

ÉTAT DES LIEUX DE LA FILIÈRE HYDROGÈNE À LA RÉUNION

ANNÉE 2024

Table des matières

Etat des lieux de la filière Hydrogène à La Réunion	1
1- Introduction	4
1.1 De la découverte de l'hydrogène à son utilisation industrielle aujourd'hui	4
1.2 L'hydrogène vert dans le contexte de la transition énergétique	4
1.3 Un intérêt croissant dans le monde	5
2- Quelques données techniques sur l'hydrogène.....	7
2.1 Méthode de production de l'hydrogène et couleurs associées	7
2.2 Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau	8
2.3 Coût de production de l'hydrogène vert	8
2.4 L'hydrogène comme source d'énergie	10
3- Production et usages potentiels de l'hydrogène vert à La Réunion.....	12
3.1 Quel intérêt de l'hydrogène par rapport aux objectifs énergétiques du territoire ?.....	12
3.2 Potentiels de production d'hydrogène vert à La Réunion	13
3.3 Usages de l'hydrogène comme matière première pour l'industrie	15
3.4 Usages de l'hydrogène comme carburant pour la mobilité routière.....	15
3.5 L'hydrogène pour décarboner les usages non électrifiables dans le secteur maritime et aérien	18
3.6 Usage de l'hydrogène comme solution de stockage pour la production d'électricité...	19
4- Quelle dynamique hydrogène sur le territoire réunionnais ?	20
4.1 Projets industriels identifiés	20
4.2 Projets de recherche	21
4.3 Acteurs rencontrés	22
4.4 Guichets de financements des projets hydrogène	25
4.5 Formation	26
5- Conclusion	27
Annexes.....	29
A1 Quelques chiffres sur l'hydrogène	29
Bibliographie	31

Table des figures

Figure 1 - Chiffres et faits sur l'hydrogène [15]	4
Figure 2 - – Production d'hydrogène décarboné annoncée à l'Horizon 2030. MT p.a. : Millions de tonnes par an [2]	5
Figure 3 - État des lieux des stratégies hydrogène dans le monde. Source : © Mikaa Mered (Janvier 2023)	6
Figure 4 – Les couleurs de l'hydrogène [17]	7
Figure 5 – Cellule d'électrolyse [16]	8
Figure 6 - Principales caractéristiques des électrolyseurs commercialisés et au stade d'étude en 2023. Tableau réalisé par Energies Réunion à partir des données de différentes sources [18] [19] [9] [20]	10
Figure 7 - Quelques éléments sur les méthodes de stockage de l'hydrogène. Tableau réalisé par la Energies Réunion à partir de données issues de différentes sources [1] [9]	11
Figure 8 - Conversion de l'hydrogène en composés dérivés azotés ou carbonés. Source : Global Alliance Powerfuels	12
Figure 9 - Consommation de carburants routiers à La Réunion	15
Figure 10 - – Perspectives de réduction des émissions de CO2 dans le secteur aérien [11]	18
Figure 11 - Comparaison de différents systèmes de propulsion hydrogène. Tableau réalisé par la Energies Réunion à partir des données collectées dans l'état des lieux	19
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 [12]	20
Figure 13 - Projets recensés sur le territoire réunionnais en mai 2023. Les projets confidentiels sont exclus. PV = photovoltaïque. PAC = Pile A Combustibles.	21

1- Introduction

1.1 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).

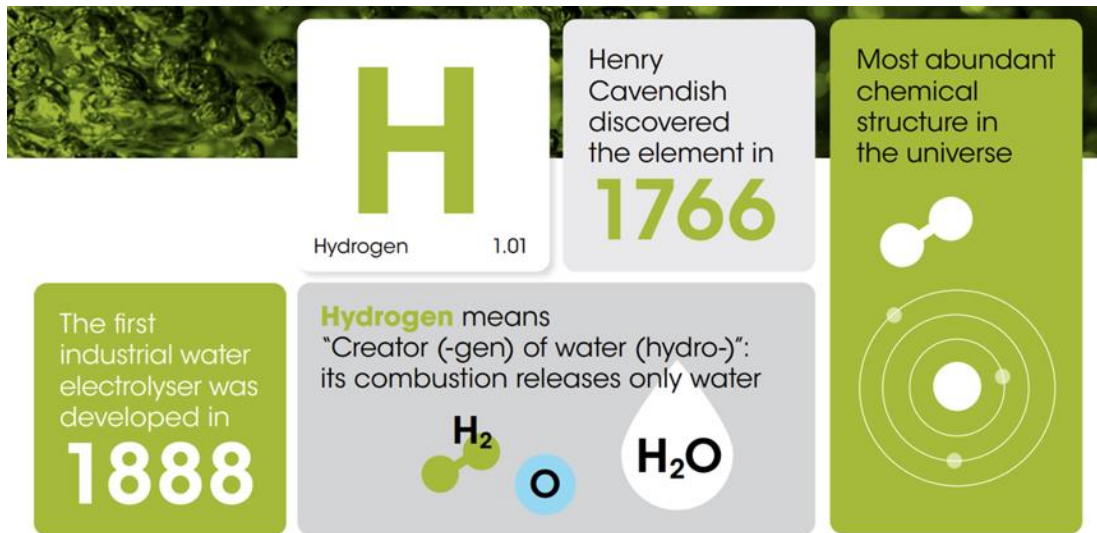


Figure 1 - Chiffres et faits sur l'hydrogène [15]

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 [1]. En 2023, la demande mondiale en hydrogène a principalement portée sur le raffinage pétrolier (33 %), la production d'ammoniac (27%) et de méthanol (11%) et la production d'acier (3%) [1].

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

L'hydrogène apparaît aujourd'hui comme une alternative prometteuse pour la transition énergétique car, s'il est d'origine renouvelable ou naturelle, **son utilisation ne génère pas d'émission directe de CO₂ ou autre polluant**¹. L'hydrogène peut servir de matière première pour la synthèse de 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

¹ Cf Annexe A1

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 [1], soit les émissions combinées du Royaume-Uni et de l'Indonésie. Cela représente environ 10 tonnes de CO₂ pour 1 tonne d'hydrogène produite.

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

1.3 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 240 GW à l'horizon 2030 [1]. Selon l'étude réalisée en 2023 par Mc Kinsey sur demande de Hydrogen Council [2], la production d'hydrogène décarboné atteindrait 45 millions de tonnes à l'horizon 2030, L'hydrogène vert représenterait 70 % de la production prévue d'ici 2030 avec 32 millions de tonnes (cf Figure 2).

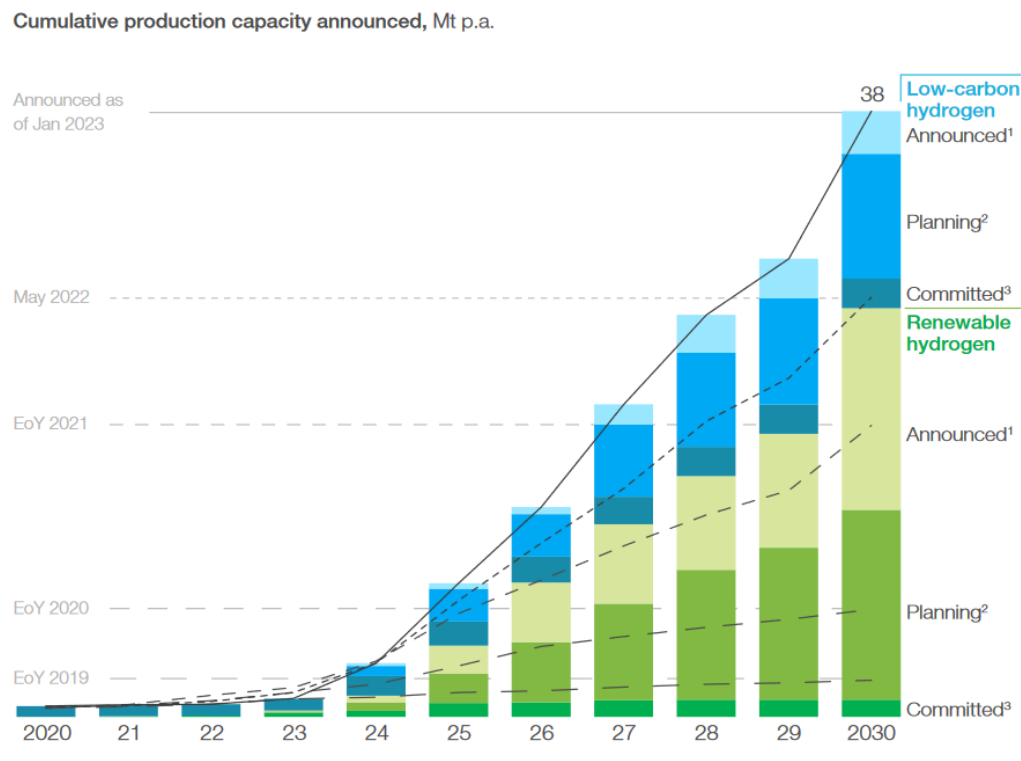


Figure 2 - Production d'hydrogène décarboné annoncée à l'Horizon 2030. MT p.a. : Millions de tonnes par an [2].

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).

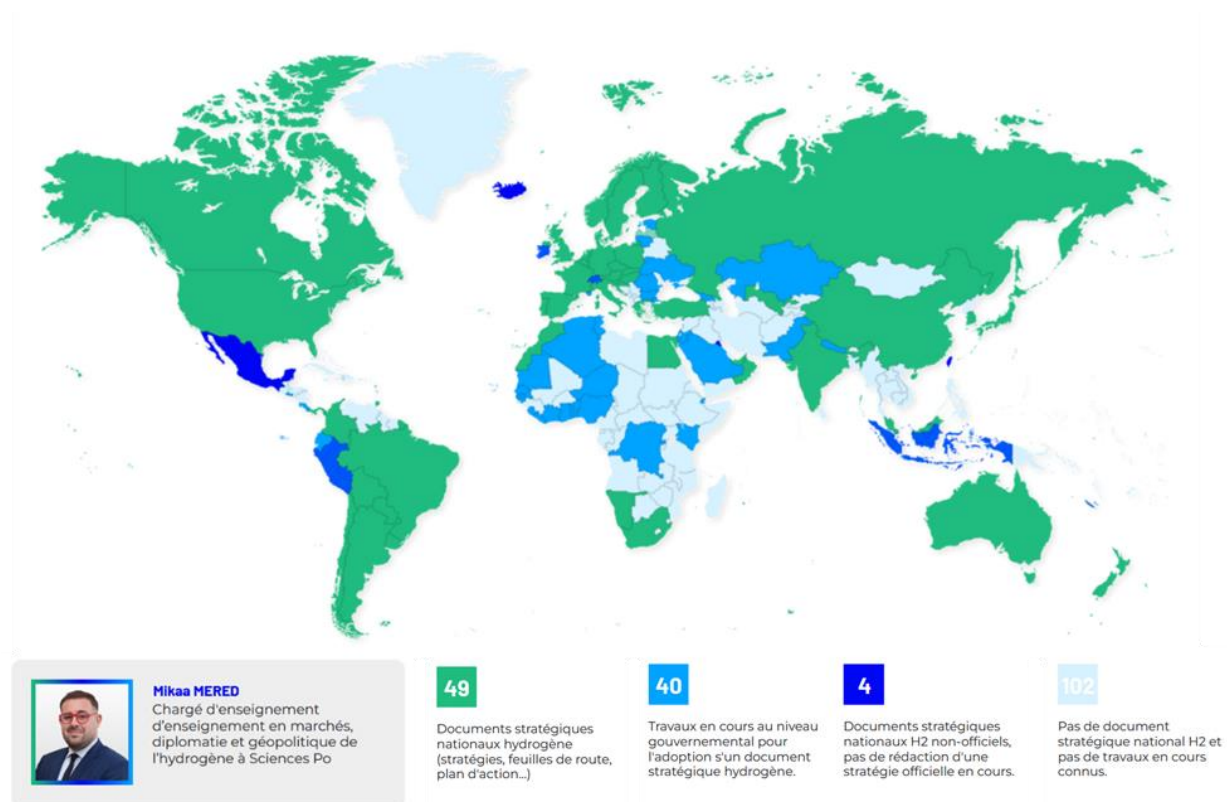


Figure 3 - État des lieux des stratégies hydrogène dans le monde. Source : © Mikaa Mered (Janvier 2023)

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 2020², fixe trois priorités [3]:

- 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.

² En cours de révision

2- Quelques données techniques sur l'hydrogène

2.1 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 CH_4 avec de la vapeur d'eau H_2O pour former de l'hydrogène et du CO_2) 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 (O_2) et le Dihydrogène (H_2)**. 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.

D'autres couleurs peuvent qualifier l'hydrogène, selon sa méthode de production, même si ces nomenclatures ne sont pas toujours officielles (cf Figure 4). 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

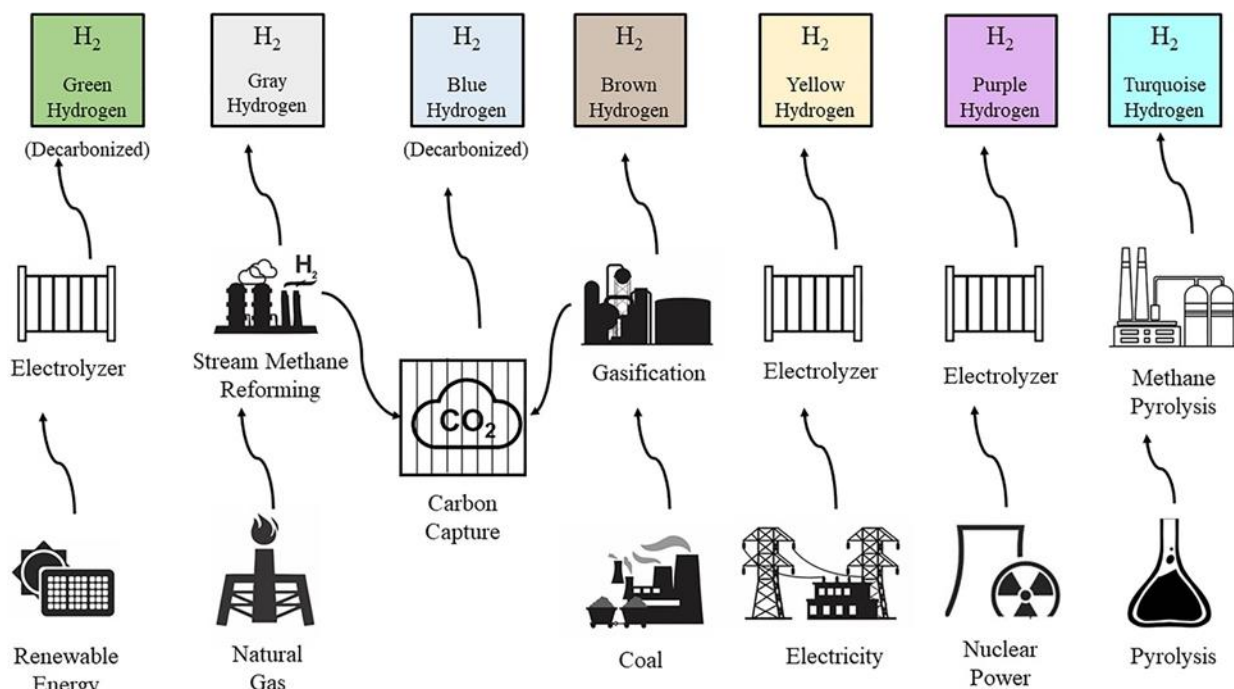


Figure 4 – Les couleurs de l'hydrogène [17]

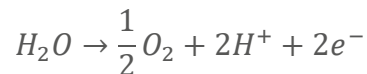
lorrain où le gisement pourrait atteindre 46 milliards de tonnes (soit la moitié de la production mondiale annuelle d'hydrogène) [4].

2.2 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)
- 2- Un électrolyte qui permet la circulation des ions. Il est étanche au gaz pour empêcher le mélange du dihydrogène et du dioxygène produits.
- 3- Une alimentation en eau (environ 10L pour produire 1kg d'H2 [5])

Demi-réaction à l'anode :



Demi- réaction à la cathode :



Réaction globale :

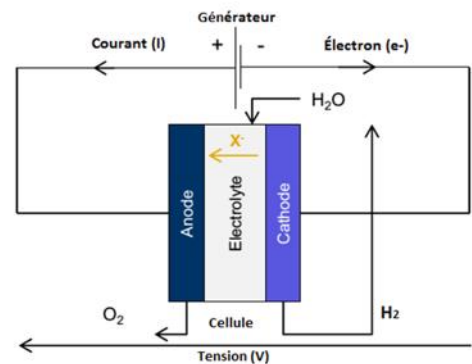
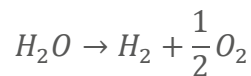


Figure 5 – Cellule d'électrolyse [16]

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 figure 6 résume les principales caractéristiques, avantages et inconvénients de principaux électrolyseurs commercialisés ou au stade d'étude aujourd'hui.

2.3 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 [1]. A ce titre, le coût de l'Hydrogène vert apparaît aujourd'hui encore structurellement plus élevé que celui de l'Hydrogène carboné. Le delta de prix est tel que, dans de nombreux cas, les industriels orientés performance et rentabilité délaissent le recours à l'H2 Vert au profit d'autres formes d'Hydrogène moins onéreux.

Cependant, à la suite de 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. Ce phénomène conjoncturel a permis à court terme à l'hydrogène vert de se rapprocher ponctuellement de la compétitivité des prix de l'Hydrogène carboné. Sur le long terme, l'équivalence de prix entre H2 vert et H2 carboné

reste toutefois à démontrer. On peut toutefois penser que **le développement massif de capacités renouvelables et le besoin de sécurité énergétique pourraient 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 [3].

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 Energies Réunion à partir des données de différentes sources [18] [19] [9] [20]

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 Figure 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.

2.4 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 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 (9kg/m³), 10000 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. L'hydrogène gazeux présente des défis techniques et des risques liés aux fuites en raison de ses propriétés physiques uniques. Sa très faible densité et sa capacité à diffuser rapidement à travers de nombreux matériaux rendent son confinement complexe. Quelques éléments sur le stockage d'hydrogène sont donnés sur la Figure 7.

Par ailleurs, l'hydrogène produit par électrolyse peut être recombiné 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). 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. [5]

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 hydruure 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 Energies Réunion à partir de données issues de différentes sources [1] [9]

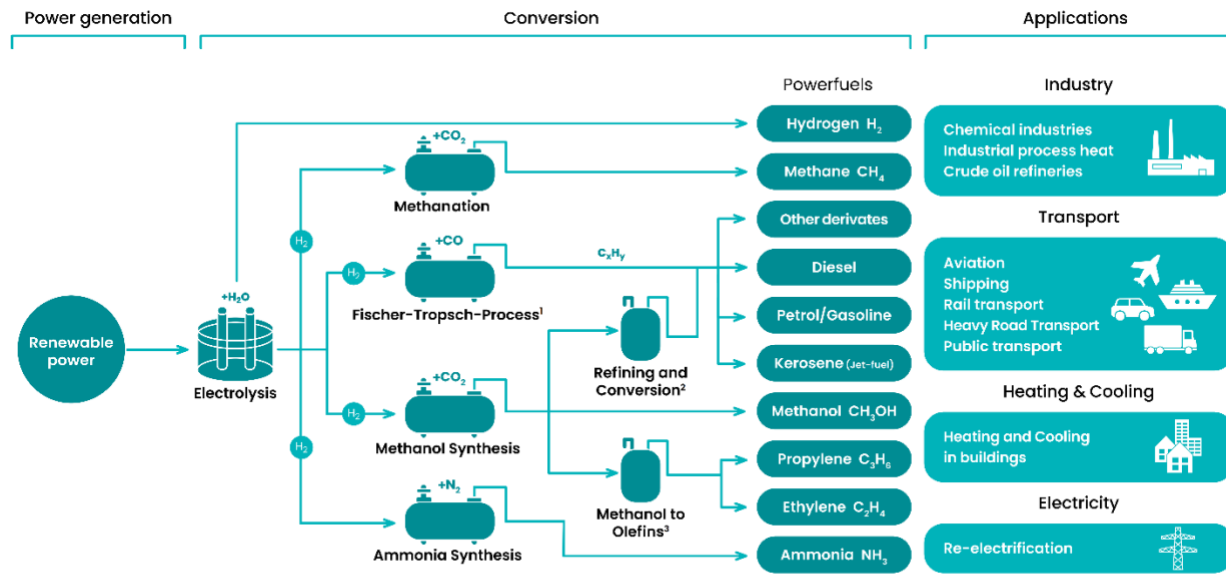


Figure 8 - Conversion de l'hydrogène en composés dérivés azotés ou carbonés. Source : [Global Alliance Powerfuels](#)

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

3.1 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 44% et 56% de la consommation de combustibles fossiles en 2022 [6]. Avec un taux de dépendance énergétique de 85% en 2022, 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 œuvre de ces objectifs fixés dans la PPE de La Réunion devrait permettre de réduire à 69% la dépendance énergétique du territoire en 2028 [7].

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

Le mix électrique réunionnais est aujourd'hui très fortement carboné (591 gCO₂/kWh en 2022 [6]) tandis que la part des énergies renouvelables dans ce mix n'est que de 37% en 2022. Dès fin 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, qu'elles soient électrochimiques, gravitaires (station de transfert d'énergie par pompage) ou le Power-to-Gas-to-Power devront alors être déployées. Des études comparatives seront essentielles pour évaluer les avantages et inconvénients des différentes technologies de stockage mentionnées ci-dessus, en vue de leur déploiement en zone non interconnectée

A noter que le plan hydrogène national, identifie les ZNI comme territoires prioritaires pour le déploiement d'expérimentations de stockage hydrogène [8]:

« 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 d'une mobilité propre

Le secteur des transports est aujourd'hui responsable de l'émission de 2 millions de tonnes de CO2 à La Réunion, soit 36% des émissions de l'île [6]. 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 dont le déploiement industriel a déjà pris une part importante du marché, l'hydrogène pourrait à l'avenir se positionner en alternative, pour décarboner certains usages difficiles à électrifier comme le transport lourd (bus et 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.

3.2 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**.

À court terme, **le photovoltaïque** apparaît comme la technologie la plus robuste pour produire de l'hydrogène par électrolyse à La Réunion. Toutefois, cette solution présente certaines limites, notamment un facteur de charge relativement faible (14,2 % à La Réunion [6]) et production électrique importante pour produire de l'hydrogène (55 kWhe par kilogramme [9]). En conséquence, la surface de panneaux photovoltaïques requise serait significative. Par exemple, pour alimenter deux bus à hydrogène, il faudrait déployer une centrale photovoltaïque d'environ 900 kWc, soit l'équivalent d'un à deux terrains de football (environ 1 hectare). Afin de réduire l'emprise au sol, une alternative pertinente consisterait à privilégier l'installation des panneaux sur des toitures existantes, telles que celles des bâtiments, des ombrières de parkings ou encore des serres agricoles.

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 A1). Ainsi, à l'horizon 2028, **l'éolien off-shore** représenterait un potentiel

pertinent pour la production d'hydrogène (turbines de plusieurs MW) à condition de réaliser les développements nécessaires et lever les contraintes réglementaires 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 aux fonctionnements des électrolyseurs.

A noter également que d'autres technologies de production d'hydrogène renouvelable, sans électricité, feront l'objet d'études R&D&I sur le territoire comme :

- La **pyrogazéification** de la biomasse ou de déchets (déchets verts, plastiques non-recyclés, déchets ménagers et autres). 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.
- Les procédés hybrides couplant biocatalyseur et électrolyse à membrane solide

Les technologies thermochimiques (gazéification & reformage de biomasse) sont les plus avancées (TRL 7-9), tandis que les approches biologiques pures (photobiologique, fermentation) sont encore en phase de recherche (TRL 3-6). La bioélectrolyse microbienne se situe à un niveau intermédiaire (TRL 5-7) et représente une option prometteuse.

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. Par ailleurs, un électrolyseur peut être piloté afin d'apporter au système électrique une certaine flexibilité (effacement).

3.3 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 utilisée comme matière première dans l'industrie [3].

Or à La Réunion, la **demande d'hydrogène pour des clients industriels demeure à ce jour très circonscrite voire anecdotique**, 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 3.4).
- L'alimentation autonome de certains sites (entrepôts, bâtiments industriels) (cf Section 3.5).
- La production de chaleur (chaudière H₂).
- La production de carburants de synthèse pour le secteur maritime (cf Section 3.4).

3.4 Usages de l'hydrogène comme carburant pour la mobilité routière

A La Réunion, le transport routier et aérien représente respectivement 36% et 16% des émissions de CO₂ de l'île [6]. 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.).

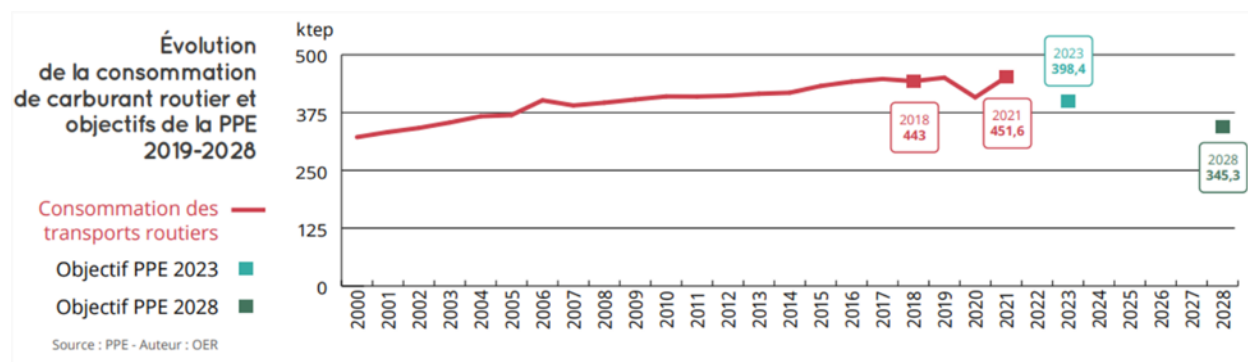


Figure 9 - Consommation de carburants routiers à La Réunion

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 2.4).

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) [7]. 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%) [10]. 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).

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 jour, satisfaire les contraintes opérationnelles à savoir :

- Assurer une recharge rapide pour des véhicules effectuant des déplacements intensifs : véhicules de livraison et de transport lourd, engins de manutention ayant des besoins en recharge rapide.
- 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.
- Assurer les besoins d'autonomie et une consommation énergétique importants de certains véhicules lourds de transport de marchandises ou de personnes tels que des poids lourds, des véhicules de transport de passagers ou bennes à ordures ménagères. Transports pour lesquels la solution électrique à batteries présente encore aujourd'hui quelques fragilités, fragilité qui pourraient néanmoins s'estomper avec les progrès technologiques des solutions 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.

La Réunion, le véhicule à hydrogène aurait 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 inflammabilité. 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 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 pour lesquels le véhicule présente un espace embarqué 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 [Rolls-Royce](#). 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 pallier les 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. 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, la ressource biomasse locale reste très limitée et l'import de biocarburants serait alors nécessaire pour couvrir l'ensemble des besoins de la filière.

3.5 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.

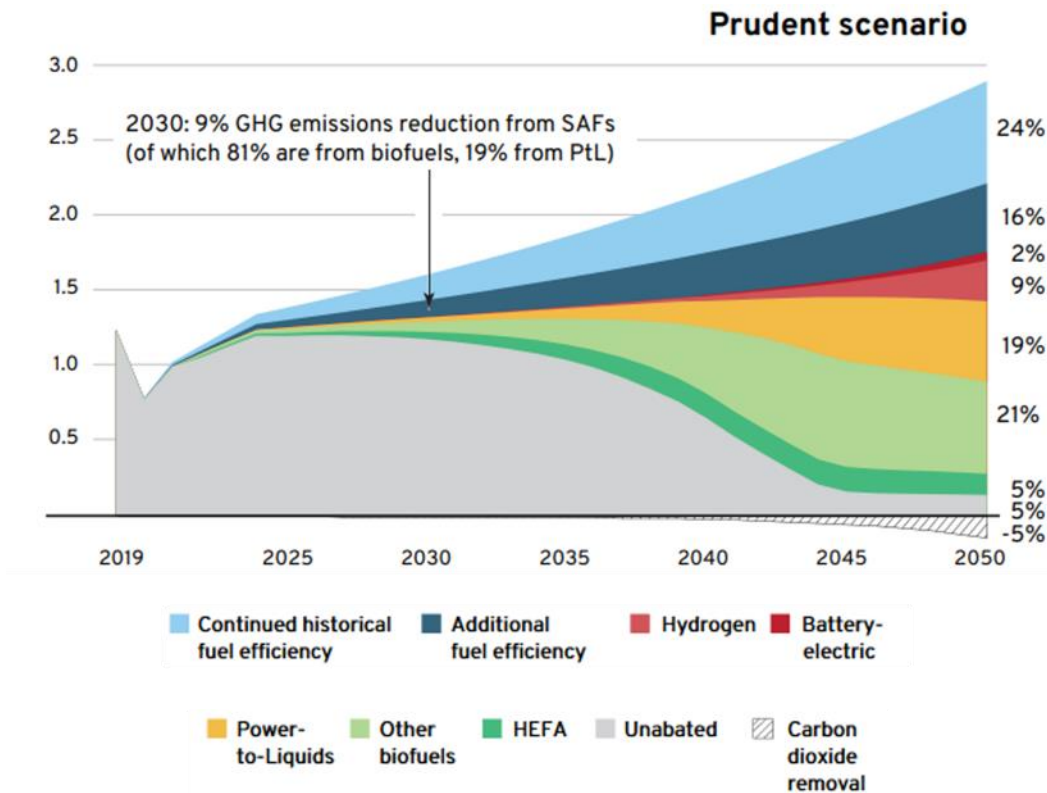


Figure 10 -- Perspectives de réduction des émissions de CO2 dans le secteur aérien [11]

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).

Selon une étude de Mc Kinsey [11], 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) :

- Les avions à propulsion hydrogène. Airbus envisage une commercialisation de premiers avions à hydrogène à l'horizon 2035 ([usine nouvelle 22](#)) pour les petits et moyens courriers (moteurs électriques alimentés par une pile à combustible ou turboréacteurs à hydrogène liquide).
- 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 2.4) 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, son stockage occupe donc un volume plus important que les carburants traditionnels. Or, la place des composants embarqués est limitée dans un navire ou un avion. L'enjeu pour déployer l'hydrogène dans ces secteurs est donc d'optimiser le stockage de l'hydrogène tout en respectant certaines contraintes de sécurité (cf Section 2.4). Une comparaison des différents systèmes de propulsion hydrogène est donnée dans le Tableau ci-dessous.

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

Figure 11 - Comparaison de différents systèmes de propulsion hydrogène. Tableau réalisé par la Energies Réunion à partir des données collectées dans l'état des lieux.

3.6 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, en combinant les conditions opératoires et environnementales nécessaires (pression, température), être conservée sur des durées très longues sans se dégrader là où une batterie électro-chimique se décharge progressivement avec le temps (phénomène d'autodécharge).

Ainsi, l'hydrogène pourrait être envisagé comme solution de stockage long terme 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 CEG, 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 navires à quais.

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 [12]. 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.

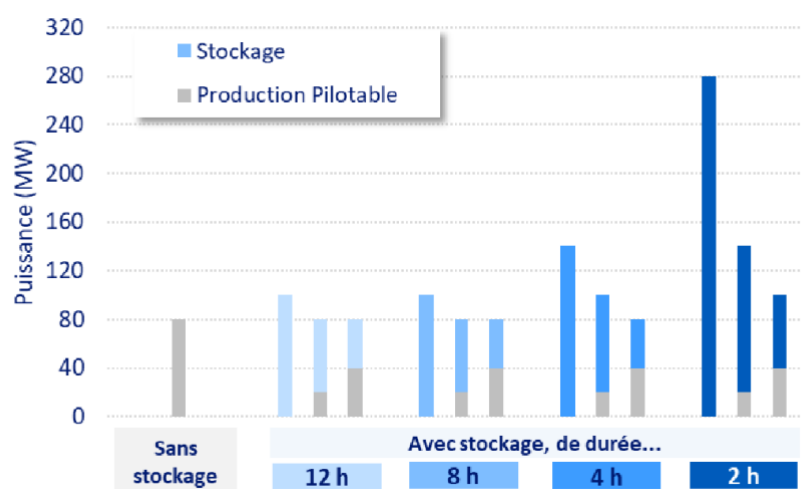


Figure 12 - Solutions de stockage (en bleu) en complément à de la puissance pilotable (0, 20 et 40 MW, en gris) pour plusieurs durées de stock. Figure issue du Bilan Prévisionnel de l'équilibre Offre-Demande publié par EDF en 2022 [12]

L'étude de l'ADEME sur la valeur des solutions H2 dans les Zones Non Interconnectées (ZNI) [13], 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.

4- Quelle dynamique hydrogène sur le territoire réunionnais ?

4.1 Projets industriels 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 était le premier projet hydrogène du territoire réunionnais, et était un précurseur pour la filière : c'était l'un des premiers projets pilotes en France. La partie hydrogène (électrolyseur et pile à combustible) n'est cependant plus en état de marche et a été démantelée suite à l'incendie de Juillet 2022. 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 valeur 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) [13].

Par ailleurs, à Sainte-Suzanne, le siège du SIDELEC accueille une station de charge hydrogène pour deux véhicules légers.

Enfin, 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 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).
- **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**
- **L'accompagnement au changement ainsi que la prise de risque économique et technique** des équipes tant décisionnaires que de terrain sur cette filière émergente et encore relativement confidentielle.

4.2 Projets de recherche

Entre 2018 et 2024, trois projets de recherche académiques sur le vecteur hydrogène ont été menés :

- **SysPàCRevers** a exploré la conception, l'optimisation et le test en temps réel d'un nouveau concept de pile à combustible réversible à trois chambres, capable de fonctionner à la fois comme électrolyseur et comme pile à combustible.
- **SPACE** s'est concentré sur l'analyse et le suivi du micro-réseau SAGES installé à Mafate La Nouvelle, ainsi que sur le développement d'une stratégie de diagnostic pour les électrolyseurs PEM fonctionnant à basse pression et basse température.
- **HyLES**, toujours en cours en 2024, étudie le rôle et les impacts de l'hydrogène dans la transition vers l'indépendance énergétique.

En parallèle, neuf thèses de doctorat soutenues à l'Université de La Réunion entre 2015 et 2024 ont été recensées. Principalement financées par le dispositif d'allocation régionale de recherche de la Région Réunion, elles portent sur les piles à combustible et les électrolyseurs PEM.

Intitulé	Descriptif	Livrables/objectifs	Financement	Stade du projet
SysPàC Rervers	Preuve de concept d'une pile à combustible réversible H2	Conception optimisation Banc de test Preuve de concept	FEDER	Réalisé
SPACE	Caractérisation système, piles à combustible, électrolyseur"	Suivi KPI du micro-grid Mafatais Stratégie de diagnostic E-PEM Modélisation et optimisation électrochimique	FEDER	Réalisé
HyLES	L'étude du rôle de l'hydrogène pour accompagner la transition vers l'indépendance énergétique de zones faiblement ou non interconnectées	Etude des contextes Intégration à l'échelle locale Etude de l'impact socio-économique	ANR	En cours

4.3 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 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**.

Lors des ateliers organisés par **Énergies Réunion pour le compte de la Région Réunion**, les acteurs énergéticiens ont soulevé la problématique d'une possible inadéquation entre l'offre et la demande en hydrogène. Cette situation rappelle, dans une certaine mesure, les défis rencontrés par la mobilité électrique dans les années 2010. À l'époque, le manque d'infrastructures de recharge freinait le développement d'une offre abondante de véhicules électriques, les constructeurs et les clients hésitant à s'engager en l'absence d'un réseau fiable. Parallèlement, les porteurs de projets d'infrastructures de recharge étaient confrontés à une demande encore insuffisante, limitant ainsi la rentabilité et le développement du réseau.

Aujourd'hui, ce problème est en passe d'être surmonté dans le secteur de l'électromobilité grâce à une planification proactive des pouvoirs publics, combinant soutien financier massif et incitations réglementaires pour l'installation des infrastructures et la promotion des véhicules électriques.

Toutefois, si une dynamique comparable semble à l'œuvre pour l'hydrogène, la situation présente des spécificités propres, en particulier dans un contexte insulaire. La structuration d'un écosystème hydrogène viable repose non seulement sur la mise en place d'une production et d'une distribution adaptées, mais aussi sur une vision industrielle de long terme. Conscients de ces enjeux, les énergéticiens du territoire encouragent les pouvoirs publics à anticiper et soutenir le développement de plusieurs grands projets industriels d'hydrogène, à la fois durables (**pensés sur une échelle d'au moins 20 ans**) et structurants (**reposant sur une dimension industrielle clairement affirmée, au-delà des expérimentations passées sur le territoire**). L'objectif serait d'amorcer une **véritable boucle de rétroaction positive**, où producteurs et consommateurs s'inscrivent dans un cercle vertueux, garantissant ainsi l'émergence d'un marché local de l'hydrogène plus robuste et pérenne.

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 4.1). 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 connaissance de base 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, accompagnement au changement des équipes décisionnaires et techniques...

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 pourraient à moyen ou plus long terme, devenir 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.

Cluster 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. Ils peuvent notamment appuyer la SPL Horizon Réunion sur (cf Tableau ci-dessous) :

- Le partage d'études ou de données, le recensement des besoins.

- La visibilité et la communication autour d'évènements en lien avec l'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)

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 la production d'hydrogène à partir de ressources locales. Les acteurs R&D souhaitent être inclus dans les phases de test des projets afin de participer aux mesures et analyse des données collectées.

4.4 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](#). Si à ce jour il n'existe pas de fiche thématique concernant les mobilités alternatives, ces sujets sont inclus dans le programme FEDER et pourraient permettre la création d'une nouvelle fiche action.

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 seraient pas favorables aux projets en Outre-Mer, territoires de petite taille et isolé où les coûts liés à l'énergie sont élevés. A noter également que l'ADEME peut cependant 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.

4.5 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 répertorie 84 métiers avec des niveaux de spécialisation dans l'hydrogène plus ou moins importants [14]. 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 ci-dessous 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)

5- 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 a souhaité ces dernières années se positionner comme un **leader européen dans le domaine de l'hydrogène.** Elle a ainsi lancé une stratégie nationale dotée de plus de 9 milliards d'euros pour favoriser la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et son déploiement à grande échelle. Bien que la courbe d'apprentissage soit encore en phase de

démarrage, l'implication d'acteurs divers, allant des petites entreprises aux grands groupes industriels, laisse entrevoir une dynamique positive. L'objectif d'ici 2030 est de renforcer l'implantation de l'hydrogène sur le marché, tout en travaillant sur une réduction progressive des coûts, bien que la compétitivité de l'hydrogène vert face aux autres sources d'énergie dominantes ne soit pas encore atteinte. Grâce à des avancées technologiques et à un déploiement massif, les coûts devraient néanmoins baisser. L'hydrogène pourrait ainsi participer à une diminution de la dépendance aux énergies fossiles, même si cette évolution risque d'être graduelle.

L'hydrogène décarboné est appelé à jouer un rôle croissant en tant que vecteur énergétique, contribuant à la transition énergétique en substituant progressivement les énergies fossiles. Ce rapport de l'état des lieux de la filière hydrogène confirme **le potentiel 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. L'hydrogène pourrait potentiellement permettre une intégration massive de ressources renouvelables intermittentes dans le mix électrique réunionnais et pourrait participer, sur certains segments de marché circonscrits, au développement d'une mobilité zéro émission.

En France, à l'horizon 2030, plus de 84 métiers clés dans la filière hydrogène, incluant des compétences techniques opérationnelles seront générés par le déploiement des 6,5 GW de capacité de production d'hydrogène décarboné [14]. A l'échelle locale, 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. Cette croissance attendue déboucherait sur de potentiels nouveaux marchés dans le 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.

Bien que l'hydrogène présente de nombreuses opportunités, la filière dans les zones non interconnectées telles que la Réunion comporte des obstacles spécifiques. Les coûts d'infrastructure nécessaires à la production, au stockage et à la distribution de l'hydrogène dans un territoire insulaire risquent d'être élevés. Le développement de l'hydrogène en ZNI nécessitera au court terme un **accompagnement stratégique renforcé par des politiques publiques adaptées**, des **incitations à l'investissement**, ainsi que des solutions technologiques spécifiques.

Enfin, Le développement de l'hydrogène en ZNI pourrait bénéficier **de révisions fiscales**, comme des crédits d'impôt pour les projets utilisant des énergies renouvelables locales et des subventions ciblées pour encourager l'innovation. Cependant, ces mesures doivent être équilibrées pour éviter des distorsions de concurrence et soutenir de manière durable l'ensemble des secteurs concernés. Enfin, une réévaluation progressive de la fiscalité des carburants fossiles pourrait favoriser l'hydrogène sans pénaliser des secteurs déjà fragiles.

Annexes

A1 Quelques chiffres sur l'hydrogène

Hydrogène dans le monde [1]	
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 [9] [10]	
Consommation électrique d'un électrolyseur	56 kWhe/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 kWhe/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/m3

Masse volumique de l'H2 gazeux à 700 bars	42kg/m3
Masse volumique de l'H2 liquide à -253°	71kg/m3
Secteur énergétique réunionnais [6]	
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 production électrique dans les émissions de CO2 de l'île en 2021	46%
Energies renouvelables [6] [7]	
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 <i>a</i>	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 [9] [8]	
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	-25%
Rendement d'un électrolyseur	60 à 85%
Durée de vie d'un électrolyseur	120 000h

Bibliographie

- [1] IEA, «Global Hydrogen Review,» 2022.
- [2] Hydrogen Council, «Hydrogen Insights 2023,» 2023.
- [3] Ministère de l'Économie, des Finances et de la Souveraineté industrielle et numérique, «Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France,» 2020.
- [4] L'Usine Nouvelle, «De l'hydrogène blanc dans le bassin houiller lorrain,» 2023.
- [5] European Council, «Council and parliament reach provisional deal on renewable energy directive,» 2023.
- [6] Energies Réunion, «Bilan Energétique de La Réunion 2022,» 2023.
- [7] PPE, «Programmation Pluriannuelle de l'Energie 2019-2028,» 2022.
- [8] Ministère de la Transition Ecologique, «Plan Hydrogène,» 2018.
- [9] France Hydrogène, «Fiche 3.2.1 Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau,» 2023.
- [10] ADEME, «Rendement de la chaîne hydrogène,» 2020.
- [11] Mc Kinsey, «Decarbonizing the aviation sector : making net zero aviation possible,» 2022.
- [12] EDF, «Bilan prévisionnel de l'équilibre off-redemande d'électricité à La Réunion,» 2022.
- [13] ADEME, «Etude de la valeur des solutions Hydrogène dans les ZNI,» 2020.
- [14] France Hydrogène, «Livre Blanc Compétences-métiers,» 2021.
- [15] IRENA, «Green Hydrogen. A guide to policy making.,» 2020.
- [16] Encyclopédie de l'énergie, «La production d'hydrogène vert,» 2016.
- [17] R. L. d. S. J. M. & O. Figueiredo, «Green hydrogen: Decarbonization in mining-Review,» *Cleaner Energy Systems*, 2023.
- [18] N. N., «Assessment of technological path of hydrogen energy industry development : A review,» *Iranica Journal of Energy and Environment*, 2021.
- [19] H2 mobile, «Avec ses électrolyseurs haute température, Genvia veut révolutionner l'hydrogène,» 2021.
- [20] IEA, «Electrolysers,» 2021.

