objectif de déploiement d'électrolyseurs en 2030 en France	6,5 GW
Données techniques H2 [ADEME, 2022] [France Hydrogène, 2023]	
Consommation électrique d'un électrolyseur	56 kWh/kg d'H2
Consommation en eau d'un électrolyseur	10-20L/kg d'H2
Electricité fournit par une PAC pour 1 kg d'H2	16 kWh/kg d'H2
Rendement de la chaîne H2 power-H2-power	27%
Pression de l'hydrogène en sortie d'électrolyseur	30 bars
Masse volumique de l'H2 à température et pression normale	0,09kg/m ³
Masse volumique de l'H2 gazeux à 700 bars	42kg/m ³
Masse volumique de l'H2 liquide à -253°	71kg/m ³
Secteur énergétique réunionnais [OER, 2021]	
Consommation d'énergie finale en 2021	1 012 ktep
Part des transports dans la consommation d'énergie finale en 2021	63%
Part de l'électricité dans la consommation d'énergie finale en 2021	23%
Objectif de consommation d'énergie finale en 2028	785 ktep
Taux de dépendance énergétique de La Réunion en 2021	88%
Part des transports dans les émissions de CO2 de l'île en 2021	49%
Part de la prod. élec. dans les émissions de CO2 de l'île en 2021	46%
Energies renouvelables [PPE, 2022] [OER, 2021]	
Taux d'intégration des ENR dans le mix électrique en 2021.	30%
Taux d'intégration des ENR dans le mix électrique. Objectif 2023.	99%
Facteur de charge du photovoltaïque à La Réunion en 2021	14%
Seuil de déconnexion des énergies intermittentes. Objectif 2028	55%
Objectif cumulé de développement du photovoltaïque en 2028 ^a	440-500 MW
Objectif cumulé de développement de l'éolien terrestre en 2028	92 MW
Objectif cumulé de développement de l'éolien off-shore en 2028	0-40 MW
Objectif cumulé de développement de la géothermie en 2028	0-5 MW
Infrastructures H2 [France Hydrogène, 2021] [MEFSIN, 2021]	
Production journalière d'un électrolyseur d'1MW	400kg d'H2
Coût d'un électrolyseur	1000 à 2500 €/kWh
Estimation de la baisse des coûts des électrolyseurs à l'horizon 2030	-70%
Rendement d'un électrolyseur	60 à 85%
Durée de vie d'un électrolyseur	120 000h

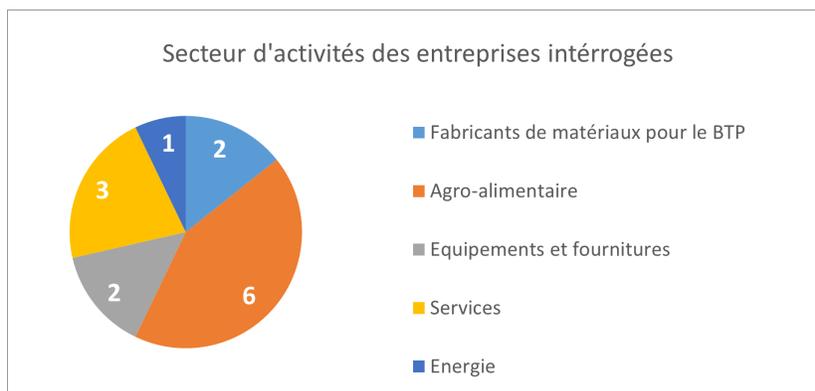
TABLEAU 4 – Chiffres clefs H2

a. Objectifs fixés dans la Révision de la PPE publiée 2022

A.2 Synthèses des réponses diffusées aux membres de l'ADIR "Avez-vous pensez à l'hydrogène pour décarboner vos activités ?"

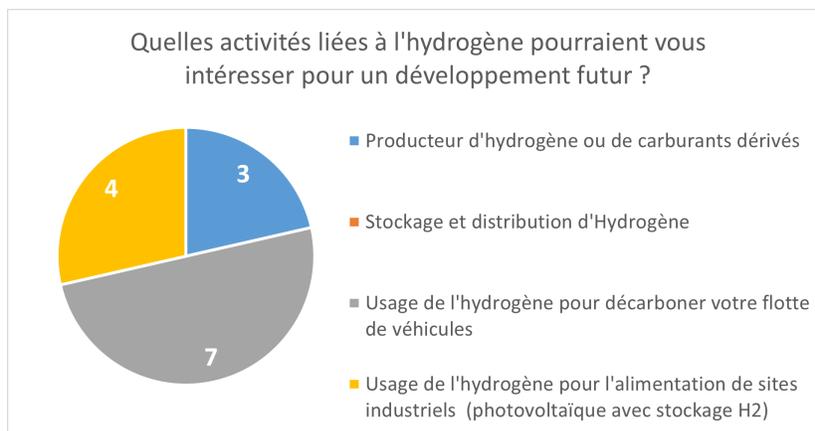
Lien du formulaire : <https://forms.office.com/r/zj4rxevUWf>

Dix réponses ont été collectées parmi les membres de l'ADIR, essentiellement par des PME dans le secteur de l'agro-alimentaire et des services.



Parmi les acteurs interrogés, un seul manipule de l'hydrogène dans le cadre de ses activités industrielles (conditionnement et revente). L'ensemble des acteurs interrogés sont néanmoins intéressés pour intégrer l'hydrogène dans leurs activités futures :

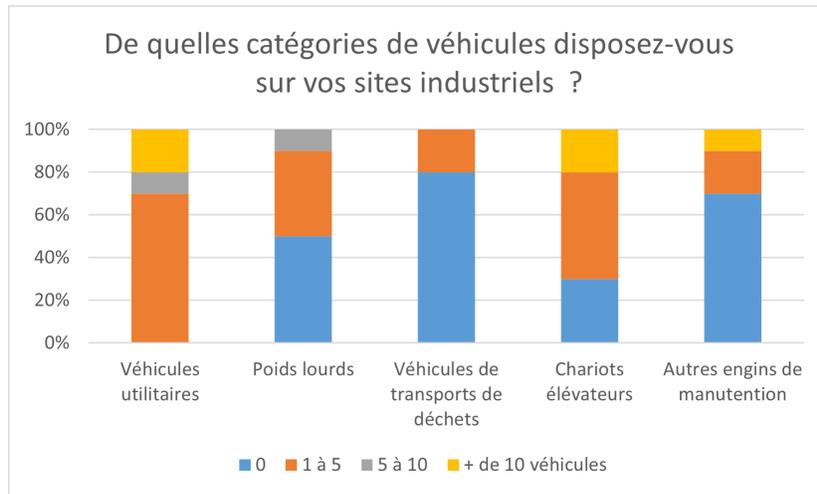
- 70% des acteurs interrogés se disent intéressés par un usage de l'hydrogène comme carburant pour décarboner leur flotte de véhicules
- 40% des acteurs interrogés se disent intéressés pour un usage de l'hydrogène comme solution de stockage, couplé à du photovoltaïque par exemple, pour l'alimentation électrique de sites industriels
- 30% des acteurs interrogés pourraient s'intéresser à la production d'hydrogène ou de carburants dérivés



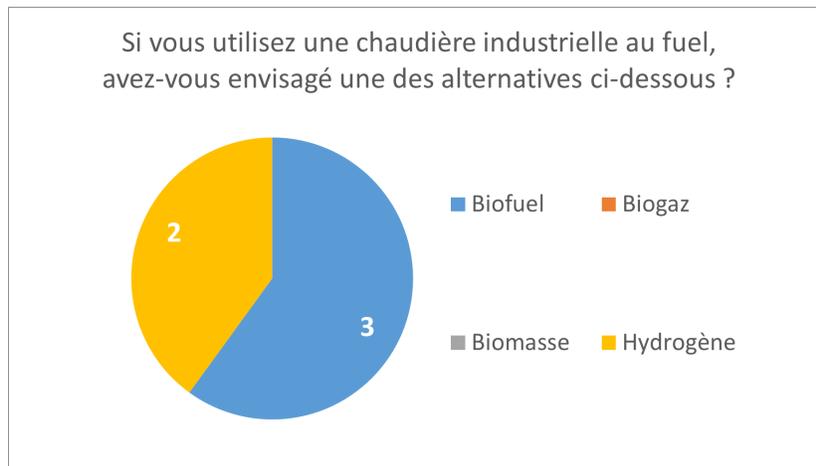
Concernant les flottes de véhicules des industriels interrogés, les éléments suivants peuvent être notés :

- Tous les acteurs interrogés possèdent des véhicules utilitaires légers. Sur ce type de véhicules, l'hydrogène ne serait pertinent que si les usages sont intensifs (plus de 250 km/j).
- Aucun n'acteur ne possède une flotte de plus de dix poids-lourds. Pour un passage à l'hydrogène de ces véhicules, une mutualisation des infrastructures avec d'autres industriels pourrait permettre de générer des économies d'échelle.

— Plus de 70% des acteurs interrogés possèdent des chariots élévateurs, dont certains en grande quantité. Ici aussi une mutualisation pourrait être envisagée.



Parmi les alternatives envisagées aux chaudières au fuel, l'hydrogène est cité deux fois, les biofuels et autres dérivés, comme les graisses animales sont cités trois fois.



A.3 Quel impact sur le réchauffement climatique des fuites d'hydrogène ?

Une source d'interrogation provient du fait que le Dihydrogène, plus petite molécule connue sur Terre, pourrait facilement s'échapper dans l'atmosphère. Par exemple, des rejets de Dihydrogène dans l'air peuvent se produire lors d'opérations de purge ou lors de son transport, notamment si le Dihydrogène est injecté dans les réseaux de gaz actuels où des fuites de méthane ont déjà été constatées.

Or, si le Dihydrogène n'est pas un gaz à effet de serre, certaines études récentes montrent qu'il peut avoir des effets indirects sur le réchauffement du climat. En effet, une faible portion du Dihydrogène émis dans l'air (30%), peut, suite à un ensemble de réactions chimiques, conduire à la formation de gaz à effet de serre comme le méthane, l'ozone ou la vapeur d'eau (notamment lors de la combustion d'hydrogène à haute altitude pour un avion à hydrogène). Cependant, en l'absence de données empiriques, il est à ce jour difficile de quantifier les fuites de Dihydrogène et donc les émissions de GES qui en résulteraient.

Une étude publiée dans "Atmospheric Chemistry and Physics" [Ocko and Hamburg, 2022] montre que la contribution de l'hydrogène vert au réchauffement climatique pourrait être sous-estimée à court terme, notamment dans le débat public où l'hydrogène est présenté comme ayant une contribution nulle au réchauffement climatique. Cependant, dans le cas de l'hydrogène vert, cette contribution reste très largement inférieure aux solutions fossiles équivalentes, y compris dans les pires scénarios de fuite envisagés où l'hydrogène ne permettrait de réduire "que" de 60% la contribution au réchauffement global par rapport aux solutions fossiles (cf. Figure 14).

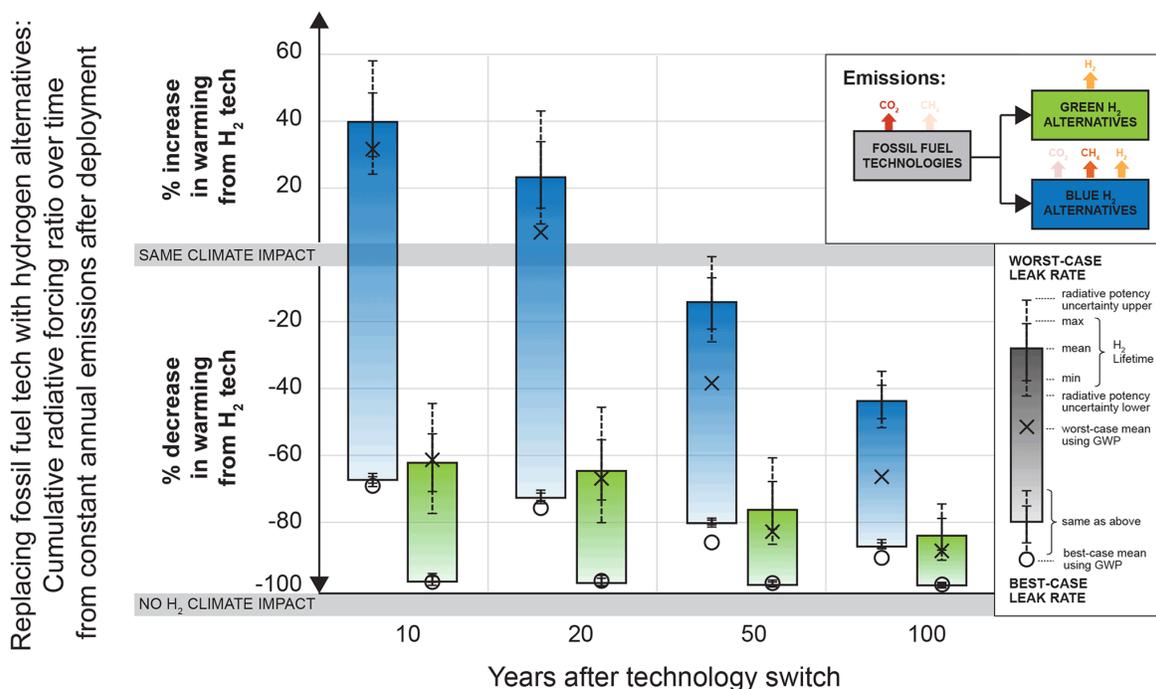


FIGURE 14 – Impact sur le changement climatique de l'hydrogène vert et bleu [Ocko and Hamburg, 2022]

Références

- [ADEME, 2020] ADEME (2020). *Etude de la valeur des solutions Hydrogène dans les ZNI*.
- [ADEME, 2022] ADEME (2022). *Rendement de la chaîne hydrogène*.
- [EDF, 2022] EDF (2022). *BILAN PRÉVISIONNEL de l'équilibre offre-demande d'électricité à La Réunion*.
- [Encyclopédie de l'énergie, 2016] Encyclopédie de l'énergie (2016). *La production d'Hydrogène vert*.
- [European Council, 2023] European Council (2023). *Council and Parliament reach provisional deal on renewable energy directive*.
- [France Hydrogène, 2021] France Hydrogène (2021). *Livre Blanc Compétences-métiers de la filière Hydrogène*.
- [France Hydrogène, 2023] France Hydrogène (2023). *Fiche 3.2.1 Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau*.
- [H2 mobile, 2021] H2 mobile (2021). *Avec ses électrolyseurs haute température, Genvia veut révolutionner l'hydrogène*.
- [Hydrogen Council, 2021] Hydrogen Council (2021). *Hydrogen Insights 2021*.
- [IEA, 2021] IEA (2021). *Electrolysers*.
- [IEA, 2022] IEA (2022). *Global Hydrogen Review 2022*.
- [IEA, 2023] IEA (2023). *Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity*.
- [IRENA, 2020] IRENA (2020). *Green Hydrogen. A guide to policy making*.
- [Les Echos, 2022] Les Echos (2022). *Biofuel Réunion veut structurer la collecte des huiles de friture pour fabriquer du biocarburant*.
- [L'usine Nouvelle, 2022] L'usine Nouvelle (2022). *Des avancées majeures pour Airbus et son avion à hydrogène*.
- [L'Usine Nouvelle, 2023] L'Usine Nouvelle (2023). *De l'hydrogène blanc dans le bassin houiller lorrain*.
- [Mc Kinsey, 2022] Mc Kinsey (2022). *Decarbonizing the aviation sector: Making net zero aviation possible*.
- [MEFSIN, 2021] MEFSIN (2021). *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France*.
- [Norouzi, 2021] Norouzi, N. (2021). *Assessment of technological path of hydrogen energy industry development : A review. Iranica Journal of Energy and Environment, 12 :1–12*.
- [Ocko and Hamburg, 2022] Ocko, I. B. and Hamburg, S. P. (2022). *Climate consequences of hydrogen emissions. Atmospheric Chemistry and Physics, 22(14) :9349–9368*.
- [OER, 2021] OER (2021). *Bilan Énergétique de La Réunion. SPL Horizon Réunion*.
- [Plan H2, 2018] Plan H2 (2018). *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*.
- [PPE, 2022] PPE (2022). *Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2028*.