



HYDROGÈNE BAS CARBONE

Dynamisée par le soutien public, la filière se concentre sur les usages clés et les enjeux techniques

HYDROGÈNE BAS CARBONE

Dynamisée par le soutien public, la filière se concentre sur les usages clés et les enjeux techniques

Galvanisée par les besoins en décarbonation et l'appui financier et réglementaire des pouvoirs publics, la filière de l'hydrogène bas carbone connaît une émulation sans précédent. Cette mise en valeur s'est toutefois opérée dans un contexte équivoque : entre les fortes contraintes techniques, connues depuis longtemps, les désaccords politiques sur la définition du "bas carbone" et la concurrence d'autres sources d'énergie, l'hydrogène à faible impact environnemental fait face à de multiples phénomènes défavorables. Il parvient toutefois à s'intégrer petit à petit dans le panel de solutions envisagées pour décarboner le mix énergétique.

Moins variés qu'escompté au démarrage, les usages se révèlent néanmoins nombreux, tant les défis environnementaux constituent un phénomène transversal à différents secteurs. Des utilisateurs traditionnels d'hydrogène carboné dans l'industrie aux acteurs des divers types de mobilité, voire aux énergéticiens, la profusion de clients potentiels représente une opportunité de marché prometteuse. Les producteurs d'hydrogène bas carbone, grands groupes ou start-up, multiplient les projets tandis que le reste de la filière s'organise pour former un écosystème solide.

Flexible et non émissif, l'hydrogène présente cependant des inconvénients en termes de sécurité et de stockage, et souffre de tarifs toujours élevés. La technologie et les procédés de production sont encore en évolution, de même que les modèles d'affaires. Les acteurs doivent ainsi prendre leurs marques dans cet environnement mouvant, et parvenir à capter suffisamment de financements sur la durée, un élément qui fait défaut à nombre de start-up industrielles.



DANS CE DOSSIER

POINTS-CLÉS ET ENJEUX	4
UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN	8
Des projections tablant sur un fort développement de l'hydrogène décarboné.....	8
Un soutien réglementaire et financier favorable au dynamisme de l'écosystème	13
Le succès de l'hydrogène bas carbone reste entravé par de nombreuses contraintes.....	21
DES DÉBOUCHÉS SE DESSINENT DANS UNE VARIÉTÉ DE SECTEURS.....	23
L'hydrogène bas carbone se déploie chez les grands acteurs de l'industrie.....	23
De nouveaux projets surtout portés par des acteurs émergents.....	28
LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PREND DE L'AMPLEUR.....	36
Les grands groupes à la manœuvre	36
Entre innovations et levées de fonds, les start-up cherchent à se faire une place	39
La fabrication d'électrolyseurs, enjeu clé en amont de la production	44
RECHARGE, STOCKAGE, PILOTAGE : LA CHAÎNE DE VALEUR EN QUÊTE DE STRUCTURATION	47
Un foisonnement d'entreprises sur les stations de recharge.....	47
Le défi du stockage et du transport	50
Des outils numériques de gestion et de pilotage à élaborer.....	53
FORCES EN PRÉSENCE	55
Entreprises françaises présentes dans la production d'hydrogène bas carbone.....	55
Entreprises françaises présentes dans les équipements : électrolyseurs et piles à combustibles, autres équipements connexes.....	56
Entreprises françaises présentes sur les autres segments de la chaîne de valeur.....	57
Entreprises françaises présentes dans les usages de l'hydrogène bas carbone	59
Axes et faits notables	61
LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE	63
LEXIQUE.....	66
SOURCES UTILISÉES.....	67

POINTS-CLÉS

Ce qu'il faut retenir

CHIFFRES-CLÉS
MONDE

15

milliards d'euros

Investissements d'EDF, d'Engie (d'ici 2030)
et d'Air Liquide (d'ici 2035)
dans l'hydrogène bas carbone

9

milliards d'euros

Plan de soutien
gouvernemental
au secteur

x16

Hydrogène bas carbone

Production française, en tonnes,
2022-2030

Bornes de recharge

100

2023

1 000

2030

900 000

dans le monde

tonnes de CO2 émises par la
production d'hydrogène chaque année

Part de l'industrie dans la consommation d'hydrogène

99 %

2020

75 %

2030

25 %

2050

Investissements mondiaux
dans l'hydrogène
renouvelable (d'ici 2050)

180 à 470
milliards de dollars

MOTEURS

POLITIQUE
ENVIRONNEMENTALE

- Volonté de décarboner les usages avec un carburant écologique
- Recherche de solutions efficaces pour stocker l'électricité
- Contribution à la souveraineté énergétique

INVESTISSEMENTS
CONSÉQUENTS

- Soutien de l'État, dont 9 milliards d'euros spécifiquement dédiés
- Projets des grands industriels et des énergéticiens
- Multiples programmes européens

INNOVATION

- Centres de recherche reconnus dans le domaine
- Programmes de recherche nombreux et ambitieux
- Émergence de nouveaux procédés plus efficaces

POINTS-CLÉS

Ce qu'il faut retenir

PAYSAGE CONCURRENTIEL

ÉNERGÉTIENS	INDUSTRIELS	START-UP	CENTRES DE RECHERCHE
Investissent dans des capacités de production Décarbonent leur activité gazière ou convertissent leur électricité en un nouveau débouché Nouent des partenariats entre eux pour accélérer les projets	Cherchent à décarboner les usages Lancent des programmes de R&D pour remplacer les énergies fossiles Ont recours aux énergéticiens et aux start-up pour convertir leurs activités à l'hydrogène décarboné	Se positionnent sur l'ensemble de la chaîne de valeur Collaborent entre elles pour développer leurs innovations Se rapprochent des autres acteurs pour conclure des accords commerciaux ou de recherche	Mènent des recherches sur l'hydrogène bas carbone Diffusent leurs travaux auprès des start-up pour les rendre opérationnels S'intègrent à des programmes communs avec les grands acteurs

FREINS ET DÉFIS

COMPLEXITÉ TECHNIQUE	• Volume important, conservation à très basse température, intégration des composants, équipements et infrastructures spécifiques... • Risques d'inflammation et de corrosion • Incertitude technologique : solutions et projets ralentis
CONCURRENCE DES AUTRES ÉNERGIES	• Compétitivité de l'hydrogène encore faible • Déploiement accéléré d'autres énergies et de leurs infrastructures • Capacités de production très en-deçà des besoins pour longtemps
FINANCEMENT INSUFFISANT	• Hausse des taux d'intérêt et des prix de l'électricité • Faible soutien accordé aux start-up • Cycles longs et secteur risqué : réticences des investisseurs et des banques

S'intégrer à l'écosystème et s'appuyer sur des partenariats

Pour un nouvel entrant, s'implanter sur le marché de l'hydrogène bas carbone peut se montrer plus ardu que dans d'autres domaines. **Le poids des grands énergéticiens** dans la production et la dépendance aux choix de quelques acteurs majeurs dans les usages, en particulier dans la mobilité, **peut engendrer des réticences** chez les sociétés émergentes. Afin d'éviter les déconvenues, une approche axée sur **les collaborations avec le reste de l'écosystème** semble une voie judicieuse.

Les rapprochements avec les centres de recherche permettent de s'appuyer sur des moyens matériels et humains pour **développer la technologie et procéder à des tests**. Dans un secteur aux multiples contraintes techniques, les efforts en R&D représentent des éléments d'autant plus décisifs pour le succès de l'entreprise. **Certains laboratoires peuvent déjà disposer de recherches** et d'avancées technologiques dans l'hydrogène, et chercher à les diffuser au monde entrepreneurial pour en faire des innovations opérationnelles. **Parvenir à récupérer et poursuivre** des recherches démarrées au sein d'instituts technologiques peut constituer un atout majeur et un gain de temps considérable pour une start-up.

Les partenariats entre start-up s'avèrent en outre un phénomène relativement courant dans le secteur de l'hydrogène, que ce soit dans les usages ou dans les infrastructures. De telles démarches permettent de **bénéficier de l'expertise d'autres acteurs** sur des briques technologiques spécifiques, et ainsi développer une solution plus efficace et compétitive.

Plus globalement, le déploiement des solutions développées doit être pensé avec les autres acteurs de la chaîne de valeur. **La spécialisation de chacun sur différents éléments** (motorisation, réservoir, équipements divers, avitaillement...) et l'importance tant de l'infrastructure à mettre en place que de la nécessaire compatibilité des systèmes entre eux obligent à **structurer l'offre dans le cadre de collaborations multiples**. Ce n'est pas forcément une contrainte : la connaissance des attentes clients peut en être améliorée, de même qu'une meilleure réactivité face à ces dernières. Les logiques de réseaux peuvent par ailleurs **ouvrir de nouvelles opportunités**, notamment avec des acteurs qui paraissaient inaccessibles, et augmenter la visibilité auprès des clients comme des investisseurs.

S'implanter durablement dans un contexte de financement tendu

Malgré les annonces de soutien public, le financement des start-up dans le domaine de l'hydrogène reste modeste. **Secteur risqué, au temps de développement long**, il se montre peu attractif pour la plupart des fonds comme des acteurs bancaires. Le choix du positionnement et le calibrage du développement se révèlent d'autant plus cruciaux.

Des opportunités s'offrent aux nouveaux entrants **sur l'ensemble de la filière**, des usages à la production en passant par le stockage et l'approvisionnement. Certains segments peuvent toutefois apparaître comme **plus porteurs ou moins gourmands en capitaux**. Du fait de la contrainte financière, la construction d'usines nécessitant des moyens importants et repoussant de plusieurs années la génération de chiffre d'affaires peut représenter un pari risqué. **Le manque de solutions numériques spécifiquement conçues** pour la gestion de l'hydrogène (consommation, stockage, flottes, transport...) semble en revanche un créneau pertinent pour se positionner. Ce type de solutions présentent **plusieurs avantages** : moins coûteux à développer, plus rapide

à commercialiser, passage à l'échelle facilité, plus grande confiance des investisseurs... **Une offre axée sur les services** plutôt que le développement d'une production industrielle peut ainsi s'avérer judicieuse. D'autres opportunités peuvent y être explorées, notamment **au niveau de modèle d'affaires différenciants**, comme la mise à disposition d'un procédé de fabrication à des tiers ou les solutions hydrogène globales.

Ces approches peuvent se combiner avec un **développement progressif** de l'entreprise, qui peut faire évoluer son modèle sur la durée. Générer du chiffre d'affaires rapidement, par exemple avec **des solutions intermédiaires** par rapport au *business model* final visé, peut en outre permettre d'enclencher une dynamique positive pour l'entreprise. Le retrofit avant un nouveau véhicule à hydrogène, des carburants de synthèse avant une propulsion uniquement à l'hydrogène... Différentes méthodes sont susceptibles d'**assurer des revenus à plus court terme**, pérennisant l'activité, permettant éventuellement un financement direct des investissements, et rassurant les investisseurs dans le cadre de levées de fonds.

UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN

Des projections tablant sur un fort développement de l'hydrogène décarboné

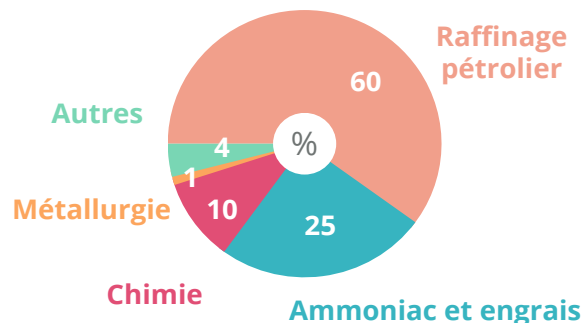
L'hydrogène, un gaz très utilisé dans l'industrie

Produit principalement via deux méthodes (le vaporeformage du gaz naturel et l'électrolyse), l'hydrogène est **utilisé dans divers procédés industriels**. Il sert surtout à raffiner des produits pétroliers et à concevoir des engrais et différents produits chimiques, en particulier le méthanol (solvant). Le passage à un hydrogène bas carbone permettrait ainsi de **réduire l'empreinte environnementale de ces activités**. D'autres usages sont toutefois identifiés, tels que le remplacement des carburants fossiles par de l'hydrogène ou des alternatives qui en comportent. Ce gaz peut aussi représenter une manière de **stocker de l'électricité**, ce qui apporte plusieurs avantages :

- flexibilité dans les usages de l'énergie comme dans les méthodes d'approvisionnement ;
- meilleure résilience du réseau électrique ;
- conservation des surplus d'électricité produits ;
- réponse à l'intermittence des énergies renouvelables.

Divers usages de l'hydrogène, actuels ou émergents

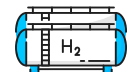
Consommation d'hydrogène en 2020



 *secteurs à potentiel*



Mobilité



Stockage

Traitement IndexPresse. Source : RTE

TECHNIQUE

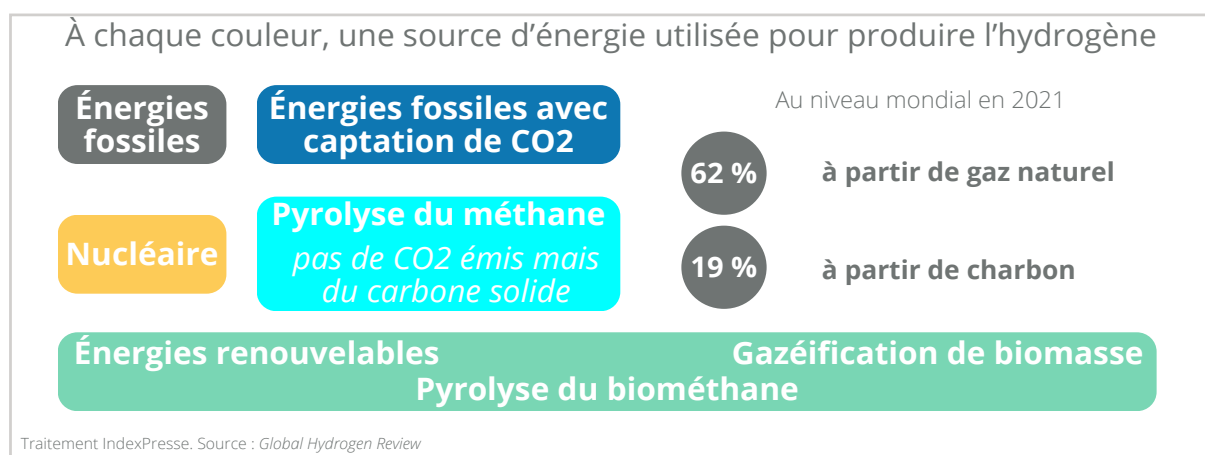
DEUX FAÇONS DE PRODUIRE L'HYDROGÈNE : LE VAPOREFORMAGE ET L'ÉLECTROLYSE

Il existe deux méthodes principales pour obtenir de l'hydrogène, des déclinaisons existant toutefois en leur sein (par exemple, par électrolyseur alcalin, PEM, etc.). Le reformage consiste à utiliser de la vapeur d'eau pour recréer du gaz naturel, tandis que l'électrolyse a recours à un courant électrique pour générer une réaction chimique. Le vaporeformage constitue la technique la plus utilisée.

Différents types d'hydrogène bas carbone

L'hydrogène est actuellement surtout produit à partir de ressources fossiles (du méthane ou du charbon) : il est considéré comme "gris". **D'autres couleurs sont communément employées** pour décrire les différentes catégories d'hydrogène, chacune correspondant à **un mode de production spécifique**. Le bleu renvoie ainsi à une production issue d'une énergie fossile, mais combinée à un système de captage de CO₂. La couleur turquoise est utilisée pour caractériser l'hydrogène produit par pyrolyse du méthane. Le jaune (ou le rose) fait traditionnellement référence au nucléaire, tandis que le vert est associé aux énergies renouve-

lables. **Le bas carbone inclut quant à lui à la fois le nucléaire et le renouvelable** : c'est la position qui a été adoptée au niveau européen, **sous la pression de la France** et d'une coalition d'États favorables au nucléaire (Hongrie, République tchèque, Pologne...). Adjoint de direction au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), chargé notamment des normes relatives à l'hydrogène, Pierre Serre-Combe précise en juin 2023 dans la revue *Enjeux* : "Le label vert ou rose de l'hydrogène **relève du politique**. (...) La norme est, d'un point de vue technologique, agnostique".



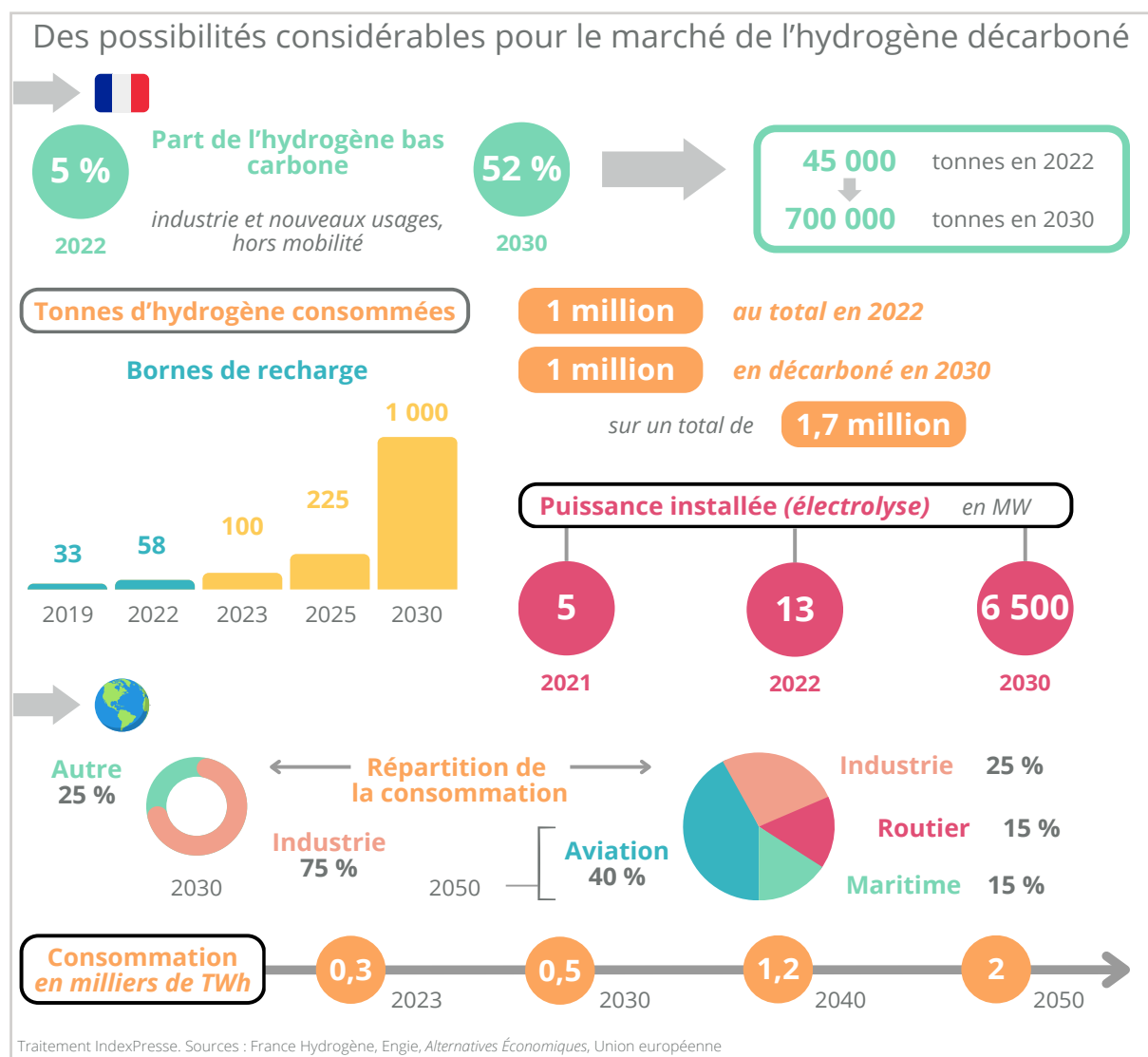
L'HYDROGÈNE BLANC, UNE RESSOURCE PRÉSENTE À L'ÉTAT NATUREL

À la différence des hydrogènes "colorés", produits de façon industrielle, l'hydrogène blanc existe sous forme de gisements de gaz souterrains. Après une première découverte au Mali en 2012, d'autres gisements ont été identifiés dans le monde, dont un en Lorraine en 2023 affichant un potentiel considérable : 46 millions de tonnes d'hydrogène, soit plus de la moitié de la production mondiale d'hydrogène gris. La Suisse a également trouvé un gisement la même année, tandis que d'autres pays (Australie, États-Unis, Sultanat d'Oman...) ont aussi identifié des sources d'hydrogène naturel. Un projet au nord-ouest de l'Espagne devrait démarrer en 2024. L'intérêt de l'hydrogène blanc réside dans son bilan écologique avantageux et dans son renouvellement continu, là où les ressources fossiles nécessitent des millions d'années pour se former. Il disposerait aussi d'un atout sur le plan financier, avec un coût de production dix fois inférieur à l'hydrogène vert, selon le média *Science*. La localisation et les conditions d'extraction peuvent toutefois interférer avec la faisabilité des projets.

Un potentiel de développement prometteur

“L’hydrogène décarboné et les molécules produites à partir d’hydrogène (e-molécules) joueront **un rôle clé dans les transports et pour certains usages industriels**”, écrit le groupe Engie dans son rapport sur la transition énergétique publié en 2023. Cette analyse est partagée par les experts interrogés dans le cadre du Baromètre de l’énergie 2021, ces derniers plaçant **en tête des secteurs à développer** ceux du transport routier de marchandises, des industries actuellement utilisatrices d’hydrogène et des transports

en commun sur route. **Décarboner l’approvisionnement en hydrogène d’activités fortement émettrices de CO₂** représente le principal objectif, avant l’extension de ce gaz à de nouveaux usages. **Un élément technique vient également plaider en ce sens** : la rapidité de recharge de l’hydrogène, la forte autonomie conférée et le volume des équipements nécessaires poussent pour une utilisation par des véhicules lourds. La fédération de la filière, France Hydrogène, a ainsi fixé un objectif de **5 000 poids lourds propulsés à**



DES OPPORTUNITÉS ÉGALEMENT SUR LE CONTINENT AFRICAIN

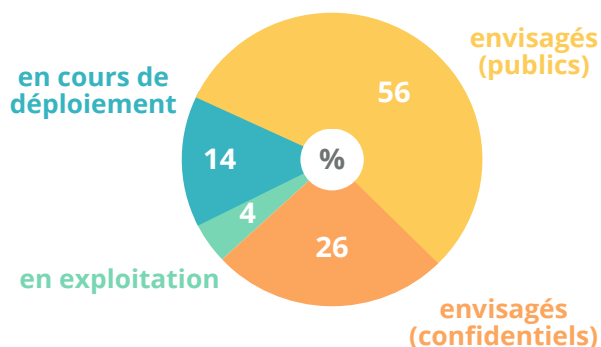
Malgré un potentiel massif dans le solaire et l'éolien, de nombreux projets ne sont pas mis en place en Afrique faute de rentabilité. La production d'hydrogène vert peut pourtant représenter un atout pour attirer des capitaux et permettre l'installation de capacités photovoltaïques ou éoliennes. D'abord dans une logique d'export, cette industrie faciliterait le rétablissement des balances commerciales des pays africains et pourrait ensuite conduire à une diversification de la fourniture d'électricité vers les besoins domestiques. Une Alliance africaine de l'hydrogène vert (AGHA) a ainsi vu le jour, rassemblant le Kenya, le Maroc, la Mauritanie, la Namibie, l'Égypte et l'Afrique du Sud. Quelques sites de production ont déjà été installés. L'amélioration des soldes extérieurs peut aussi passer par une réduction des importations : le Kenya souhaite produire sur son sol des engrais grâce à de l'hydrogène vert, ce qui diviserait ses imports d'engrais par deux d'ici 2030. Un projet de production d'acier bas carbone en Mauritanie, richement dotée en fer, pourrait également voir le jour.

L'hydrogène pour l'année 2030, contre 1 150 environ en 2022. Ce nombre monterait à **60 000 pour l'Europe entière**, d'après la stratégie mise en place par la Commission européenne. Au niveau des usages industriels, **l'hydrogène bas carbone représenterait la totalité de la hausse du marché**, et procéderait également à une forte substitution à l'hydrogène gris. Les projets se multiplient par ailleurs **dans les réseaux de transport en commun**, 736 initiatives ayant été identifiées par France Hydrogène en 2030. Ce déploiement massif de l'hydrogène décarboné va passer à la fois par le recours au nucléaire et aux énergies renouvelables, malgré les divergences européennes sur ce sujet. Les experts sondés dans

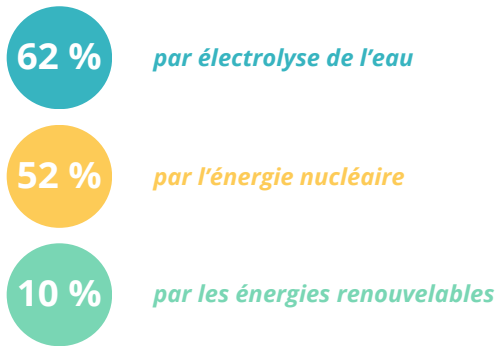
le Baromètre de l'énergie pensent même que le nucléaire sera le principal moyen de produire de l'hydrogène décarboné en France. Cette approche est assumée par l'eurodéputé (parti Renaissance) Pascal Canfin, spécialiste des questions énergétiques : "Il ne faut en aucun cas opposer [les énergies]. **Nous sommes dans une logique d'addition** et pas de mise sur le côté pour des raisons idéologiques." Le pays s'avère en outre **en retard sur le déploiement des énergies renouvelables**, et souhaite lancer un nouveau programme nucléaire basé sur **des réacteurs modulaires (SMR)**. La reconnaissance de l'hydrogène jaune comme une solution écologique a de plus constitué un récent combat de la France au niveau de l'Union européenne.

Un développement de l'hydrogène décarboné qui passera par le nucléaire

Projets de transports en commun fonctionnant à l'hydrogène en France, en 2022



Selon les experts interrogés par le Baromètre, l'hydrogène le plus consommé sera produit :



Traitement IndexPresse. Sources : France Hydrogène, Baromètre de l'énergie 2021, calculs IndexPresse

L'écologie porte le regain d'intérêt pour l'hydrogène

Connues depuis longtemps mais négligées pour de nombreux usages du fait de contraintes techniques et financières, les propriétés de l'hydrogène intéressent de nouveau grâce à **la montée en puissance des problématiques environnementales**. La nécessité de décarboner un maximum de secteurs d'activité replace ce gaz au centre de l'attention. Contrairement aux combustibles fossiles, **il ne rejette en effet que de la vapeur d'eau**. Seule sa production émet des gaz à effet de serre. Le remplacement de l'hydrogène gris par un équivalent décarboné pourrait déjà faire diminuer les émissions européennes de près de 3 %. **Le potentiel se montre bien plus important avec une extension à d'autres secteurs** fortement émissifs, en particulier dans le transport. Les politiques écologiques conduisent par ailleurs

au développement des énergies renouvelables, qui souffrent d'un **risque d'intermittence** : le solaire comme l'éolien ne peuvent produire de façon continue et sont **soumis à davantage d'aléas**. L'utilisation de modes de production d'électricité flexibles (gaz, charbon, nucléaire...) devient alors nécessaire pour assurer un approvisionnement suffisant en cas de hausse de la demande. En convertissant l'électricité en un gaz stockable, **le recours à l'hydrogène apporte cette flexibilité** au réseau tout en limitant la part des énergies fossiles dans le mix énergétique. Il est dans ce cas possible de se passer également du nucléaire, mais un tel scénario – envisagé notamment par le gestionnaire du réseau RTE – requiert **des investissements considérables en capacités de stockage** et de production d'électricité renouvelable.

L'hydrogène gris génère une importante pollution

2 % à 3 %

des émissions de gaz à effet de serre en Europe

900 millions de tonnes

de CO2 émis dans le monde en 2022

10 tonnes

de CO2 émis par tonne d'hydrogène produite

Traitement IndexPresse. Sources : Union européenne, Agence internationale de l'énergie, calculs IndexPresse

CONCEPT

LE MIX ÉNERGÉTIQUE, NOTION CLÉ DES POLITIQUES ENVIRONNEMENTALES

Ce terme fait référence à la structure de la consommation d'énergie ou d'électricité d'un pays. Il indique la proportion de chaque source d'énergie et donc le profil global du territoire au niveau énergétique. Une part importante de ressources fossiles conduit ainsi à un mix énergétique fortement carboné. La distinction peut être faite entre le mix énergétique (toutes les formes d'énergies consommées) et le mix électrique. En France, ce dernier est peu carboné du fait de la prépondérance du nucléaire et de l'hydraulique dans la production d'électricité. En revanche, la prise en compte de l'énergie thermique, que ce soit pour le chauffage ou pour la mobilité, amène à un mix énergétique plus émetteur de gaz à effet de serre : c'est l'impact des voitures thermiques (propulsées par des dérivés du pétrole) et des chaudières au fioul ou au gaz.

Un soutien réglementaire et financier favorable au dynamisme de l'écosystème

Des stratégies nationales et européennes au service d'un mix énergétique moins carboné

Les gouvernements ont mis en place plusieurs programmes visant à **encadrer et à financer tant le déploiement des énergies renouvelables que de la filière hydrogène**. Combinés, ces phénomènes encouragent la montée en puissance d'une production d'hydrogène décarbonée sur le territoire français et européen. Ils doivent notamment contribuer à **l'atteinte de la neutralité carbone** de l'Union européenne à l'horizon 2050.

La France mobilise d'importants moyens pour la filière

L'Hexagone souhaite se positionner de façon marquée sur la production d'hydrogène, et développer fortement les usages afin de décarboner massivement ses activités économiques les plus polluantes. **Une stratégie nationale dédiée a été lancée en 2020**, complétée ensuite par le programme d'investissement France 2030. Quelques projets ont également pu être soutenus par le plan France Relance. Ce sont au total **9 milliards d'euros qui ont été alloués** au développement de la filière hydrogène à l'horizon 2030. La stratégie décline trois objectifs principaux, portés par trois axes d'action :

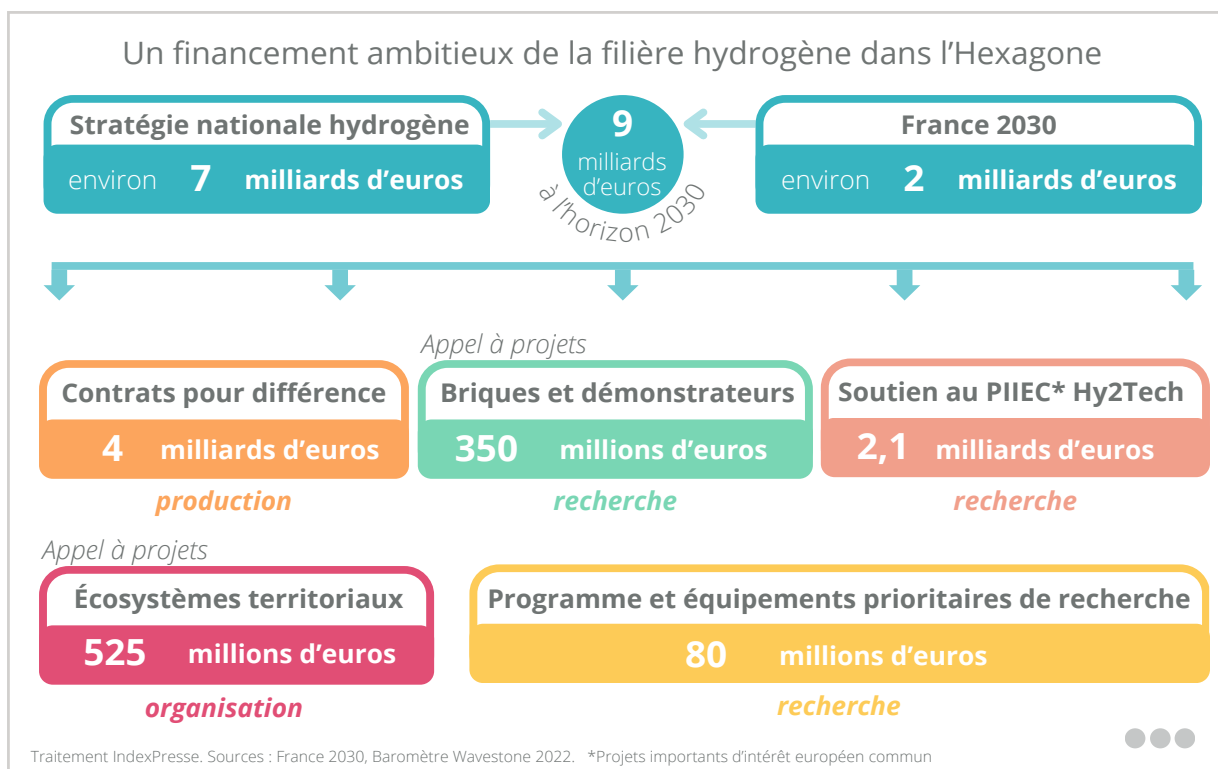
- **Décarboner significativement l'industrie** tout en créant des emplois grâce à la constitution d'une filière sur le territoire français ;
- **Faire évoluer la mobilité lourde** vers le bas carbone par le passage à la propulsion hydrogène ;
- **Soutenir la recherche** afin de favoriser à la fois la décarbonation, la modification des usages et la création d'emplois, ainsi que la maîtrise technologique.

"Le déploiement d'une économie de l'hydrogène s'opère aussi grâce à la normalisation et à la réglementation des technologies qui apportent les gages de confiance nécessaires aux industriels, aux pouvoirs publics et aux utilisateurs."

Frédéric Solbes, chef de projet à Afnor Normalisation

Les pouvoirs publics français ont par ailleurs instauré plusieurs plans en faveur des énergies renouvelables au fil des années. Le dernier en date est incarné par **la loi APER (accélération de la production d'énergies renouvelables)**. Il fait référence à la production d'hydrogène bas carbone et vise à **renforcer le déploiement des énergies vertes** pouvant être utilisées par le secteur. La loi offre également la possibilité de **recourir à l'autoconsommation** dans le cadre de la production d'électricité renouvelable destinée à générer de l'hydrogène vert. Son intégration au sein de la planification mise en place par la Commission pluriannuelle de l'énergie lui donne en outre **une plus forte légitimité**. Entrant dans le champ de la Commission de régulation de l'énergie, l'hydrogène bas carbone voit son développement mieux encadré et structuré.

UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN



Le principal dispositif de soutien financier passe par **les contrats pour différence**, un système mis en place de manière similaire dans les énergies renouvelables. **Doté de 4 milliards d'euros, il instaure des compensations financières** pour les producteurs d'hydrogène bas carbone lorsque leurs coûts de production dépassent ceux de l'hydrogène gris. Inversement, **ils viendront abonder le budget de l'État** quand ils seront durablement plus compétitifs que l'hydrogène issu de ressources fossiles. **Prévus pour une durée de quinze ans**, les contrats devraient démarrer en 2026 (les premiers appels d'offres seront ouverts en 2024). Ces derniers comportent en outre **des clauses incitatives** pour l'utilisation de nouvelles capacités de production d'électricité renouvelable ou pour arrêter la production d'hydrogène lorsque la demande sur le réseau électrique est particulièrement élevée. De façon plus indirecte, les acteurs de l'hydrogène peuvent également **bénéficier du programme "Décarbonation de l'industrie"** (un volet de France 2030). Disposant d'un **budget de 3 milliards d'euros**, il peut financer une partie des projets ayant trait à un renforcement des usages de l'hydrogène dans l'industrie.

Des programmes européens en faveur de l'hydrogène bas carbone

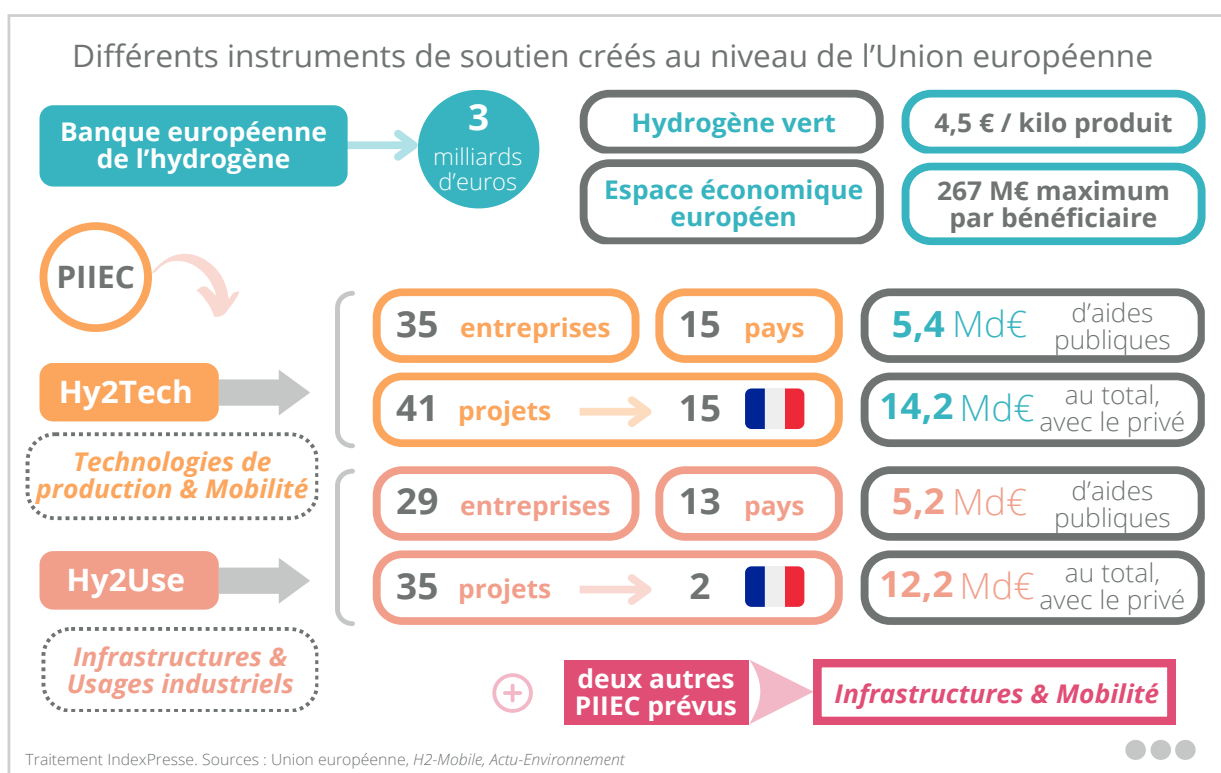
L'Union européenne s'est dotée d'une feuille de route volontariste dans le domaine, visant **une production de 10 millions de tonnes d'hydrogène sur le sol européen** à partir de 2030 et un volume similaire en importations. **Sur le plan politique**, cette approche contente à la fois les pays partisans d'une souveraineté industrielle et technologique et ceux plus favorables au libre-échange. **Sur le plan économique**, elle apporte un soutien tant aux acteurs développant une activité en Europe qu'à ceux souhaitant implanter une unité de production à l'étranger.

La Commission européenne a **mis en place diverses mesures** pour mener à bien la stratégie décidée à l'échelle de l'Union. Elle a dans ce but validé deux PIIEC (Projets importants d'intérêt européen commun) en 2022 : **Hy2Tech** et **Hy2Use**.

- Le premier se concentre sur le développement de technologies de production de l'hydrogène ;
- Le second concerne les infrastructures et les cas d'usage au niveau industriel.

LES PIIEC, UN INSTRUMENT POUR AUTORISER LES AIDES D'ÉTAT

Créés en 2014, les Projets importants d'intérêt européen commun fournissent un cadre permettant à des États membres de contourner les règles habituelles du marché unique, en particulier concernant les distorsions de concurrence causées par les aides publiques. Devant être validés par la Commission européenne, les PIIEC associent au minimum quatre pays et doivent se concentrer sur des secteurs considérés comme stratégiques. Ces programmes ont pour but d'attirer les capitaux privés dans le domaine ciblé et non de se substituer à eux : les subventions doivent ainsi s'avérer nécessaires au développement du secteur. Les règles relatives aux PIIEC ont été modifiées début 2022 afin de mieux y intégrer les petites et moyennes entreprises (PME).



L'institution communautaire cherche à produire un effet d'entraînement sur l'investissement privé grâce à ces programmes : les dépenses publiques engagées dans ces PIIEC ne représentent qu'environ 40 % des budgets totaux qui y sont alloués. Ils rassemblent à eux deux plus de 75 projets, financés chacun en moyenne à hauteur de 300 millions d'euros.

Une "Banque européenne de l'hydrogène" a également été lancée en 2023. Fonctionnant en réalité comme un fonds, elle doit rassembler

jusqu'à 3 milliards de capacités de financement pour soutenir les producteurs d'hydrogène renouvelable. Au regret de la fédération France Hydrogène, le nucléaire n'est pas intégré dans les sources d'énergie admises par les critères de la banque. Elle vise à subventionner les producteurs par le biais d'une prime de montant fixe à la production, afin de compenser l'écart entre les coûts de production et les prix compatibles avec le développement du marché. Une première enchère est prévue pour la fin novembre 2023, à hauteur de 800 millions d'euros.

UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN

La stratégie européenne en faveur de l'hydrogène vert ou bas carbone se décline dans **une multitude d'initiatives et de programmes**, nouveaux ou dans la continuité de plans antérieurs :

- REPowerEU (planification énergétique) ;
- NextGeneration EU (plan de relance et d'investissement post-Covid) ;
- Fit-for-55 (programme environnemental) ;
- Hydrogen Accelerator (complément à la stratégie globale sur l'hydrogène) ;
- Clean Hydrogen Partnership (partenariat public-privé au sein du programme d'innovation Horizon Europe, et se terminant en 2027) ;
- Réglementation concernant les garanties d'origine (GO), soit une certification sur la traçabilité des flux d'hydrogène ;
- Stratégie relative à l'intégration du système énergétique européen...

Des investissements massifs prévus dans l'hydrogène en Europe

Prévisions à l'horizon 2050

180
à
470

milliards d'euros

Investissements cumulés dans l'hydrogène renouvelable

3 à 18

milliards d'euros

Investissements cumulés dans l'hydrogène bleu

Prévision à l'horizon 2030

24
à
42

milliards d'euros

Investissements cumulés dans les électrolyseurs

Traitement IndexPresse. Source : Union européenne

UN RENFORCEMENT DU RÉSEAU GAZIER EUROPÉEN

L'Europe dispose, avec ses 4 500 km de gazoducs et d'oléoducs, d'infrastructures conséquentes pour le transport de l'hydrogène, sous réserve de certains ajustements. Certains pays en son sein souhaitent renforcer leur maillage, notamment l'Allemagne, qui veut fortement s'appuyer sur les importations pour assurer son approvisionnement (les deux tiers à terme). D'ici 2028, la République fédérale vise à installer ou convertir 1 800 km de conduites pour l'hydrogène. De son côté, la France a modifié le projet de gazoduc MidCat mené avec l'Espagne et le Portugal. Rebaptisé BarMar (pour Barcelone-Marseille), il doit être installé sous la mer Méditerranée et transportera de l'hydrogène. Sa mise en service est prévue pour 2030 et son coût s'élèverait à 2,5 milliards d'euros. Il pourrait alors acheminer 10 % de la demande européenne.

En Europe et à l'international, des gouvernements à l'offensive

La France n'est pas la seule à chercher à développer sa filière hydrogène. D'autres pays souhaitent **se positionner et faire émerger de potentiels concurrents** aux acteurs français. La montée des usages à l'étranger offre toutefois des opportunités pour les entreprises françaises du secteur.

"De nombreux pays [en Europe] ont lancé des expériences, **adopté des stratégies en matière d'hydrogène et mobilisé des milliards de dollars de financement**. Beaucoup d'autres manifestent leur intérêt", confirme dans la revue *Enjeux* Olga Algayerova, secrétaire exécutive de la Commission économique des Nations Unies pour l'Europe. **L'Europe se montre ainsi bien placée** mais pourrait voir son avance s'éroder.

UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN

- **L'Italie** investit fortement dans la filière avec un plan de 10 milliards d'euros à horizon 2030. Elle souhaite installer 5 GW de capacités de production d'hydrogène et desservir 2 % de sa demande énergétique finale.
- **L'Espagne** engage quant à elle près de 9 milliards d'euros, avec des objectifs de 4 GW en électrolyse et 25 % d'hydrogène vert dans la consommation de l'industrie.
- **L'Allemagne** met en œuvre un financement similaire, mais pour atteindre 5 GW en 2030 et 10 GW en 2040. Deux milliards d'euros de ce plan sont consacrés aux partenaires étrangers voulant exporter de l'hydrogène vert dans le pays.
- **Le Royaume-Uni** cherche également à disposer de 5 GW de production d'hydrogène par électrolyse en 2030. Quatre clusters industriels focalisés sur l'hydrogène seront également mis en place. Une enveloppe de 4,5 milliards d'euros a été allouée à ces objectifs.

Si la concurrence s'aiguise, **une coopération se se forme en parallèle**, notamment dans le domaine de la régulation et de l'établissement d'un cadre normatif. La France coanime avec le Brésil **un groupe de travail sur l'analyse du cycle de vie de l'hydrogène**. D'autres pays participent à la mission, comme les États-Unis, le Japon et l'Allemagne. L'enjeu est de faire éclore **une méthodologie acceptée à l'échelle internationale**

8 milliards de dollars

Le montant engagé par l'administration américaine pour créer des "hubs de l'hydrogène durable".

Source: US Department of Energy

pour évaluer l'impact environnemental de la production d'hydrogène et des produits relatifs à son utilisation. Un rapport doit être remis à ce sujet lors de la COP28 (fin 2023). **"Ce document est extrêmement attendu par les industriels (...)** mais aussi par l'univers réglementaire", explique dans *Enjeux* Frédéric Solbes, chef de projet chez l'Afnor. "Ce document va **conditionner le caractère réellement durable de l'hydrogène**, donc la garantie qu'il va contribuer à la neutralité carbone. Derrière, chaque pays peut mettre en place des réglementations pour faciliter l'usage de l'hydrogène et s'appuyer sur des méthodologies normalisées." Ce lourd travail, complexe sur les plans technique et politique, peut **apporter de la visibilité aux entreprises** et faciliter l'investissement.

LA CHINE, PREMIÈRE PRODUCTRICE MONDIALE D'HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

Considéré dans son plan quinquennal 2021-2025 comme une "industrie du futur", l'hydrogène est devenu une priorité de Pékin. "La Chine a pris la tête du déploiement des électrolyseurs : d'ici la fin de l'année, la capacité installée en Chine devrait atteindre 1,2 gigawatt, soit 50 % de la capacité mondiale de production", souligne ainsi l'Agence internationale de l'énergie (AIE) dans un rapport de 2023. Ses objectifs ont été dépassés de façon significative, avec 250 kilotonnes d'hydrogène vert en production ou en projet en 2023. Le pays comptait atteindre 100 à 200 kilotonnes à l'horizon 2025. Ces résultats ont notamment été obtenus grâce à la mise en service en 2023 du plus grand électrolyseur au monde. Alimenté par panneaux solaires, il dispose d'une puissance de 150 MW, constituant à lui seul près des trois quarts des capacités installées dans le monde en 2021. La Chine représente en outre environ 30 % de la demande mondiale d'hydrogène.

L'écosystème se structure avec des organismes dédiés et multiplie les projets d'innovation

De nombreuses structures participent à la vigueur du tissu entrepreneurial et industriel dans l'hydrogène. **Spécialisées dans la filière ou dans des domaines connexes** (technologie, mobilité, énergie...), elles apportent un accompagnement aux start-up et **contribuent à la naissance de partenariats** entre les acteurs de l'hydrogène.

Un maillage dense d'organisations en France et en Europe

Une multitude de pôles de compétitivité et de réseaux accueillent des acteurs de l'hydrogène et les mettent en relation pour participer à des projets communs. Parmi eux figurent notamment :

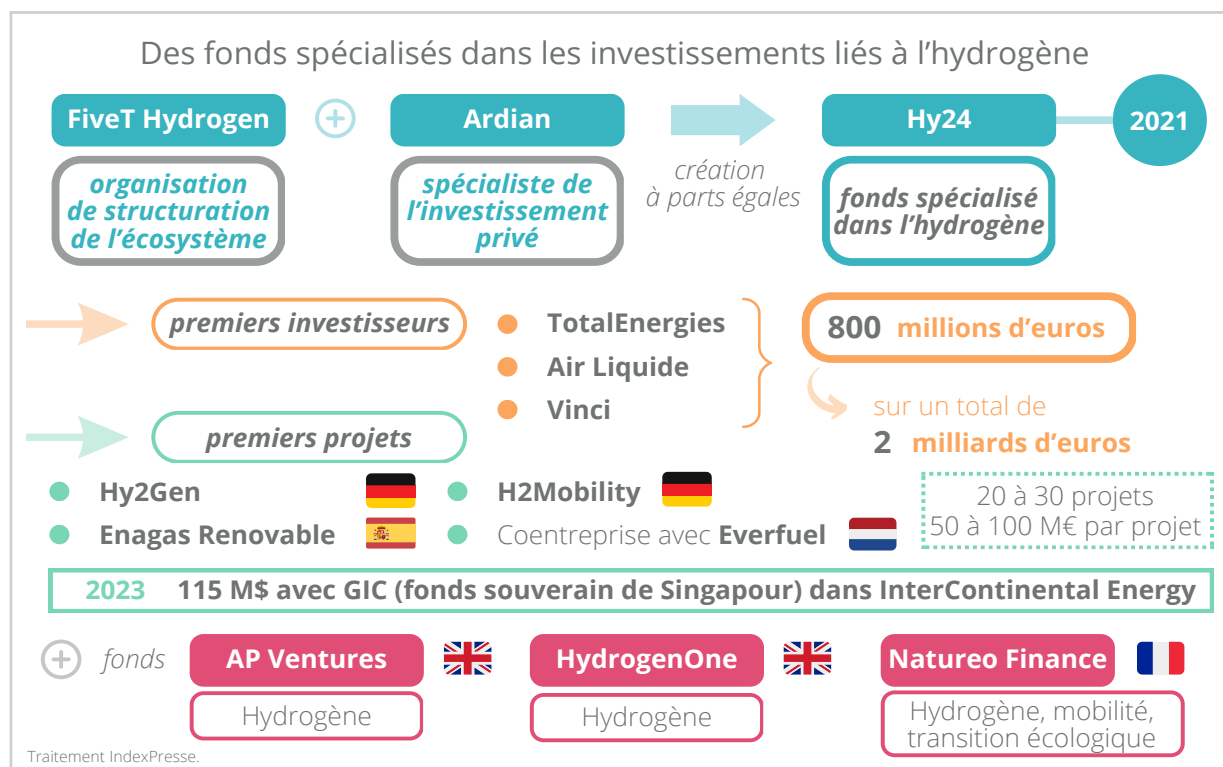
- **HyDeo** (Occitanie) ;
- **Hydrogen hub Airport** (Île-de-France) ;
- **Capenergie** (Provence-Alpes-Côte d'Azur) ;

- **Zero emission valley** (Auvergne-Rhône-Alpes) ;
- **Vhygo** (Bretagne, Pays de la Loire et Normandie) ;
- **Pôle Véhicule du Futur** (Grand Est) ;
- **Station Hydrogène** (Bourgogne-Franche-Comté).

La **Smart Energy Alliance** regroupe quant à elle 11 pôles de compétitivité liés à l'énergie, au numérique et à la mobilité, soit 2 200 acteurs membres (entreprises, laboratoires, fonds...).

En Europe, différentes structures œuvrent de façon similaire au dynamisme de la filière :

- **European Green Hydrogen Cluster** ;
- **European Clean Hydrogen Alliance** ;
- **Hydrogen Energy Network** (ici, réseau reliant uniquement les ministères de l'Énergie des États membres).



UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN

Outre les incubateurs spécialisés dans des thématiques plus larges, les acteurs émergents peuvent s'appuyer sur des structures portées par des énergéticiens. C'est par exemple le cas de l'**incubateur Nova**, créé par GRTgaz en 2022. Focalisé sur les questions de gaz renouvelable et d'hydro-

gène, et sur la transition climatique, il fournit **un accompagnement matériel et humain** aux start-up sélectionnées (quatre lors de la première promotion). Elles peuvent en outre réaliser des expérimentations avec le soutien de chercheurs.

DES EFFORTS FAITS SUR LA FORMATION DANS LE DOMAINE

L'adéquation entre les besoins en compétences de l'ensemble de la filière et le système scolaire et de formation constitue un enjeu majeur pour les entreprises de l'hydrogène. Le programme Def'Hy a été lancé début 2023 dans le but de répondre à cette problématique en identifiant, d'une part, les compétences clés à développer et, d'autre part, à favoriser la création de cursus ou de modules de formation dédiés. Ce projet rassemble France Hydrogène, l'institut européen de technologie et d'innovation InnoEnergy (spécialiste des énergies renouvelables) ainsi que des acteurs publics et privés du monde de l'emploi et de la formation professionnelle. Des "incubateurs" de formation ont par ailleurs été répartis sur le territoire du fait d'un partenariat entre France Hydrogène et l'Afpa (Agence nationale pour la formation professionnelle des adultes). Piloté par l'université de Lyon Claude Bernard, le projet européen (franco-italien) Remed a de son côté comme objectif de créer un campus axé sur l'électronique et la chimie. Doté en France d'une enveloppe de 14,5 millions d'euros, il vise à adapter la formation des futurs garagistes (via les centres de formation des apprentis et les lycées professionnels) aux motorisations alternatives, dont l'hydrogène.

La recherche et les partenariats connaissent un essor

La structuration de l'écosystème porte ses fruits, avec une multitude de projets de recherche et la mise en place de collaborations entre les différents acteurs, grands groupes comme start-up.

- **Démonstrateur H2Ref-Demo**

Ce projet mené par le Centre technique des industries mécaniques (Cetim) et la société H2Nova vise à développer un prototype de station à hydrogène pour le transport routier. Il devrait être mis en service à Grenoble en 2025 pour une expérimentation d'un an.

- **Centre de recherche H2Mines**

Spécialisé dans les thématiques liés à l'hydrogène, l'institut rassemble 21 centres issus de huit écoles

d'ingénieurs. Ses recherches portent notamment sur le stockage en cavité saline, les membranes PEM ou encore, avec le projet Biosyn, la production d'hydrogène durable en couplant pyrogazéification et biométhanation.

- **Projet Hymeet**

Porté par le Cetim, ce projet se concentre sur les matériaux et les équipements pour les usages de l'hydrogène. Il est doté de 25 millions d'euros sur la période 2021-2025, soit le plus gros investissement réalisé depuis sa création.

- **Consortium H2 Accelerate**

Ce groupement est composé d'énergéticiens et de constructeurs automobiles comme TotalEnergies, Everfuel, Daimler ou encore Volvo Trucks. Soutenu à hauteur de 30 millions d'euros par le partenariat public-privé européen

UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN

Clean Hydrogen, il vise à installer huit stations de recharge pour piles à combustible en France et aux Pays-Bas et à produire 150 ensembles routiers.

- **SpeedH, Hyceval et Clean ICE**

Ces projets portent sur la technologie Hydrogen Internal Combustion Engine (HICE), une alternative à la propulsion électrique alimentée par une pile à combustible. SpeedH se focalise sur l'étude de la combustion, Hyceval cherche à développer deux prototypes de véhicules tandis que Clean ICE vise à mettre au point des démonstrateurs.

- **H2-PL Renault Trucks**

Mené par le constructeur automobile Renault, le projet a pour objectif d'identifier les avantages de la technologie HICE. Un investissement dans deux démonstrateurs a été réalisé pour un coût de 6 millions d'euros, dont 1,5 million financé par le Programme d'investissement d'avenir (PIA).

- **Elementa H2**

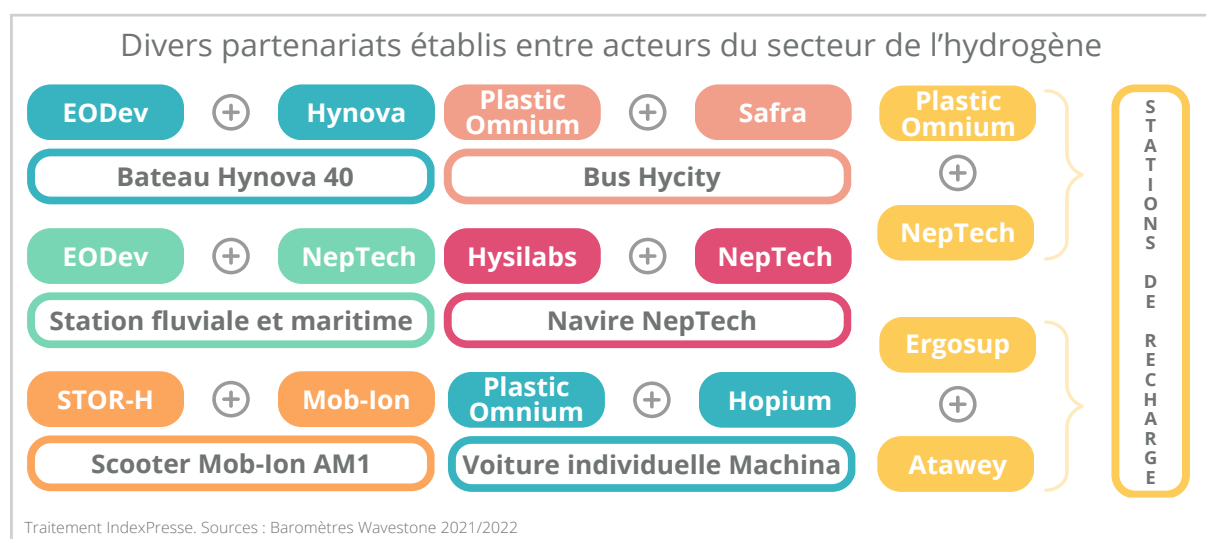
Une barge de rechargement des bateaux à hydrogène bas carbone doit être installée dans le port de Rouen en 2025 ou 2026, pour une durée de vingt ans. Piloté par la société HDF Energy et mené en partenariat avec Rubis Terminal, Améthyste ou encore le Cetim, le projet doit permettre de réduire de 80 % les émissions polluantes des escales dans la zone. Chef de projet chez HDF Energy, Léo Benotteau explique aux Échos : "Cette solution, qui étend le champ des possibles, permet aussi de démontrer que l'usage

DES COMPOSANTS ESSENTIELS PRODUITS EN FRANCE

La dynamique porte aussi sur la partie amont de la filière. Le chimiste américain Chemours a décidé début 2023 d'investir 200 millions d'euros sur son site de Villers-Saint-Paul (Oise) afin de produire des ionomères et des membranes Nafion, nécessaires aux électrolyseurs.

de l'hydrogène constitue une solution économiquement viable lorsque l'électrification directe n'est pas possible, soit parce que le réseau est trop éloigné, soit qu'il n'a pas assez de capacité ou quand l'emprise foncière ne le permet pas." Les grands ports européens sont engagés dans des transformations pour permettre le ravitaillement électrique ou hydrogène des navires ; les partenaires d'Elementa H2 souhaitent donc dupliquer la solution chez ces derniers.

D'autres partenariats se mettent en place dans le secteur, que ce soit **entre industriels ou entre start-up**. Les premiers collaborent entre eux ou avec des jeunes pousses pour accélérer leur transition énergétique. Les secondes s'appuient sur leurs pairs pour **compléter leur savoir-faire technologique**.



L'IFPEN, CENTRE DE RECHERCHE MAJEUR SUR L'HYDROGÈNE

L'Institut français du pétrole et des énergies nouvelles (Ifpen) dispose de plus de 800 chercheurs et d'un budget de 260 millions d'euros. Il possède en outre plusieurs bancs d'essai pour les innovations dans l'hydrogène. "L'Office européen des brevets vient de nous positionner comme le deuxième acteur mondial de la recherche sur l'hydrogène", se félicitait à l'été 2023 son directeur lyonnais, Éric Heintzé. Le laboratoire travaille notamment avec le groupe agroalimentaire Avril et la société Elyse dans le cadre du projet BioTJet, qui vise à développer des carburants de synthèse produits à partir d'hydrogène (ammoniac, méthanol... rassemblés sous le terme de *e-fuels*).

Le succès de l'hydrogène bas carbone reste entravé par de nombreuses contraintes

Un rapport prix/rendement contrasté

L'hydrogène gris affiche un prix très faible en comparaison de son équivalent décarboné : **entre trois et cinq fois inférieur**. Le magazine *Alternatives Économiques* avance de son côté des prix d'un à deux euros par kilo d'hydrogène gris, contre quatre à sept pour l'hydrogène vert. Les multiples étapes de transformation (de l'énergie primaire vers l'hydrogène, puis vers la pile à combustible) **réduisent considérablement le rendement énergétique**, notamment par rapport aux batteries lithium-ion. La production d'hydrogène "nécessite **trois à cinq fois plus d'énergie** que quand l'énergie renouvelable est directement utilisée", souligne Claudia Kemfert, directrice du département énergie à l'Institut de recherche économique de Berlin (DIW). Du fait de **la densité énergétique supérieure de l'hydrogène**, il est possible de parcourir une centaine de kilomètres avec un kilo d'hydrogène, ce qui le replacerait "à la parité avec l'essence" selon Julien Chauvet d'Engie Solutions. Toutefois, **le prix élevé des véhicules à hydrogène** (1,5 à 2,5 fois supérieur aux motorisations classiques selon *Alternatives Économiques*) dégrade fortement la compétitivité de l'hydrogène bas carbone. Il demeure **40 % plus cher que l'électricité** pour les véhicules légers selon l'Agence internationale de l'énergie.

Une complexité favorable aux énergies concurrentes

Le manque de compétitivité de l'hydrogène bas carbone est mis au regard du prix de l'hydrogène gris, mais également des autres sources d'énergie, ce que ne manquent pas de souligner leurs promoteurs : "La solution hydrogène n'est pas compétitive par rapport à **d'autres solutions de décarbonation** comme le bioGNV", indique ainsi dans *Alternatives Économiques* le directeur Gaz Renouvelables de GRTgaz, Anthony Mazzenga. Cette difficulté est notamment liée à **des problématiques techniques** : l'hydrogène est hautement inflammable, difficile à stocker, nécessite des technologies de compression très performantes et des équipements volumineux. L'intégration des systèmes dans les véhicules s'avère également une tâche complexe. Au-delà d'un certain seuil d'hydrogène utilisé dans un carburant ou transporté dans un pipeline, il se révèle **obligatoire d'adapter les équipements et les infrastructures**. L'écosystème de l'hydrogène reste donc à construire, là où celui de l'électricité est déjà fortement développé. Une étude du cabinet Meta Strategy Consulting réalisée en 2023 pointait les difficultés de la filière : **production insuffisante** pour au moins les vingt prochaines années, déploiement trop limité en termes d'infrastructures, montée en puissance bien plus rapide de la production de camions électriques...

UNE EFFERVESCENCE DE PROJETS SUR UN MARCHÉ PORTEUR, MAIS TECHNIQUEMENT INCERTAIN

Les **approches alternatives** censées accélérer l'usage de l'hydrogène **sont également critiquées**. Le rendement de la combustion interne (par opposition aux piles à combustible) est considéré comme faible, de même que celui des e-fuels. Ces derniers sont par ailleurs souvent **coûteux et générateurs de pollution** lors de leur utilisation. Le potentiel de l'hydrogène semble donc se réduire au fil du temps. Ancien directeur adjoint à l'énergie à la Commission européenne, Klaus-Dieter Borchardt a expliqué au média *Euractiv* : "Je me souviens que, lorsque nous avons commencé à rédiger la stratégie de l'hydrogène pour l'Europe, nous avons beaucoup de cas d'utilisation, beaucoup. Et, au fil des ans, l'un après l'autre, ils se sont perdus. Ce qui reste, ce sont les industries qui n'ont absolument pas d'autre choix".

Des défaillances dans le soutien à la filière

Le média *Euractiv* notait en 2023 que **seuls 6 % des projets annoncés** à l'horizon 2030 avaient réellement fait l'objet d'une décision ferme d'investissement (quand ils n'étaient pas déjà opérationnels). Cette faible proportion s'explique

par un **soutien parfois tardif** à se manifester. "Les décisions d'investissement restent timorées à cause de directives et de réglementations de la Commission européenne qui tardent", estime ainsi dans *Industrie & Technologies* le président de France Hydrogène, Philippe Boucly. L'AIE avance de son côté un **"manque de soutien politique** et les pressions croissantes sur les coûts." Les incertitudes sur le déploiement et **les tensions géopolitiques avec la Chine**, et leurs répercussions possibles sur les chaînes d'approvisionnement, représentent également des freins potentiels. **Le soutien financier s'avère en outre faible pour les start-up** : manque de capitaux au-delà de l'amorçage, frilosité des banques, complexité des divers systèmes de subventions... Jérémie Cantin, fondateur d'E-Neo, qui a fait faillite en 2023, déplore ainsi **l'absence d'accompagnement de la part des pouvoirs publics** : "Il est où, le plan hydrogène de 9 milliards ? À la télé, c'est sûr, mais pas une miette chez E-Neo. Pas plus qu'aucune aide d'aucun organisme officiel. Trop petit, trop vieux ou trop gros." Malgré le dynamisme apparent de la filière et les projets des grands industriels, **les nouveaux entrants peuvent donc faire face à des difficultés réelles** dans le financement du déploiement de leurs solutions.

Des échecs de start-up dans l'hydrogène

Plusieurs jeunes sociétés du secteur ont cessé leur activité malgré un démarrage prometteur. Créée en 2019 par le pilote de course Olivier Lombard, **la start-up Hopium souhaitait devenir "la Tesla de l'hydrogène"**. Elle s'est lancée en Bourse en 2020 et a réalisé plusieurs augmentations de capital pour un total de plus de 16 millions d'euros. Grâce notamment à un partenariat avec Plastic Omnium, la société a développé **son premier modèle, Machina**. Malgré des avancées en termes de développement et de dépôts de brevets, la berline développée par Hopium est **restée à l'état de prototype**. Sans chiffre d'affaires et voyant ses dépenses augmenter, l'entreprise a été contrainte de procéder à des licenciements tandis que des changements ont été opérés à la direction. Hopium a été placée en redressement judiciaire en juillet 2023. **La société E-Neo**, elle aussi fondée en 2019, a connu une trajectoire similaire. Spécialisée dans les kits de conversion (rétrofit) vers **une motorisation électrique ou hydrogène pour les poids lourds**, elle avait notamment collaboré avec Renault Trucks et DB Schenker et levé 100 000 euros en amorçage. Les difficultés réglementaires, financières et géopolitiques ont finalement conduit E-Neo à la liquidation, mais ses activités ont toutefois été intégrées au groupe Vensys. Quant à **la start-up Ergosup**, elle s'était lancée dans les stations à hydrogène avec une technologie spécifique de compression, et avait travaillé avec le spécialiste Ataway. Elle avait en outre **rassemblé 11 millions d'euros** en 2019.

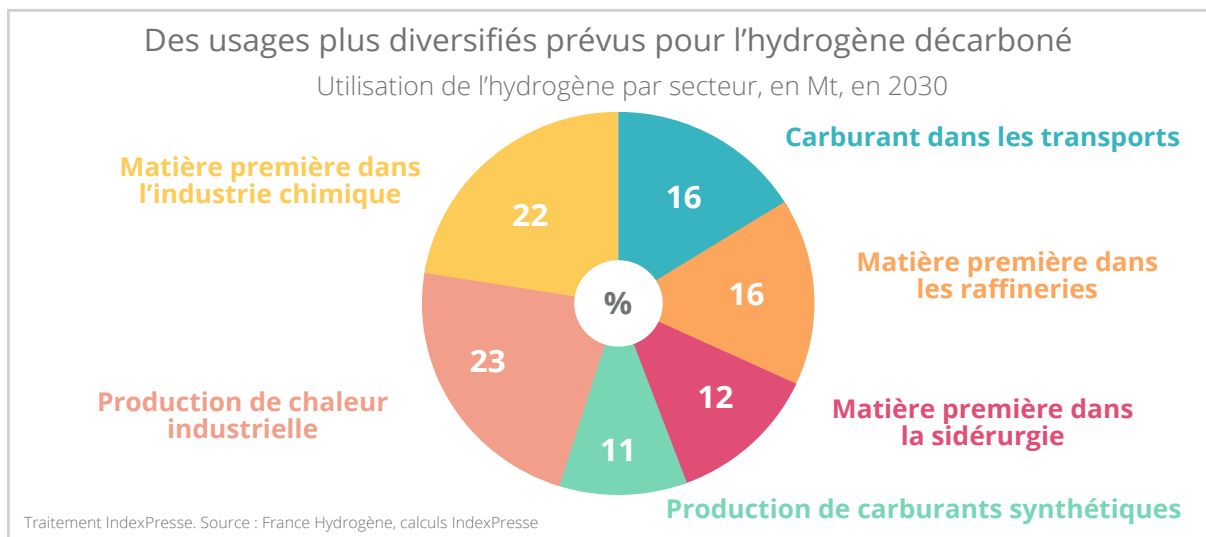
DES DÉBOUCHÉS SE DESSINENT DANS UNE VARIÉTÉ DE SECTEURS

L'hydrogène bas carbone se déploie chez les grands acteurs de l'industrie

Une substitution à l'hydrogène gris, mais aussi une diversification des usages

Les perspectives de l'hydrogène bas carbone s'annoncent prometteuses du fait de l'**absence d'alternatives crédibles dans certaines industries**, comme la métallurgie et la chimie. La mobilité lourde apparaît par ailleurs de plus en plus comme **un futur utilisateur massif d'hydrogène**. D'ores et déjà, les entreprises de transport convertissent progressivement leurs flottes de véhicules. **Le reste de la chaîne de valeur s'adapte** à cette dynamique : les producteurs d'hydrogène accroissent leurs capacités et les équipementiers automobiles investissent dans les composants adéquats. **Différents phénomènes sont à l'œuvre**, avec d'un côté la volonté d'aller vite, quitte à opter pour des technologies aux bénéfices écologiques moins élevés ; de l'autre,

la recherche se poursuit afin de développer de potentielles innovations plus abouties. **Les carburants de synthèse (e-fuels)** apparaissent comme une piste explorée par de nombreux acteurs, bien qu'ils présentent divers inconvénients. **Les objectifs de la Commission européenne** en matière d'utilisation d'hydrogène et de ses dérivés ont d'ailleurs été relevés pour 2030 : à cette date, **les trois quarts de la consommation de l'industrie devront être décarbonés**, tandis que cette part devra atteindre 5 % dans les transports. Cette conversion écologique devient cruciale alors que **les flux de personnes comme de marchandises ne vont cesser d'augmenter** : Airbus évalue ainsi à plus de 46 000 avions la flotte mondiale en 2040, soit un doublement par rapport à 2020.



DIVERSES TECHNOLOGIES ET MÉTHODES POUR UTILISER L'HYDROGÈNE COMME CARBURANT

L'approche la plus connue est sans doute représentée par la pile à combustible. Cette dernière est couplée à un moteur électrique, l'hydrogène servant à l'alimenter. Ce système a été inventé au XIX^{ème} siècle mais a été longtemps **délaissé à cause du coût élevé de la pile**, notamment du fait de l'utilisation de platine (un métal précieux) pour son fonctionnement. Différents types de piles à hydrogène existent, affichant **des avantages et des inconvénients spécifiques** (puissance, chaleur émise, rapidité du démarrage...). Chacun d'eux est donc destiné à des utilisations distinctes.

Une autre méthode consiste en la combustion en interne de l'hydrogène dans un moteur thermique. **Plus simple et moins coûteux que les piles**, ce dispositif bénéficie également d'une plus longue durée de vie que les équipements électriques. Il est possible d'y utiliser un hydrogène moins pur, voire des carburants de synthèse. Ces derniers sont **issus de mélanges entre de l'hydrogène et du CO₂**, capté au niveau des sites industriels puis acheminés vers les usines de production. Les pollutions émises s'avèrent très inférieures aux moteurs thermiques standards, mais peuvent toutefois demeurer **excessives pour la réglementation autour des ZFE** (zones à faibles émissions). L'électrification complète de la mobilité n'est pas optimale, tant pour des questions de performance pour les véhicules lourds que pour la stabilité du réseau. L'hydrogène dispose donc d'atouts pour **s'intégrer dans la diversification** des sources d'énergies utilisées.

Un recours accru à l'hydrogène décarboné dans l'industrie et la mobilité

Une multitude d'initiatives sont lancées par les usagers des technologies hydrogène pour décarboner leurs activités.

- TotalEnergies a lancé un appel d'offres fin 2023 dans le but d'acheter jusqu'à **500 000 tonnes d'hydrogène vert par an**. Il souhaite décarboner ses huit raffineries européennes d'ici 2030 et stimuler la filière en lui offrant un débouché important. "L'objectif est de **trouver l'hydrogène vert le plus compétitif possible** en mettant en concurrence tous les projets et tous les modèles d'affaires existants, en Europe ou ailleurs dans le monde", explique aux *Échos* Sébastien Bruna, directeur hydrogène chez TotalEnergies (branche raffinage et chimie).
- Le groupe Vallée, spécialisé dans la logistique pour le secteur du BTP, a annoncé en 2023 vouloir intégrer **50 véhicules à hydrogène** à sa flotte d'ici 2030, dont deux en 2024, auprès de la société Hyliko.
- Le transporteur Bert&You s'est lui aussi rapproché de Hyliko pour se doter de **sept véhicules à propulsion hydrogène**, dont un premier dès 2023. Bert&You vise à l'horizon 2026 une flotte d'**une cinquantaine de véhicules hydrogènes** ou électriques. Cette conversion à l'hydrogène revêt une importance significative pour les clients de Bert&You, qui comptent sur l'engagement du transporteur de faire certifier leurs produits "à empreinte carbone négative".
- Le groupe Berto, spécialiste de la location de véhicules industriels, s'est quant à lui engagé à réaliser l'acquisition de **230 poids lourds à hydrogène** afin de les intégrer dans son offre de mobilité bas carbone.
- DB Schenker souhaite s'équiper de **11 camions roulant à l'hydrogène** dans le cadre d'un accord avec E-Néo. La société continue de travailler avec ses clients malgré sa liquidation et son intégration au sein de Vensys. L'opération était prévue pour être finalisée dans le courant de l'année 2024.
- Le groupe Manitou, spécialisée dans les véhicules logistiques et de manutention, investit

dans le développement d'engins propulsés à l'hydrogène. Il espère proposer les premiers chariots à la commercialisation d'ici 2026. Fonctionnant grâce à une pile à combustible, **son premier prototype MT1840** a été présenté en décembre 2022. **Manitou s'est entouré de plusieurs partenaires** pour créer le chariot : Lhyfe fournit l'hydrogène vert, Symbio s'occupe de l'intégration de la pile produite par Dintec, tandis que le Cetim se focalise sur le réservoir à hydrogène. **Des tests doivent être réalisés** auprès du groupe de BTP Bouygues et du spécialiste de la location de matériel professionnel Loxam.

- Dans le cadre d'un appel à projets de l'Ademe, le constructeur Renault a travaillé sur le moteur thermique à hydrogène. Il souhaite **proposer un modèle de camion** entre 2025 et 2030. Le groupe avance des gains financiers et de rejets de chaleur avec son choix technologique. Il travaille en parallèle avec l'Ifpen, également sur un projet de camion.
- Des constructeurs étrangers veulent aussi se positionner, avec notamment l'italien Iveco qui devrait **livrer ses premiers clients français en 2024**. Il a conçu des poids lourds à pile à combustible. Volvo Trucks a de son côté réaliser des expérimentations au nord du cercle polaire, visant **un premier modèle en 2027 ou en 2028**. Mercedes se positionne également sur le marché avec le prototype GenH2 Truck, qui offre une autonomie de 1 000 km. La commercialisation est attendue pour 2027.
- Les constructeurs japonais cherchent aussi à profiter de l'engouement pour l'hydrogène. Toyota n'a d'ailleurs pas cru au succès de l'électrique et a tardé à s'y positionner, **privilégiant l'hybride et l'hydrogène** comme solutions bas carbone. Toyota et Yamaha ont présenté début 2023 **un moteur à hydrogène pour voiture individuelle**. D'autres constructeurs du pays se sont associés à eux pour poursuivre les recherches sur l'hydrogène : Kawasaki, Subaru et Mazda.
- En fin d'année 2023, les armateurs CMA-CGM et Maersk se sont associés pour **accélérer le développement de carburants de synthèse** dédiés au transport maritime. Il s'agira de partager certains investissements

L'HYDROGÈNE POUR DÉCARBONER L'AGRICULTURE ?

La suppression de la niche fiscale sur le gazole non routier pour les agriculteurs, décidée début 2023, vise à accélérer la conversion des tracteurs à des modes de propulsion moins carbonés. L'électrique n'étant pas viable dans ce domaine, l'hydrogène pourrait représenter une solution. L'offre est toutefois encore peu structurée commercialement et techniquement, ce qui génère des interrogations quant à la capacité des agriculteurs à mener à temps cette transition.

et des projets de R&D. Le groupe danois a par ailleurs commandé **25 navires fonctionnant au méthanol vert**, dont 19 seront livrés d'ici 2025. Il souhaite en outre implanter jusqu'à six sites de production d'e-méthanol dans le monde, notamment en Espagne et en Egypte. De son côté, **CMA-CGM dispose de 32 navires** propulsés au gaz naturel liquéfié (GNL) et pouvant utiliser du méthanol. Il a de plus **commandé 24 navires** fonctionnant à ce carburant synthétique. Les deux groupes veulent également développer les solutions d'hydrogène ou d'e-fuels dans les ports.

- Le port d'Anvers, en Belgique, a accueilli en 2023 **le premier remorqueur propulsé à l'hydrogène**, l'Hydrotug. Construit par la Compagnie maritime belge, il utilise également le diesel comme auxiliaire, pour 15 % de sa puissance.
- Airbus a lancé un vaste programme de développement d'**un avion à hydrogène** prévu pour l'année 2035. Après avoir fait des recherches sur les différents types de carburants possibles à partir de 2018, le groupe aéronautique a opté pour l'hydrogène et **doit choisir la technologie** (moteur à combustion ou pile à hydrogène) en 2027 ou 2028. **Cette décision aura des impacts majeurs** sur la chaîne de production et les relations avec

les partenaires, notamment dans **la mise en place d'un écosystème pour la motorisation électrique** de l'avion si le choix se porte sur la pile à hydrogène. Airbus travaille ainsi avec des énergéticiens comme Engie et Air Liquide ainsi que des aéroports pour les questions de stockage, d'approvisionnement et de distribution. Le constructeur aimerait à terme constituer **une famille d'appareils propulsés à l'hydrogène**, mais la création du premier modèle représente déjà un défi technique considérable. "Il faut **stocker [l'hydrogène] à - 253°C** pour le maintenir sous forme liquide, et il nécessite encore **quatre fois plus de volume que le kérosène**. En outre, l'hydrogène pose des problèmes d'étanchéité et de fragilisation des matériaux du fait de la très petite taille de cette molécule qui s'infiltrerait facilement." Ces problématiques ont conduit Airbus à **se tourner vers des partenaires spécialistes** des différentes techno-

logies à intégrer. CFM International, **coentreprise entre Airbus, Safran et General Electric**, se concentre sur les questions de motorisation. **Une collaboration nouée avec ArianeGroup** permet d'avancer sur le stockage et l'utilisation de l'hydrogène, l'industriel y recourant fréquemment pour la propulsion des fusées. Au sujet des piles à combustible, **une autre coentreprise a été créée**, cette fois-ci avec l'équipementier automobile allemande ElringKlinger. **Quatre centres de R&D ZEROe** (zéro émission) ont été par ailleurs implantés à Nantes, Brême (Allemagne), Madrid (Espagne) et Filton (Royaume-Uni). Des avancées majeures ont été réalisées et l'avionneur procédera à des tests entre 2026 et 2028 grâce à son "laboratoire volant", l'A380 MSN1. Le coût total du programme devrait s'établir **entre 15 et 20 milliards d'euros**.

Les équipementiers de la mobilité prennent le virage de l'hydrogène

Le développement de l'hydrogène transforme la filière de la mobilité. Les équipementiers traditionnels s'adaptent peu à peu à ce combustible et modifient leur production en conséquence.

Leader international des réservoirs à essence, Plastic Omnium "trouve naturellement **un relais de croissance dans les systèmes de stockage d'hydrogène à haute pression**", analyse *Investir*. Exposant ses ambitions sur ce segment depuis le début de la décennie 2020, le groupe compte en 2023 un carnet de commandes s'élevant à près de 3 milliards d'euros. En 2030, il vise 25 % de parts de marché et **la place de numéro 1 mondial sur les réservoirs à hydrogène**. 100 millions d'euros d'investissements annuels sont programmés pour y parvenir. Dans la pile à hydrogène, le groupe a fondé Ekpo en 2021 avec ElringKlinger et a annoncé fin 2022 la construction à Compiègne (Hauts-de-France) de la plus grande usine de réservoirs à hydrogène d'Europe (80 000 unités par an à partir de 2025).

Forvia (ex-Faurecia) apparaît comme un concurrent direct de Plastic Omnium. En juin 2023, l'entreprise a inauguré **la première ligne française de production en série de réservoirs de type 4** (polymère et fibre de carbone), capables de stocker l'hydrogène. Elle cumule 1,2 milliard d'euros dans son carnet de commandes et espère atteindre 3,5 milliards d'euros de facturation en 2030 sur l'ensemble de ses activités hydrogène. "L'équipementier **concentre ses efforts sur la mobilité routière lourde**, des véhicules utilitaires aux poids lourds, en passant par les bus, et sur des réservoirs de stockage fixe", précise *Investir*. **Symbio, sa coentreprise** dans les piles à hydrogène cocrée avec Michelin, prévoit d'investir un milliard d'euros d'ici 2028 et dispose d'un gigafactory dans le département du Rhône.

Le chimiste Arkema veut également participer à la transition de la mobilité vers l'hydrogène. Il mène des travaux de R&D et développe des matériaux adaptés aux nouveaux réservoirs. "Nous avons vocation à **lever des verrous technologiques et à apporter des solutions innovantes et de rupture** tout au long de la chaîne", indique Armand Ajdari, directeur de la R&D d'Arkema, auprès de *L'Usine Nouvelle*.

DES PREMIERS TRAINS À L'HYDROGÈNE DÉPLOYÉS EN FRANCE EN 2025

Après avoir réalisé plusieurs tests de son train à pile à hydrogène Coradia iLint sur le territoire français (Tours, Valenciennes...), le constructeur Alstom s'apprête à livrer une douzaine de TER à quatre régions à l'horizon 2025 : Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est et Occitanie. Ces trains seront "bi-modes", c'est-à-dire alimentés à la fois par caténaires et par hydrogène. Leur exploitation commerciale devrait débuter en 2025. Alstom a déjà déployé des trains à hydrogène en Allemagne, mais y connaît des déboires en raison de leurs coûts, et va mener des projets en Italie. Plastic Omnium s'occupe de la fourniture des équipements.

- Via sa filiale Hynamics, EDF et le spécialiste des polymères Domo Chemicals se sont associés dans le projet HyDom pour **décarboner une usine de polyamides** située dans la Vallée de la chimie (au sud de Lyon). À horizon 2027, **la totalité de la production sera assurée** par un approvisionnement en hydrogène bas carbone. Les polyamides (matières plastiques) seront notamment destinés au secteur automobile et dans l'électronique.
- La coopérative Vivescia a initié en 2023 une expérimentation concernant **l'usage d'engrais azoté produit à partir d'ammoniac décarboné**. De l'hydrogène vert (photovoltaïque) est utilisé dans la production de l'engrais, répan- du sur 200 hectares en France. **Le fournisseur d'engrais est l'espagnol Fertiberia**, qui a inauguré en 2022 cette unité de production d'hydrogène vert (3 000 tonnes par an) dans le sud de l'Espagne. Vivescia considère la substitution aux engrais carbonés pertinente mais souligne le coût élevé des alternatives.
- Le groupe sidérurgique ArcelorMittal souhaite investir **1,7 milliard d'euros pour convertir trois de ses sites français** (sur cinq) afin de décarboner sa production d'acier. Il est soutenu financièrement par l'État français à hauteur de 850 millions d'euros, soit la moitié de l'investissement.
- La production d'acier décarboné grâce à l'hydrogène **se déploie aussi en Suède avec l'appui du fonds français Hy24**. La société H2 Green Steel, fondée en 2021, prévoit une mise en service de son usine en 2025. Elle a **levé 1,8 milliard d'euros de fonds propres** depuis sa création, dont 1,5 milliard en septembre 2023, et plus de 3,5 milliards d'euros de dette. Elle a également signé un accord avec l'énergéticien espagnol Iberdrola en 2021 afin de construire **une autre usine de production de minerai d'acier par hydrogène décarboné** dans la péninsule ibérique. Le projet doit être opérationnel en 2025 ou 2026 et représente **un investissement de 2,3 milliards d'euros**. Celui-ci sera financé en partie par des fonds publics. L'usine devrait produire deux millions de tonnes de minerai chaque année, et **les partenaires souhaiteraient étendre l'initiative le long de la chaîne de valeur** avec une unité de production de plaques d'acier (jusqu'à 5 millions de tonnes par an) qui serait implantée à proximité.
- Leader de la production d'engrais azotés, l'entreprise norvégienne Yara se positionne dans **la production d'ammoniac à base d'hydrogène bas carbone**. "Depuis 5 ans, nous nous préparons à passer à l'ammoniac vert, en utilisant de l'hydrogène à partir d'électrolyse décarbonée", explique ainsi dans *Les Échos* le dirigeant de la filiale française du groupe, Nicolas Broutin. Un projet pilote a été lancé en Norvège afin de **produire jusqu'à 20 000 tonnes d'ammoniac par an**. Des projets ont également été mis en place aux Pays-Bas et en Australie. Outre les intrants pour l'agriculture, Yara cherche à **cibler le marché des carburants pour le secteur maritime**. Le groupe a dans ce but signé en 2021 un accord avec le négociant en matières premières Trafigura. Plus globalement, ses investissements dans l'hydrogène lui permettent de **diminuer ses émissions de gaz à effet de serre**. Par rapport à 2005, Yara avait réduit la pollution émise de 45 % en 2019, et vise à passer à une baisse d'au moins 55 % à l'horizon 2030.

Avec GravitHy, un consortium pour produire du minerai de fer bas carbone

L'institut technologique européen EIT InnoEnergy a rassemblé cinq grands acteurs industriels en 2022 afin de créer une nouvelle société dans le domaine de la sidérurgie décarbonée. Engie, Forvia, Plug Power, Primetals Technologies et Idec ont donc fondé l'entreprise GravitHy, avec l'objectif d'installer dans le bassin industriel de Fos-sur-Mer (Bouches-du-Rhône) **une usine de production de minerai de fer recourant à de l'hydrogène bas carbone**. Son directeur général, José Noldin, indique dans *Les Échos* : "Nos clients seront à la fois des sidérurgistes, auxquels nous fournirons une matière première décarbonée, et des utilisateurs finaux, dans l'automobile ou l'électroménager, cherchant à sécuriser leur approvisionnement en acier bas carbone." **L'investissement, d'environ 2,2 milliards d'euros**, devrait être décidé en 2025, avec un démarrage de l'activité autour de l'année 2027. L'usine afficherait une capacité de deux millions de tonnes de minerai par an. GravitHy souhaite réaliser **une levée de fonds de 50 à 70 millions d'euros** en 2024 pour poursuivre les recrutements et les études techniques. Elle cherche à sécuriser son approvisionnement en électricité, qui représentera 40 % de ses coûts et alors qu'elle aura besoin d'un GWh de capacité. Ce point est d'autant plus crucial que l'acier bas carbone coûtera plus cher, mais le dirigeant de GravitHy reste confiant : **"Il y a déjà un marché de niche**, des clients déjà prêts à payer une 'prime verte' pour de l'acier décarboné. Notre minerai réduit sera certes plus cher, de 20 % environ : **nous estimons le surcoût de l'acier produit entre 20 % et 30 %**. Mais l'impact sur les produits finis sera limité, de 200 à 300 euros sur une voiture par exemple".

De nouveaux projets surtout portés par des acteurs émergents

Une variété de nouveaux entrants se lance sur le marché en ciblant des cas d'usage spécifiques, en particulier dans les différentes mobilités. Leurs solutions, utilisatrices d'hydrogène bas carbone,

offrent des débouchés aux producteurs tout en promouvant une transformation de ces secteurs fortement émissifs.

Des modèles d'affaires innovants dans la mobilité terrestre

Le retrofit hydrogène avec Green Corp Konnection

Créé en 2020, ce groupement rassemble **neuf sociétés industrielles** situées en Auvergne-Rhône-Alpes, dont le motoriste Solution F, ra-

cheté en 2022, et Flex'Hy, fondée la même année et spécialisée dans la distribution d'hydrogène. Green Corp Konnection (GCK) se concentre sur **la pratique du retrofit** : le groupe transforme des véhicules thermiques en véhicules propulsés à l'hydrogène (ou grâce à des batteries électriques).

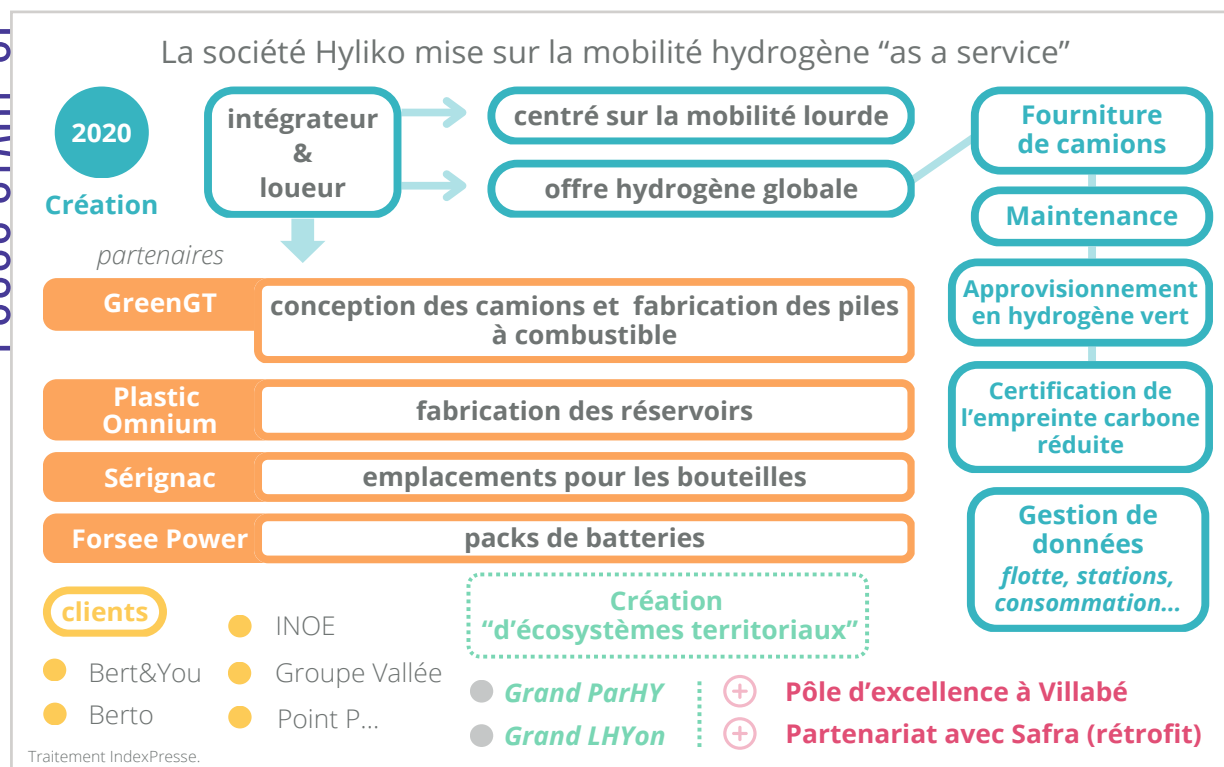
Cette conversion s'adresse principalement aux poids lourds ayant au moins cinq ans d'ancienneté. Outre les camions et les utilitaires, GCK cible également les bus, les dameuses ou encore les bateaux. Fin 2022, il a inauguré un troisième site de retrofit situé près de Clermont-Ferrand, dans le Puy-de-Dôme, pour un investissement d'environ 3 millions d'euros. Le groupe possède d'autres sites dédiés à la production de pièces détachées et d'équipements. GCK a par ailleurs investi plus de 7 millions d'euros en R&D et connaît une croissance soutenue : 20 millions d'euros de chiffre d'affaires en 2022 (un doublement en un an) pour 150 salariés. "Les perspectives du groupe pour 2023 sont de passer le cap des 200 salariés, de doubler le chiffre d'affaires et de lancer la production en série de véhicules rétrofités", déclaraient les dirigeants du groupe à L'Usine nouvelle en milieu d'année 2023. Les collectivités représentent les principaux clients de GCK, en particulier en Auvergne-Rhône-Alpes du fait du soutien apporté par la Région à la filière hydrogène. Début 2023, le groupe annonçait disposer d'une cinquantaine de commandes fermes et de 500 intentions de précommandes. Il a no-

tamment signé des contrats avec la Communauté urbaine de Dunkerque pour des véhicules d'évacuation de déchets, avec les transporteurs Autocars Dominique & B.E green et Ginhoux (autocars) ou encore avec l'Alpe d'Huez pour des dameuses à hydrogène. GCK a levé des fonds à deux reprises, une première fois en 2022 à hauteur de 15 millions d'euros et une seconde opération l'année suivante d'un montant non communiqué.

Symone, des bus transportant des passagers et leurs véhicules

Cette start-up, fondée en 2020, souhaite développer des cars pouvant accueillir les véhicules des passagers sur leur toit. Le concept s'appuie ainsi sur deux méthodes pour décarboner le transport : d'une part, la mutualisation du trajet, à l'image du covoiturage ; d'autre part, l'utilisation d'hydrogène vert pour la propulsion des cars. Les passagers réservent leur place via une application dédiée et sont récupérés par le car en amont des péages. Un premier prototype est attendu pour 2024, les fondateurs voulant profiter des Jeux Olympiques de Paris pour

FOCUS START-UP



faire découvrir leur innovation. Si les tests sont concluants, **l'exploitation commerciale pourrait débuter à partir de 2025**, d'abord uniquement en Bourgogne-Franche-Comté. Le service ne serait

pas généralisé à l'ensemble du pays avant 2030. **Symone a démarré une levée de fonds** sur la plateforme Sowefund fin 2023, espérant collecter 300 000 euros.

Le secteur maritime adopte à son tour l'hydrogène

Les navettes fluviales de SeaBubbles

Fondée en 2015 par le navigateur Alain Thébault, cette société cherche à se positionner sur le marché de la mobilité fluviale grâce à **des navettes propulsées à l'hydrogène** et utilisant des *foils* (ailes immergées). Après la réalisation d'un démonstrateur en 2019, **SeaBubbles souhaitait faire naviguer ses engins sur la Seine** pour les Jeux Olympiques de Paris. La municipalité s'est toutefois montrée peu enthousiaste pour le projet, imposant de fortes restrictions sur la vitesse de circulation des navettes. **Le rachat de l'entreprise par le fonds Mediapps Innovation** en 2020 a conduit au départ d'Alain Thébault. SeaBubbles a modifié son projet avec **la conception de "li-**

mousines fluviales", des navettes plus haut de gamme pouvant accueillir davantage de passagers (huit au lieu de quatre). Leur vitesse de navigation a été réduite, et **leur propulsion s'appuie sur l'électrique comme sur l'hydrogène**. Le prix unitaire des navettes a en outre été sensiblement réhaussé, de 250 000 euros à 900 000 euros. L'entreprise s'est **installée à Annecy** (Haute-Savoie) afin de pouvoir tester ses prototypes sur le lac de la ville et de s'intégrer à l'écosystème hydrogène local. **Une ligne de transport régulière** y a été mise en place durant la période estivale. Dans le cadre d'un **contrat avec les Émirats arabes unis**, elle a lancé la gamme de navettes en édition limitée X Pearl. Les premières livraisons étaient attendues en 2023. SeaBubbles espère pouvoir **commercialiser une centaine de navires**

Energy Observer, une fondation et une start-up dédiées à la décarbonation maritime

L'association Energy Observer a lancé en 2017 le premier navire énergétiquement autonome, pour un tour du monde d'une durée de six ans. Ce voyage a pour vocation de montrer le potentiel des énergies renouvelables. L'Energy Observer 1 est **principalement propulsé grâce à l'hydrogène**, mais dispose également d'une variété d'autres sources d'énergies (éolienne, hydrolienne, photovoltaïque et houlomotrice). La fondation a ensuite **lancé en 2019 la start-up EODev**, pour Energy Observer Developpements, afin de concevoir un second navire à propulsion hydrogène et vélique. En deux opérations, **la start-up a rassemblé 22,4 millions d'euros** et travaille avec Air Liquide (sur le plan technique) et CMA CGM (au niveau commercial). Le prototype doit être finalisé en 2026 et permettre à terme de **décarboner les cargos de 5 000 tonnes**, qui représentent 37 % de la flotte mondiale selon le journal *La Tribune*. "Avec ce navire démonstrateur, nous souhaitons aller au bout de la décarbonation des navires industriels de taille moyenne **en utilisant directement l'hydrogène comme combustible**", confirmait en 2022 le fondateur d'Energy Observer, Victorien Erussard. Ce second navire pourra transporter entre 50 et 70 tonnes d'hydrogène liquide permettant d'alimenter des piles à combustible et un moteur électrique, offrant une autonomie d'environ 7 400 km.

DES FERRYS PROPULSÉS À L'HYDROGÈNE

Les acteurs du transport de passagers sur courte distance et par voie maritime s'intéressent eux aussi à l'hydrogène comme carburant. En milieu d'année 2023 a eu lieu en Norvège la traversée inaugurale de l'Hydra, premier ferry à hydrogène liquide au monde. En France, le projet Hylias doit se concrétiser durant l'année 2024. Le ferry pourra transporter entre 150 et 200 passagers, assurant la liaison entre le port de Vannes (en Bretagne) et l'île d'Arz. À terme, plusieurs navires pourraient circuler dans le golfe du Morbihan.

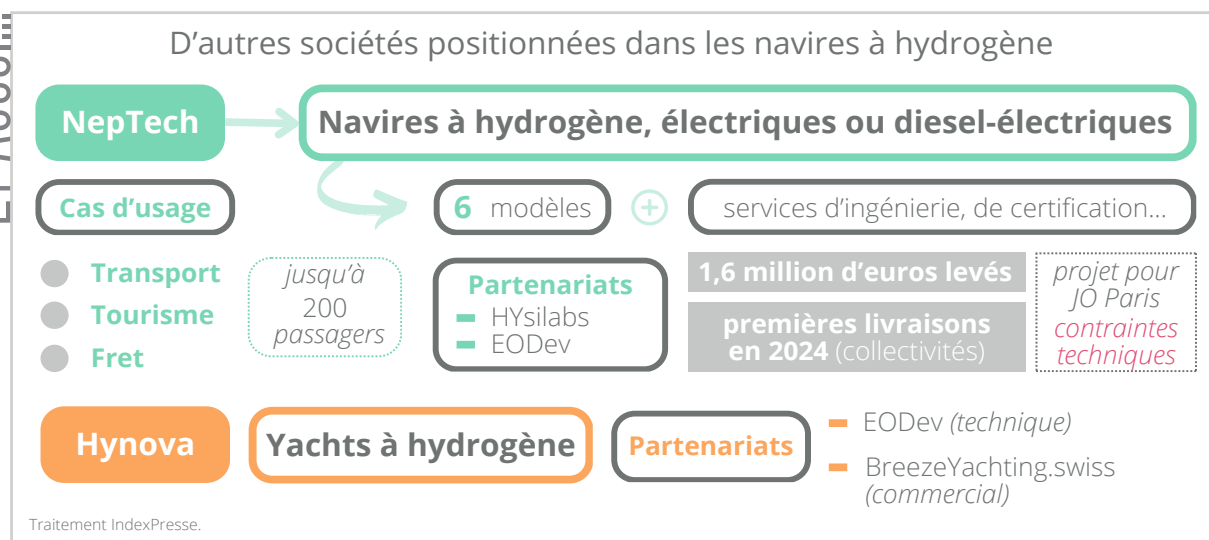
par an à l'horizon 2027, auprès de clients situés dans quatre à cinq pays. La société a par ailleurs été **soutenue à hauteur de 8 millions d'euros** par Bpifrance.

Après son départ de SeaBubbles, Alain Thébault a toutefois voulu poursuivre la mise en œuvre de son projet. Il a ainsi créé l'entreprise **The Jet zéro émission** en Suisse, un concurrent direct de son ancienne entreprise. Les navettes fluviales seraient **plus rapides** que celles de SeaBubbles (70 km/h contre 40 km/h) et transporteraient également jusqu'à huit passagers. Elles seraient avant tout **destinées aux hôtels de luxe** et aux particuliers aisés. Leur propulsion s'appuierait sur deux piles à combustible utilisant de l'hydrogène. **Un second modèle plus imposant** est par ailleurs prévu pour la clientèle des collectivités et des autorités publiques. Il pourrait transporter jusqu'à 32 passagers.

The Jet a opté pour **un modèle économique différent** de SeaBubbles. Si celle-ci cherche à vendre ses navettes, la nouvelle entreprise d'Alain Thébault a fait **le choix du leasing**. La construction des navires est déléguée à des partenaires, et les navettes sont louées à des sociétés exploitantes. "Nous sommes en discussion avec différents acteurs, et notamment **des palaces situés en bord de lac ou de mer**, dans les grands centres urbains mondiaux", expliquait ainsi le fondateur au journal *Le Monde* en 2022.

La société a notamment reçu des précommandes de la part de l'entreprise émiratie Zenith Marine Services et du fonds d'investissement Dwyne, lui aussi basé à Dubaï. Ces derniers envisagent par ailleurs de **participer à la future levée de fonds** que The Jet souhaite mener, dans le but de rassembler 10 millions d'euros et de pouvoir lancer la production. La start-up a reçu le soutien de la fondation Albert II de Monaco.

ET AUSSI...



Des innovations dans la mobilité aérienne

Beyond Aero développe un avion à hydrogène

Cette start-up implantée au sein de l'écosystème aéronautique, à Toulouse, a pour objectif de développer un avion à hydrogène d'ici 2030. Lancée en 2020, elle cherche à se démarquer par l'ampleur de ses ambitions. "Nous visons un rayon d'action de plus de 1 000 miles nautiques (1 850 km), soit **trois à quatre fois plus que la plupart des projets concurrents**", explique la cofondatrice Eloa Guillotin au magazine *Challenges*. Il s'agirait d'aéronefs de petite taille, pour six à dix passagers. Beyond Aero a choisi de créer un nouvel avion plutôt que de s'appuyer sur le rétrofit afin d'**optimiser ses caractéristiques pour la propulsion hydrogène**. La société a obtenu rapidement le soutien de la région Occitanie, de business angels et de Bpifrance, rassemblant ainsi **3 millions d'euros**. Ce financement lui a permis de développer **un démonstrateur en 2022**, basé sur un modèle d'ULM (aéronef ultraléger motorisé). Beyond Aero est par ailleurs **soutenue par l'Onera**, laboratoire public spécialisé dans l'aéro-

nautique, le spatial et la défense. Elle a en outre intégré **le programme d'accélération Blast**, créé par l'Onera ainsi que plusieurs organisations de l'écosystème aérospatial (l'incubateur Starburst, l'école Polytechnique et la Société d'accélération des transferts de technologies de Paris-Saclay). Pour son projet d'avion à pile à hydrogène, la start-up bénéficie aussi de l'appui du plan France Relance. En 2023, elle a effectué **une levée de fonds de 24 millions d'euros** lui permettant d'avancer dans le développement d'un plus grand modèle d'avion. Elle aurait déjà reçu **360 millions de dollars de lettres d'intention** de clients potentiels pour ce futur aéronef.

De l'électrique vers l'hydrogène

D'autres jeunes sociétés françaises, initialement positionnées dans l'avion bas carbone grâce à une propulsion électrique (par batteries), cherchent à **se diversifier dans l'avion à hydrogène**. C'est notamment le cas de VoltAero et d'Aura Aero. Fondée en 2017, la première a mis au point un aéronef hybride (thermique et électrique) et dé-

HyLight, un ballon dirigeable à hydrogène

Cette société fondée en 2022 développe des ballons propulsés à l'hydrogène, offrant **une solution complémentaire pour la surveillance de zones** et d'infrastructures (pipelines, chemins de fer, espaces naturels, parcelles agricoles, cartographie...). "Les drones électriques manquent d'autonomie en vol, les hélicoptères sont polluants et onéreux, et les satellites ne permettent pas un degré de précision suffisante pour nos applications", explique aux *Échos* le fondateur, Théo Hoenen. Le principal modèle, de 10 m de long, peut **voler une vingtaine d'heures et embarquer 10 kg d'équipements**, comme des caméras et des capteurs. Six prototypes ont été réalisés (dont deux commercialisables), et une démonstration a permis à la société de **décrocher deux clients** : Enedis et l'énergéticien italien Snam. HyLight a été lauréate en 2023 du programme Propulse de l'Agence de l'innovation pour le transport. La start-up a également été **accompagnée au sein de l'incubateur de l'université de Berkeley**, en Californie (États-Unis). Les dirigeants de HyLight y ont notamment rencontré le cofondateur de Tesla, Marc Tarpenning, et Abhishek Tripathi, ancien directeur des lancements chez SpaceX. Ces derniers accompagnent toujours la société au sein d'un conseil consultatif. HyLight a reçu **140 000 euros de Bpifrance** et souhaite procéder à une levée de fonds afin d'accélérer son développement, mais elle se concentre pour l'instant sur les aspects techniques. À terme, elle pourrait **diversifier les usages de son dirigeable à hydrogène**, par exemple dans le transport de marchandises, dans le tourisme ou dans le domaine humanitaire.

LES START-UP AMÉRICAINES, EN POINTE DANS L'AVION À HYDROGÈNE

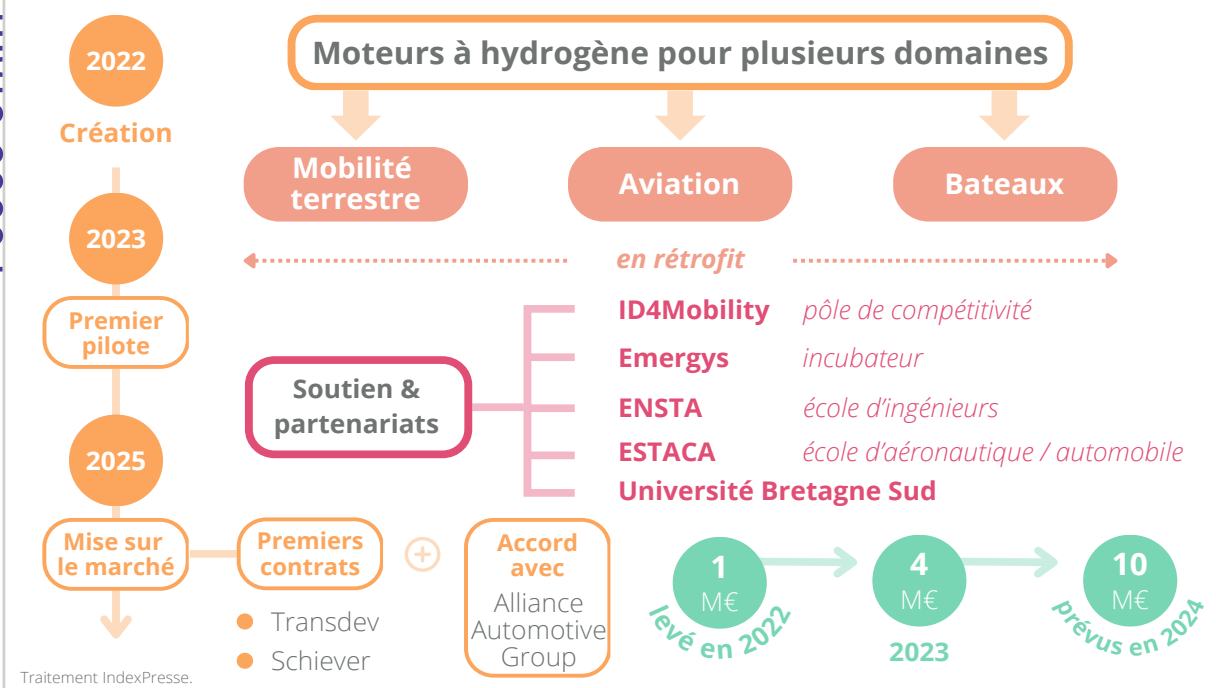
Bénéficiant de financements nettement plus élevés outre-Atlantique, les entreprises américaines progressent rapidement dans la voie de l'avion propulsé à l'hydrogène. Fondée en 2018, l'anglo-américaine ZeroAvia a ainsi reçu 150 millions de dollars, ce qui lui a permis de tester le vol d'un avion de 19 places en janvier 2023. Elle s'appuie sur des appareils rétrofités et cherche à assurer des vols commerciaux dès 2026, avec 100 passagers par trajet. Elle est soutenue par Bill Gates, Jeff Bezos, Airbus, American Airlines ou encore le gouvernement britannique. Quant à Universal Hydrogen, elle a été lancée en 2020 et a récolté plus de 100 millions de dollars notamment auprès d'Airbus et de Toyota. Elle a réalisé un test sur un avion de 40 places en mars 2023 et souhaite commercialiser des kits de conversion à partir de 2025. Elle disposerait de plus d'un milliard de dollars de commandes et effectue des tests avec la compagnie aérienne française Amelia pour des vols commerciaux en 2025.

veloppe un modèle fonctionnant à l'hydrogène au sein de sa gamme Cassio. La société développe des avions d'une capacité de 6 à 12 passagers. Elle a levé **32 millions d'euros** en 2022. De son côté, Aura Aero, créée en 2018, développe des avions biplaces ainsi qu'un modèle pouvant accueillir 19 sièges. Si elle n'a pas encore annoncé de projet dans l'hydrogène, elle s'est installée sur la base aérienne de Franczal, à Toulouse,

qui rassemble l'écosystème du secteur et va accueillir à partir de 2024, sur 15 000 m², **le plus grand technocampus d'Europe dédiée à l'hydrogène** pour l'avion bas carbone. La société indique avoir "vocation à intégrer toutes les améliorations technologiques qui s'inscrivent sur la route de l'aviation décarbonée", ce qui pourra également comprendre les motorisations électriques alimentées par des piles à hydrogène.

FOCUS START-UP

Efficient Hydrogen Motors se positionne dans la mobilité lourde multisectorielle



Stocker et produire de l'électricité pour rendre plus flexible un réseau électrique décarboné

L'intermittence des énergies renouvelables nécessite des moyens flexibles pour **réinjecter de l'électricité dans le réseau au moment propice** et éviter des ruptures d'approvisionnement. Le **stockage par l'hydrogène** présente un potentiel prometteur, et permet en outre de décentraliser encore davantage le réseau.

Des projets se mettent en place

- Territoire Habitat, le bailleur social de la ville de Belfort, prévoit de construire en 2024 deux immeubles comportant chacun une quinzaine de logements. L'un des bâtiments sera équipé d'un **dispositif de production, de stockage et d'utilisation d'hydrogène**. Identique au premier, le second bâtiment doit servir de point de comparaison pour évaluer les performances du système.
- Le quartier pilote Atlantech, situé à Lagord, dans l'agglomération de La Rochelle, est doté d'équipements permettant la production d'électricité issue de panneaux photovoltaïques et **son stockage sous forme d'hydrogène**. L'objectif consiste à s'appuyer sur ce dispositif local dans une démarche d'autoconsommation et donc d'autonomie énergétique.
- La ville d'Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) a présenté en 2021 **un projet d'écoquartier à hydrogène**. S'intégrant dans une logique de *smart city* (ville connectée), il introduirait **un pilotage de la consommation** pour éventuellement atteindre une production

énergétique excédentaire. L'hydrogène serait également présente dans l'organisation de la mobilité douce avec l'installation d'une borne de recharge au bord de la Seine.

- L'hydrogène peut également être employé pour alimenter en électricité **des événements ou des zones isolées**. En 2022, le festival mêlant écologie et musique We love green a utilisé **un générateur à hydrogène** au lieu d'un groupe électrogène polluant pour l'une de ses scènes. Bouygues Telecom a de son côté développé **la technologie Hyvision** pour alimenter les antennes de téléphonie mobile déployées dans des zones reculées, pour le secteur de l'événementiel. L'hydrogène leur permet de **réduire de 70 % leurs émissions de CO₂** ainsi que les nuisances sonores par rapport à un groupe électrogène thermique.

H2SYS se focalise sur les groupes électrogènes à hydrogène

Cette start-up lancée en 2017 a mis au point deux appareils de production d'électricité utilisant de l'hydrogène. **La gamme Boxhy** se destine aux usages nécessitant une puissance modeste (jusqu'à 8 kVA) tandis que **la gamme Thytan** s'adresse aux utilisateurs ayant des besoins importants ou cherchant une installation de secours (jusqu'à 200 kVA). Ces générateurs sont censés pouvoir opérer dans des conditions difficiles, ne requièrent pas une lourde maintenance, et sont présentés comme **non polluants à plusieurs égards** par H2SYS : pas de combustion de dérivés

CONCEPT

LE "POWER-TO-GAS" : TRANSFORMER L'ÉLECTRICITÉ EN GAZ

Il existe différents procédés pour produire du gaz de synthèse (hydrogène ou mélanges) à partir d'électricité, mais tous visent à s'appuyer sur les avantages de l'énergie sous forme de gaz pour conserver les surplus d'électricité produits et les réinjecter plus tard dans le réseau. Le gaz est plus facilement transportable et stockable que de l'électricité conservée dans des batteries. Recourir à de l'hydrogène bas carbone ou un gaz écologique (biométhane) permet de limiter l'impact environnemental de la flexibilité apportée au réseau.

du pétrole, pas de rejets de fumées à proximité, ni de nuisances sonores. La société a développé **son propre modèle de pile à hydrogène**, a reçu un prix d'innovation au concours I-Lab et a conclu **un accord de R&D avec le coréen Hyundai Motor**. Elle commercialise également un banc d'essai pour système hybride auprès des organismes de formation. Après avoir réalisé un chiffre d'affaires de 620 000 euros en 2021 et de 1,5 million l'année suivante auprès d'une cinquantaine de clients, y compris à l'international, H2SYS vise **un triplement de sa production et de son chiffre d'affaires** pour l'année 2023.

Implantée au sein du Territoire de Belfort, la jeune entreprise s'appuie sur un écosystème local solide : **"Notre implantation géographique est essentielle et stratégique** à plus d'un titre : historiquement le Nord Franche-Comté est un bassin industriel centré sur l'énergie et les transports", explique à Maddyness le président de H2SYS, Sébastien Faivre. "Le tissu d'entreprises sur l'arc Grand-Est permet à H2SYS de s'appuyer sur **un réseau de partenaires et de sous-traitants industriels efficaces**." La start-up a également bénéficié du soutien d'acteurs locaux au niveau du financement de son développement. En 2020, elle est parvenue à **rassembler 5 millions d'euros** auprès du fonds d'investissement Zébu Développement et de **structures régionales de grandes**

banques (BDR Innovation et Transmission pour la Caisse d'Épargne, BFC Croissance & Innovation pour la Banque Populaire, et le Crédit Agricole de Franche-Comté). Afin d'amplifier la production pour véritablement passer à une échelle industrielle, H2SYS a procédé à **une nouvelle augmentation de capital** en 2023. Idec Invest a ainsi pris une participation minoritaire dans l'entreprise, lui apportant 1,5 million d'euros par cette opération. La start-up estime avoir encore besoin de 3 millions d'euros supplémentaires, et a démarré **une campagne de financement participatif** en ce sens. D'après *Les Échos*, elle avait récolté près de 750 000 euros auprès de 900 souscripteurs par ce biais en mai 2023. Elle a obtenu en outre **une subvention de 2,5 millions d'euros** de la part de l'État pour le financement de son usine dans le cadre du plan France 2030. Le site de production devrait démarrer son activité en 2025 ou en 2026, et **l'investissement total est estimé à 10 ou 12 millions d'euros**.

D'autres sociétés sont présentes dans le "power-to-gas", comme **Energ**, qui a **inventé un réacteur catalytique à plasma froid** affichant des performances uniques : 50 fois moins volumineux et 50 fois plus rapide que les solutions standards, pour un gaz 20 % moins cher. Elle a levé 700 000 euros en 2020 pour mettre au point son démonstrateur industriel.

LE PROJET HYFLEXPOWER ÉTUDIE LA PERTINENCE DE L'HYDROGÈNE POUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE

Mené depuis 2020 par un consortium européen (Engie, Siemens, Centrax...), le projet Hyflexpower cherche à établir dans quelle mesure l'hydrogène peut être utilisé pour alimenter une turbine à gaz. Moyennant quelques ajustements techniques, l'idée est de pouvoir produire de l'électricité sur le site industriel en cas de pic de demande grâce à l'utilisation d'hydrogène vert préalablement produit. Mis en place sur un site du papetier Smurfit Kappa situé en Haute-Vienne, Hyflexpower a vu ses premiers tests en 2022, avec un mélange comprenant 30 % d'hydrogène pour 70 % de gaz naturel. La proportion d'hydrogène est progressivement montée à 100 % durant l'année 2023, "ce qui n'a été réalisé jusque-là qu'en laboratoire, pas en conditions réelles", explique dans *Environnement & Technique* Gaël Carayon, responsable du projet chez Engie Solutions. Après une période d'analyse, les résultats de l'expérimentation seront présentés durant le premier semestre 2024. Si ces derniers s'avèrent concluants, ils pourraient permettre une plus grande décarbonation de l'industrie pour des investissements modérés. Ils apporteraient en outre une flexibilité au réseau électrique grâce à l'hydrogène qui serait stocké sur les multiples sites industriels.

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PREND DE L'AMPLEUR

La production d'hydrogène bas carbone s'avère actuellement largement minoritaire : selon l'ADEME, elle représentait **moins de 5 % de la production mondiale en 2021**, le reste provenant d'hydrocarbures fossiles. Pour que l'hydrogène occupe un rôle significatif dans la transition énergétique, il est donc **nécessaire que cette**

production bas carbone change d'échelle. En France, de nombreux acteurs œuvrent en ce sens, qu'il s'agisse **de grands énergéticiens, de start-up ou de fournisseurs d'équipements**. En multipliant les projets, ils impulsent le développement d'une production d'hydrogène bas carbone d'ampleur.

Les grands groupes à la manœuvre

Investissements et R&D pour la décennie à venir

"Tout le monde est en retard", concédait en 2023 Valérie Ruiz-Domingo, vice-présidente hydrogène d'Engie, dans *La Tribune*. La filière a souffert d'un manque de visibilité vis-à-vis de la régulation européenne, de financements publics lents à se concrétiser, ou encore d'équipements techniques jugés trop peu fiables. Pour rattraper ce retard et ne pas laisser l'Europe se faire distancer par d'autres régions du monde, les grands acteurs français de l'énergie et du gaz **précisent leurs plans de développement**.

• Engie travaille à horizon 2030

Pour Engie, l'hydrogène va occuper **une place centrale dans le mix énergétique de demain**. "L'hydrogène décarboné et les molécules produites à partir d'hydrogène (e-molécules) joueront un rôle clé dans les transports et pour certains usages industriels. La demande d'hydrogène et d'e-molécules – portée par les besoins de décarbonation de la mobilité lourde et de l'industrie – sera multipliée par 8 d'ici 2050 (75 % pour les transports et 25 % pour les secteurs industriels les plus difficiles à décarboner, comme l'acier). Près de la moitié de cet hydrogène sera produit localement", indiquait Catherine McGregor, directrice générale d'Engie, en juin 2023.

Pour participer à cet essor, Engie prévoit **d'investir 4 milliards d'euros d'ici 2030**. Ils serviront à produire 4 GW d'hydrogène renouvelable par an, à se doter de 700 kilomètres de pipelines dédiés et de 1 TWh de stockage dédié en sous-sol. **"Sur les objectifs de production, le périmètre est mondial**. Concernant les infrastructures, le champ d'action est franco-européen. Quant aux stations de distribution, nous visons en priorité la France", précise Valérie Ruiz-Domingo, qui informe aussi que "pour l'heure, nous n'avons pas de feuille de route au-delà de cette échéance [de 2030]".

À l'automne 2022, l'énergéticien a également inauguré H2 Factory, **un laboratoire de R&D dédié à l'hydrogène durable**, en Seine-Saint-Denis. Ce centre doit permettre de "fiabiliser la production et la gestion à l'échelle industrielle de la petite molécule", indique *L'Usine Nouvelle*. Engie y mène des travaux pour réduire le coût de l'hydrogène vert, optimiser le processus d'électrolyse, améliorer la sécurité de ce gaz hautement inflammable, adapter ses infrastructures de transport, etc.

• EDF compte sur sa filiale dédiée Hynamics

"Le groupe EDF a l'ambition de **devenir un des leaders européens de la production d'hydrogène 100 % bas carbone**", communiquait le producteur d'électricité en 2022 lors de l'annonce de son

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PREND DE L'AMPLEUR

Plan Hydrogène. Ce dernier mobilise **2 à 3 milliards d'euros d'investissements d'ici 2030** afin de déployer 3 GW de projets à travers le monde.

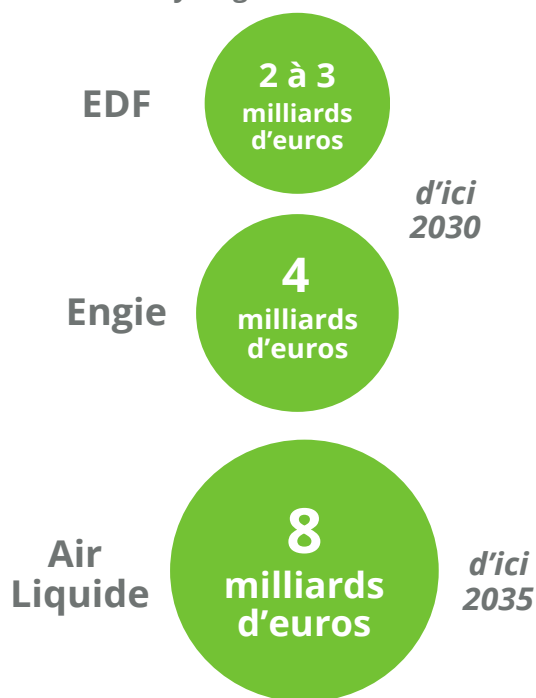
Trois ans plus tôt, Hynamics, filiale d'EDF dédiée à l'hydrogène bas carbone, voyait le jour. Elle est chargée d'exploiter la production d'électricité décarbonée du groupe, **grâce au nucléaire et aux énergies renouvelables, dans le cadre de procédés d'électrolyse** menant à la production d'hydrogène. Hynamics s'adresse en priorité aux acteurs de l'industrie et de la mobilité. "Nous sommes exploitants mainteneurs, cela implique d'avoir la capacité à superviser les actifs de production partout dans le monde et de déployer des équipes sur place afin d'effectuer des maintenances préventives ou correctives", explique Christelle Rouillé, directrice générale de la filiale, auprès de *BFM Business*. Hynamics affiche des ambitions internationales, notamment en Europe, et a déjà mené des initiatives en Allemagne ou au Royaume-Uni.

• Air Liquide explore différentes formes d'hydrogène bas carbone

Du côté d'Air Liquide, les investissements se montent à **"8 milliards d'euros dans la chaîne de valeur de l'hydrogène bas carbone d'ici 2035"**, exposait Benoît Potier, alors PDG du groupe, en 2022. Entre 2014 et 2020, Air Liquide n'avait consacré que 600 millions d'euros à ce secteur. Cette accélération doit permettre à l'entreprise de réaliser **6 milliards d'euros de chiffre d'affaires dans l'hydrogène en 2035**, soit le triple de 2021, via l'ensemble de ses activités dans la filière (production, avitaillement, fabrication d'électrolyseurs, etc.).

Si l'hydrogène vert, obtenu par électrolyse, demeure indispensable, Air Liquide **s'intéresse aussi à d'autres modes de production**, comme celui de l'hydrogène bleu, qui compense le recours aux énergies fossiles par le captage du CO₂ émis, ou le craquage d'ammoniac, composé initialement formé d'azote et d'hydrogène. "C'est le même concept que pour la production d'hydrogène à partir de méthane, dans lequel une partie du gaz naturel sert comme énergie et l'autre comme matière première. Sauf qu'ici, c'est sans émission de CO₂", explique en mai 2023 Julien Cottineau, vice-président ingénierie et

Des investissements massifs prévus dans l'hydrogène bas carbone



Traitement IndexPresse.

construction d'Air Liquide, dans *L'Usine Nouvelle*. Le groupe prévoit de démarrer une unité pilote en 2024 dans le port d'Anvers, en Belgique. "L'objectif est de pouvoir **disposer du portefeuille de solutions le plus complet possible**. Air Liquide a beaucoup investi dans l'hydrogène bas carbone par électrolyse. Le moment est opportun pour étoffer notre portefeuille", estime Julien Cottineau.

Des partenariats pour accélérer la tenue de projets d'envergure

Afin de déployer plus rapidement leurs capacités de production d'hydrogène bas carbone, **ces grands groupes concurrents peuvent nouer des alliances**. En mettant en commun leurs moyens et leurs compétences, ils peuvent faire émerger plus rapidement des initiatives de grande ampleur, et également **se projeter plus efficacement à l'international lorsque le partenaire est étranger**. TotalEnergies, consommateur massif d'hydrogène mais qui affiche aussi des ambitions en matière de production, a souvent recours à cette stratégie pour affermir son positionnement dans la filière.

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PREND DE L'AMPLEUR

Des collaborations se mettent en place entre grands acteurs de la filière de production d'hydrogène bas carbone

Projet Masshylia

TotalEnergies



Engie

Production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau à partir d'énergie photovoltaïque

Bioraffinerie de La Mède (Bouches-du-Rhône)

Hydrogène destiné à approvisionner la bioraffinerie



Ambition revue à la hausse en 2023

Électrolyseur initial de 40 MW
Production quotidienne initiale de 15 tonnes

→ réhaussé à 120 MW

→ réhaussée à 50 tonnes

Mise en service repoussée de 2024 à 2026

Projet Normand'Hy

TotalEnergies



Air Liquide

Fournit de l'électricité renouvelable pour couvrir la moitié des besoins de l'électrolyseur d'Air Liquide

Seine-Maritime

Fournit la moitié de l'hydrogène vert produit par son électrolyseur à la plateforme de raffinage-chimie de Total

Construction d'un électrolyseur de 200 MW, capable de produire 84 tonnes quotidiennes d'hydrogène vert

400 millions d'euros d'investissement, dont 190 millions apportés par l'État français

Objectif

Réduire les émissions de CO₂ de la plateforme de Total de 150 000 tonnes par an à partir de 2027, première année de mise en service total du projet

ANIL

TotalEnergies



Adani Entreprises Limited (AEL)

Conglomérat indien de l'énergie et des infrastructures

En 2022, acquiert 25 % d'ANIL

Filiale

Adani New Industries Limited (ANIL)

Spécialiste de l'hydrogène vert, des éoliennes et des modules solaires

"Notre prise de participation dans ANIL est une étape majeure de la mise en œuvre de notre stratégie d'hydrogène bas carbone, qui vise à la fois à décarboner l'intégralité de l'hydrogène consommé par nos raffineries européennes d'ici 2030, et de faire de TotalEnergies un pionnier dans la production de masse d'hydrogène vert afin de pouvoir répondre à la demande, qui décollera d'ici à la fin de la décennie."

Patrick Pouyanné, PDG de TotalEnergies

Objectif

1 million de tonnes d'hydrogène vert produites par an à partir de 2030

"En ligne avec notre ambition de devenir le plus grand acteur de l'hydrogène vert au monde, ce partenariat avec TotalEnergies ajoute plusieurs dimensions, dont la R&D, la connaissance du marché, et la compréhension du consommateur final."

Gautam Adani, président d'AEL

Traitement IndexPresse.

Entre innovations et levées de fonds, les start-up cherchent à se faire une place

L'électrolyse attise la concurrence

L'électrolyse de l'eau constitue la piste privilégiée par les start-up françaises productrices d'hydrogène bas carbone. Le Baromètre 2022 du cabinet Wavestone recense une dizaine de jeunes sociétés actives dans ce segment, que ce soit dans la production d'hydrogène ou la fabrication d'électrolyseurs. Les premières cherchent à massifier le recours aux énergies renouvelables, tandis que les secondes tentent d'optimiser leur rendement. L'objectif final s'avère similaire : **réduire le coût de l'hydrogène bas carbone ou décarboné** afin de le rendre compétitif face à son équivalent "gris".

Pour les entreprises positionnées sur la production, un moyen de se démarquer consiste à **exploiter des sources renouvelables encore peu prisesées**, comme l'énergie éolienne offshore. "L'éolien terrestre ne permettra pas de produire suffisamment d'hydrogène vert pour remplacer le gaz et le pétrole", indique Matthieu Guesné, PDG de la start-up Lhyfe. En 2023, cette dernière a ainsi inauguré la **première plateforme mondiale de production d'hydrogène dépendante d'une éolienne offshore**, sur le site de tests en mer de l'École centrale de Nantes (Loire-Atlantique). Nommé Sealhyfe, le projet ouvre de nouvelles opportunités et donne à Lhyfe un statut de précur-

FOCUS START-UP

Lhyfe veut devenir un poids lourd du secteur

Née en 2017, Lhyfe apparaît comme l'une des start-up les plus avancées en matière de production d'hydrogène vert, qu'elle obtient par électrolyse en exploitant généralement l'énergie éolienne. Son premier site pilote, installé en 2021 en Vendée, a été assez performant pour **pousser Lhyfe à afficher de hautes ambitions** : selon François Roche, responsable du développement commercial pour les marchés industriels, la société vise 55 MW de capacité de production installée dès 2024, puis 200 MW en 2026 et 3 GW en 2030, "équivalent à une production maximale d'hydrogène de 1 200 tonnes par jour". Pour atteindre ces objectifs, Lhyfe développe des projets dans toute l'Europe : France, Allemagne, Pays-Bas, Danemark... Le tout représente un portefeuille de 9,8 GW, **souvent partagé avec des partenaires énergéticiens** : WPD en Suède, Enerpac en Allemagne, etc.

Cette dynamique est soutenue par **une demande croissante de la part de clients provenant de secteurs variés** : industriels de la chimie, spécialistes du transport, collectivités... "Nous n'avons pas de difficultés à trouver des prospects, il y a de la demande sans aller cogner à toutes les portes", confirme François Roche en 2023 dans *Infochimie magazine*.

Après avoir levé 85 millions d'euros depuis sa création, Lhyfe est **entrée en Bourse en mai 2022**, amassant à cette occasion 118 millions d'euros de plus. Ces différents apports l'ont mené à renforcer ses équipes et à étoffer son portefeuille d'affaires. *Investir* note également que la start-up "privilégie les projets avec subventions européennes, étatiques et régionales", ce qui lui avait permis de cumuler près de 60 millions d'euros d'aide fin 2022.

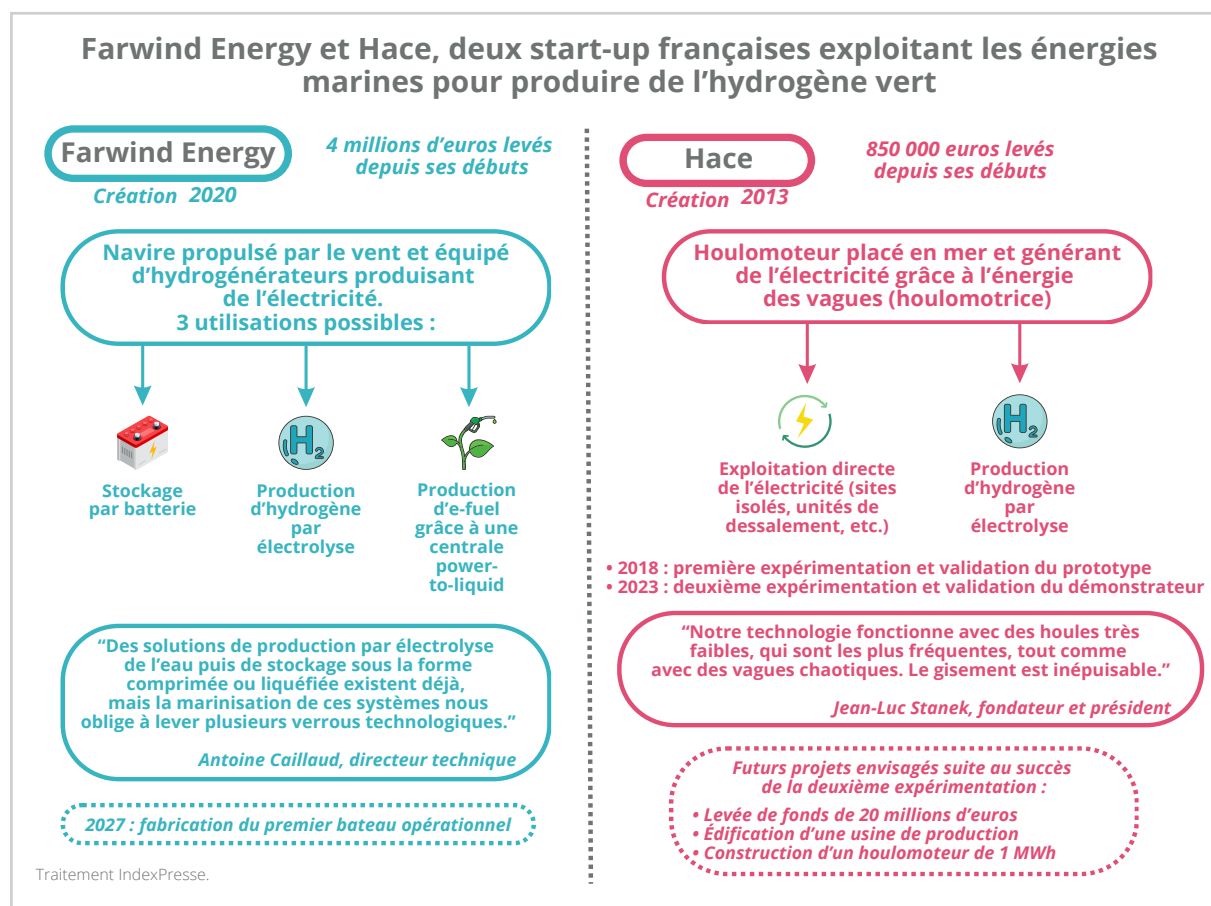
La mise en route concrète de plusieurs unités de production dans les années à venir doit **faire décoller l'activité commerciale de Lhyfe**. L'entreprise, qui ne réalisait que 0,6 million d'euros de chiffre d'affaires en 2022, espère grimper à 200 millions dès 2026. Matthieu Guesné, fondateur et PDG de la société, assure vouloir devenir "le TotalEnergies ou l'Air Liquide de l'hydrogène vert".

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PREND DE L'AMPLEUR

seur. "Du fait de nous positionner spécifiquement sur les énergies renouvelables, pour alimenter nos unités de production, nous avons développé une certaine aptitude pour aller chercher ces énergies et **créer de la valeur ajoutée, là où elles sont disponibles**", explique François Roche, responsable du développement commercial pour les marchés

industriels au sein de Lhyfe.

D'autres jeunes pousses déploient leurs solutions au large afin d'**exploiter le potentiel des énergies marines**. C'est le cas de Farwind Energy, concentrée sur l'éolien et le cinétique, ou de Hace, focalisée sur l'énergie houlomotrice.



La plasmalyse, une méthode moins énergivore

La pyrolyse du méthane consiste à séparer ce dernier en deux composants : l'hydrogène d'un côté, du carbone solide de l'autre. Il est ainsi possible de générer de l'hydrogène sans émettre de CO₂ et **en consommant moins d'électricité que l'électrolyse**, très gourmande en énergie. Depuis

quelques années, des start-up œuvrent à **perfectionner cette technique en ayant recours à la technologie pyrolyse par plasma, aussi appelée plasmalyse**. "Nous utilisons la technologie des plasmas froids. Il faut imaginer un éclair de foudre où la température est contrôlée, ce qui permet de casser les molécules de méthane tout en limitant les pertes thermiques. Les atomes d'hydrogène sont extraits et le carbone du méthane est trans-

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PREND DE L'AMPLEUR

formé en noir de carbone, une poudre qui peut être valorisée par exemple pour la fabrication de pneumatiques. Le procédé ne génère donc aucune émission de CO₂ et consomme quatre fois moins d'énergie que l'électrolyse", résume Erwan Pannier, cofondateur de Spark Cleantech, dans *Les Échos*.

Les financements obtenus par ces start-up se multiplient, tandis que leurs projets se développent. En 2022, Sakowin a levé 8 millions d'euros pour poursuivre sa montée en puissance, qui doit l'amener à inaugurer un pilote industriel courant 2024, explique son fondateur Gérard Gatt dans *Forbes*. De son côté, Plenesys a reçu à l'été 2023 un financement de 17,5 millions d'euros de la part du *European Innovation Council Accelerator*, partagé entre 2,5 millions d'euros de subvention et 15 millions d'euros de prises de participation potentielles. Cet apport va lui permettre d'accélérer la mise à l'échelle de ses unités de production et la commercialisation future de ses technologies.

Quant à Spark Cleantech, sa levée de fonds de 4 millions d'euros conclue à l'été 2023 lui offre de nouvelles perspectives de développement pour concrétiser son premier démonstrateur.

"La plupart des acteurs innovants recensés passent par la technologie pyrolyse par plasma, moins énergivore en électricité."

Wavestone, Baromètre 2022

FOCUS START-UP

Spark Cleantech vise d'abord les industriels

Après cinq années de thèse puis trois de recherche sur la plasmalyse au sein du laboratoire EM2C de CentraleSupélec, Erwan Pannier a fondé en 2022 Spark Cleantech, s'associant à cette occasion avec Patrick Peters, ancien de Suez. Soutenue par la société d'accélération de transfert technologique de Paris-Saclay, la société travaille sur un réacteur plasma capable de produire de l'hydrogène bas carbone et du carbone solide. "Nous mettons en place **un modèle de propriétaire exploitant**. Nous faisons construire les installations et ensuite, nous les exploitons, pour vendre en bout de chaîne nos deux produits", explique Erwan Pannier auprès du média spécialisé *Maddyness*.

Spark s'adresse en priorité **aux industriels consommant moins de 2 000 kilos d'hydrogène par jour**, et ce quel que soit le secteur d'activité : transformation des métaux, fabrication de verre, chimie, etc. D'ici 2025, la société veut déjà pouvoir commercialiser une première unité capable de fabriquer 200 kilos d'hydrogène quotidiennement. "Nous avons choisi une approche modulaire qui permet d'augmenter les quantités sans difficulté technique supplémentaire. **Nous devons aller vite car le marché est déjà là**", insiste Erwan Pannier. À l'horizon 2030, Spark espère avoir vendu une centaine d'unités.

À plus long terme, la start-up souhaite aussi **investir le marché des transports ou de la chaleur industrielle**. "Notre unité pourra notamment équiper les stations-service hydrogène pour produire de l'hydrogène décarboné en local à partir des réseaux de gaz et d'électricité, et ainsi alimenter les véhicules de demain", conclut Thérèse Dettwiller, dirigeante de Spark Cleantech.

D'autres méthodes de production explorées

Plus répandues, l'électrolyse et la pyrolyse du méthane ne représentent cependant pas les seuls moyens de produire de l'hydrogène bas carbone. Certaines start-up françaises explorent d'autres voies, autour de la pyrogazéification, du biogaz ou encore de l'extraction d'hydrogène natif.

• Qairos Energies veut transformer le chanvre en gaz verts

Qairos Energies mise sur la pyrogazéification de biomasse. "Un combustible solide (biomasse, bois, pneus usagés, etc.) est transformé en combustible gazeux et ce via l'injection d'un agent oxydant comme l'oxygène en faible quantité [et une montée en température]", explique le cabinet Wavestone. Il est ainsi possible d'obtenir du biométhane, de l'hydrogène bas carbone, etc. Dans le choix du combustible solide, l'entreprise fondée en 2019 a opté pour **le chanvre, "une des plantes plébiscitées par le monde agricole pour diversifier les cultures"**, indique Jean Foyer, PDG.

En 2021, Qairos Energies a obtenu l'autorisation de la Commission de régulation de l'énergie pour expérimenter l'injection de gaz renouvelable au sein du réseau GRDF, qui devait ensuite mener à la construction de sa première unité de pyrogazéification. Mais depuis, le projet a été retardé : le décret d'application attestant du rachat, par l'État et à un tarif fixé, du biométhane produit, n'a pas encore été finalisé. Cette situation met **Qairos Energies sous pression financière**. "Depuis fin 2021, on a rogné dans les effectifs, dans énormément de dépenses, mais le projet a deux ans de retard parce qu'on attend l'État depuis deux ans. Si d'ici la fin de l'année, on n'a pas de signaux clairs que le projet va se faire, il va s'arrêter, déplore Jean Boucher en septembre 2023 sur *France Bleu*. Dans le cas contraire, la société prévoit de bâtir une centaine de sites de production en France d'ici 2035.

• Seven produit de l'hydrogène renouvelable à partir de biogaz

"Nous avons choisi de changer la donne sur le marché en déployant un hydrogène vert issu d'un

procédé inédit, le VaBHyoGaz", indique Jean-Michel Richeton, PDG de Seven, à *La Tribune*. La start-up, créée en 2017, développe initialement un réseau de stations d'approvisionnement en biogaz pour les mobilités lourdes. Face aux enjeux énergétiques croissants, elle a décidé de se diversifier dans l'hydrogène. Son procédé de production est **basé sur le vaporeformage du biogaz**. "VaBHyoGaz peut intéresser tous les producteurs de biogaz qui ont des productions excédentaires ou encore qui arrivent en fin de contrat de cogénération. Et nous visons à **créer nos propres unités de production à partir de cultures énergétiques** de la catégorie des CIVE (cultures intermédiaires à vocation énergétique)", précise Jean-Michel Richeton.

Depuis 2021, Seven collabore avec Veolia afin de **transformer le biogaz provenant des boues d'épuration en hydrogène**. 18 mois d'expérimentation ont permis de valider le fonctionnement du pilote, qui produit "une dizaine de kilos d'hydrogène par jour", indique Alain Le Divenach, responsable développement Méditerranée chez Veolia. Le géant de la gestion de l'eau et des déchets prévoit d'inclure cette solution dans son catalogue de solutions, et compte déjà mettre en place un module industriel à Hong Kong, capable de générer jusqu'à 400 kilos d'hydrogène quotidiennement.

• 45-8 Energy, l'hydrogène natif en complément de l'hélium

Plutôt que de produire du gaz, 45-8 Energy cherche des sources naturelles d'hélium et d'hydrogène. "Ils se comportent de manière similaire au pétrole, ruisselant au sein des roches poreuses", explique *L'Usine Nouvelle*. La start-up veut parvenir à **les extraire "de manière écoresponsable pour les valoriser en circuit court"**, indique Nicolas Pelissier, fondateur. Pour cela, elle a développé ses propres outils de prospection et déposé six brevets.

Les premières zones explorées, dans la Nièvre et le Doubs, devraient aboutir au lancement d'une unité pilote de production début 2024. D'autres projets sont en discussion en Europe, notamment en Allemagne et au Kosovo, ainsi qu'en Amérique. Le continent européen reste cependant la priorité

LA PRODUCTION D'HYDROGÈNE BAS CARBONE PREND DE L'AMPLEUR

de la jeune pousse, avec un objectif de 3 millions de m³ d'hélium et 6 000 tonnes d'hydrogène extraites par an d'ici 2030. "L'hélium est plus mature : c'est le cash-flow d'aujourd'hui quand **l'hydrogène fera la croissance d'après-demain**", évalue Nicolas Pelissier.

En avril 2023, 45-8 Energy a annoncé une levée de fonds de 20 millions d'euros pour financer son site pilote de production. À cette occasion, Helling, filiale du *family office* de la famille Bouygues dédiée aux métiers du sous-sol, est devenue son premier actionnaire.

Les levées de fonds se multiplient, en attendant des résultats économiques concrets

"Une bonne dynamique sur 2022, des investisseurs qui confirment leur intérêt pour l'hydrogène", note le cabinet Wavestone dans son Baromètre annuel. Les start-up produisant de l'hydrogène bas carbone profitent de cette dynamique. Plusieurs opérations d'ampleur ont été recensées depuis 2021, au sein d'un secteur de l'énergie où **la construction d'infrastructures peut rapidement se révéler coûteuse**. "Notre trajectoire nous impose d'investir en masse. Nous devons en ce sens mobiliser beaucoup de capitaux", indique Antoine Huard, cofondateur de

la start-up ayant récolté 50 millions d'euros en 2023 et prévoyant d'investir près d'un milliard d'euros dans ses différents projets d'énergies renouvelables et d'hydrogène vert d'ici 2026.

Ces augmentations de capital ne doivent cependant **pas dissimuler la jeunesse du secteur et les incertitudes qui l'accompagnent**. Si le marché de l'hydrogène bas carbone semble porteur et les fonds d'investissement volontaires pour participer au financement de projets d'ampleur, la majorité des start-up doivent encore **valider leurs promesses technologiques sur le terrain**. En dehors de l'électrolyse, "la viabilité technique et économique des nouvelles technologies de production telles que la gazéification ou la pyrolyse de (bio) méthane avec plasma reste encore à valider", estime le cabinet Wavestone en 2022.

Les jeunes pousses vont également devoir **prouver le bien-fondé de leur modèle économique lorsque leurs unités de production seront fonctionnelles** (vente d'hydrogène vert, de co-produits générés lors de la production, etc.) Leurs résultats économiques restent pour l'instant peu représentatifs de leur potentiel : le chiffre d'affaires de Lhyfe, qui a levé plus de 200 millions d'euros en prenant en compte son introduction en Bourse, n'était que de 600 000 euros en 2022. La société estime qu'elle atteindra la rentabilité en 2026, année où elle prévoit de réaliser 200 millions d'euros de chiffre d'affaires.

Des levées de fonds significatives pour les start-up françaises produisant de l'hydrogène bas carbone (2021-2023)

Start-up	Montant levé	Année
Verso Energy	50 millions d'euros	2023
Lhyfe*	50 millions d'euros	2021
45-8 Energy	20 millions d'euros	2023
Sakowin	8 millions d'euros	2022
Spark Cleantech	4 millions d'euros	2023
Farwind Energy	2 millions d'euros	2021

*S'ajoutent les 118 millions d'euros récoltés lors de son introduction en Bourse en 2022.
Traitement IndexPresse.

La fabrication d'électrolyseurs, enjeu clé en amont de la production

La filière française prend forme autour de nouvelles usines

Équipements indispensables à la réalisation de l'électrolyse, méthode principale de production d'hydrogène vert, les électrolyseurs font l'objet d'une concurrence internationale de plus en plus intense. Chaque pays ou région du monde souhaite accaparer la plus grosse partie de ce marché amené à se développer fortement. Selon Bloomberg, la Chine occupe pour l'instant la place de leader, mais "conscients de la menace, les États-Unis ont prévu des subventions importantes pour leurs champions de l'hydrogène dans la loi adoptée [en 2022] et baptisée Inflation Reduction Act", note *Challenges*. Derrière, l'Europe "tarde à réagir et se déchire sur la définition de l'hydrogène vert", poursuit l'hebdomadaire économique. De son côté, la France souhaite faire émerger sa propre filière en soutenant massivement la construction d'usines, généralement des giga-

factories, dédiées aux électrolyseurs. La stratégie nationale concernant l'hydrogène prévoit de verser des aides pour édifier dix gigafactories de fabrication d'équipements pour l'hydrogène, dont les électrolyseurs.

Cette volonté publique favorise la multiplication du nombre d'acteurs actifs au sein de la filière française. L'Hexagone n'a longtemps compté qu'un seul fabricant d'électrolyseurs sur son sol, la start-up Elogen (anciennement nommée Areva H2Gen), qui avait inauguré son usine en 2016 aux Ulis (Essonne). Six ans plus tard, *L'Usine Nouvelle* répertorie **cinq fabricants implantés sur le territoire ou ayant des projets de construction d'usine**, dont quatre français. Tous bénéficient d'importantes subventions :

- Elogen, start-up rachetée en 2020 par GTT, groupe français d'ingénierie naval ;
- McPhy, start-up spécialisée dans les équipements de production et de distribution d'hydrogène ;

Les usines de fabrication d'électrolyseurs se multiplient en France

Entreprise	Localisation de l'usine	Date programmée d'entrée en service	Montant de l'investissement dans l'usine	Montant du soutien public total perçu par l'entreprise
McPhy	Fontaine (Territoire de Belfort)	2024	50 millions d'euros	114 millions d'euros
John Cockerill	Aspach-Michelbach (Alsace)	2024	38 millions d'euros	100 millions d'euros
Gen-Hy	Montbéliard (Doubs)	2024	28 millions d'euros	111 millions d'euros
Elogen	Vendôme (Loir-et-Cher)	2025	50 millions d'euros	86 millions d'euros



Genvia	Inauguration d'une ligne pilote de production sur le site de SLB à Béziers (Hérault) en 2022. Décision sur la construction ou non d'une usine dédiée en 2024.	200 millions d'euros
--------	---	----------------------

Traitement IndexPresse.

- Genvia, coentreprise associant le CEA et le parapétrolier SLB (ex-Schlumberger), ainsi que divers partenaires nationaux (Vicat, Vinci Construction, l'agence Arec Occitanie) ;
- Gen-Hy, spin-off de FlexFuel Energy Development, spécialiste de l'optimisation des performances des moteurs ;
- John Cockerill, groupe belge d'ingénierie et de maintenance.

Innover pour apporter plus de valeur ajoutée

Si la Chine domine le marché mondial des électrolyseurs, sa production reste surtout concentrée sur les modèles dits alcalins, "une technologie relativement ancienne qui coûte moins cher à fabriquer mais consomme plus d'électricité", explique *Challenges*. Or, **de nouvelles technologies apparaissent afin d'améliorer le rendement des électrolyseurs**. Les électrolyseurs PEM (*proton exchange membrane*), basés sur un électrolyte solide composé de membranes polymères, se montrent par exemple plus coûteux à fabriquer mais affichent un rendement supérieur d'au moins 5 % et une réactivité plus adaptée aux sources élec-

AIR LIQUIDE S'ASSOCIE À SIEMENS ENERGY DANS LES ÉLECTROLYSEURS

Air Liquide et l'entreprise allemande Siemens Energy ont lancé, en 2022, une coentreprise dédiée à la production en série d'électrolyseurs de taille industrielle. Le groupe français possède 25 % de cette nouvelle entité, le reste appartenant à son partenaire, relaie *L'Usine Nouvelle*. En novembre 2023, suite à un investissement commun de 30 millions d'euros, une première usine a été inaugurée à Berlin. Sa capacité de production doit atteindre 3 GW par an d'ici 2025.

triques intermittentes. **L'Europe et les États-Unis paraissent plus avancés sur ces modèles novateurs**, même si "les industriels chinois se lancent dans la technologie PEM et améliorent sans cesse leurs électrolyseurs alcalins", souligne *Challenges* en août 2023.

En France, **certaines fabricants tentent d'aller encore plus loin** à l'image de Gen-Hy, qui a mis au point une technologie AEM (*anion exchange membrane*) "qui combine les avantages des deux prin-

Gen-Hy veut se passer des métaux rares

Les électrolyseurs traditionnels affichent un rendement moyen d'environ 65 %, tout en nécessitant des métaux rares, notamment du platine et de l'iridium. Gen-Hy, après trois ans de R&D, a annoncé en 2023 qu'elle parvenait à **atteindre un rendement de 85 %, sans utiliser de métaux rares**. Elle les remplace par des nanoparticules de nickel. "Rajouter le marché de l'hydrogène sur l'extraction des métaux rares qui est déjà fortement impacté par l'augmentation de l'utilisation de nos écrans et de nos smartphones était forcément une voie sans issue", indique Sébastien Le Pollès, président de la start-up française. "Aucune société sur le marché n'a encore réussi à se passer des métaux rares avec un rendement aussi important", assure-t-il.

Ce prototype d'électrolyseur nouvelle génération reste "encore à l'échelle de laboratoire", précise *La Tribune*, mais s'avère **porteur de promesses pour la société**. Gen-Hy possède déjà dans son portefeuille de solutions une membrane AEM, dont elle a inauguré la première ligne de production française en 2021 à Orly (Val-de-Marne). À terme, l'entreprise veut **maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur des électrolyseurs**, depuis la fabrication de membranes jusqu'à l'assemblage du produit final. Sa future usine du Doubs, dont l'entrée en service est prévue pour 2024, doit **constituer une première marche vers l'industrialisation**. "[Gen-Hy] vise les marchés à haut rendement tels que l'industrie, la mobilité, le power-to-gas connecté aux éoliennes et au photovoltaïque, pour produire de l'hydrogène directement depuis la source renouvelable", détaille *La Tribune*.

principales technologies d'électrolyseurs actuels du marché, alcaline et à échange de protons", indique *L'Usine Nouvelle*. En 2023, à l'échelle mondiale, seuls huit fabricants maîtrisaient les membranes AEM, dont trois en Europe.

De son côté, Genvia se concentre sur l'électrolyse à haute température, "**sans doute la technologie de l'avenir**", note *Challenges*. Le rendement des électrolyseurs à électrolytes solides augmente à mesure que la température s'élève. Le CEA a été l'un des acteurs majeurs du développement de cette "technologie de rupture", dicit *Le Moniteur du bâtiment*, durant la décennie 2010. "Contrairement

aux électrolyseurs alcalins ou PEM, nous partons de l'eau vaporisée et non liquide, gage de meilleurs rendements avec un coût de molécule bien moindre", détaille Florence Lambert, PDG de Genvia. L'entreprise estime que cette technologie est **l'une des plus pertinentes pour faire baisser le coût de l'hydrogène bas carbone et le rendre compétitif**. Pour Florence Lambert, il est possible de passer sous la barre des 2 euros le kilo d'hydrogène d'ici 2030, soit près de trois fois moins qu'actuellement, "sur la base de 40 euros/MWh d'électricité".

La capture du CO₂, une activité nécessaire à la production de carburants de synthèse

De la mobilité à l'énergie, de nombreuses applications ont déjà recours ou se tournent vers des carburants (*e-fuels*) **issus de mélanges entre l'hydrogène et d'autres gaz** tels que le dioxyde de carbone (CO₂). Outre le fait d'assurer les besoins liés à la production de tels carburants, cette approche contribue à limiter, au moins à court terme, les rejets de gaz à effet de serre. Ces derniers doivent en effet être **capturés au niveau des sites industriels**, puis stockés et utilisés dans la production des *e-fuels*. On parle alors de "CCUS" (*carbon capture, use and storage*). La capture seule du CO₂ est considérée comme une solution de dernier recours par le ministère de l'Industrie, toutefois **son utilisation en lien avec le développement de la filière française de l'hydrogène** suscite de l'intérêt. Un accord dans le domaine doit être officialisé début 2024 entre la France et la Norvège dans le cadre d'un forum bilatéral dédié à l'industrie verte. Le pays scandinave se montre en effet en pointe sur le sujet, avec notamment **Northern Lights, le premier site de stockage de CO₂ offshore d'Europe**. Opéré par le français TotalEnergies, l'anglo-néerlandais Shell et le norvégien Equinor, le site permet le stockage de **1,5 million de tonnes de CO₂ par an**, et 5 millions à partir de 2026. Des études sont en outre menées afin d'éventuellement porter la capacité de stockage du site à 12 millions de tonnes par an. Les objectifs français en la matière se révèlent plus modestes, de l'ordre de 4 à 8 millions de tonnes à l'horizon 2030, et 20 millions en 2050. Un frein majeur actuel réside dans **le retard pris par la stratégie française sur le CCUS et le cadre réglementaire** concernant le transport sur longue distance de déchets industriels (le gaz issu des activités économiques étant inclus dans cette terminologie). Or, il est possible que la maturité technologique et la viabilité économique des *e-fuels* soient atteintes plus rapidement que pour l'hydrogène bas carbone.

Des projets se mettent toutefois en place dans l'Hexagone. C'est notamment le cas avec **l'usine à méthanol de la société Elyse Energy** à Roussillon (Isère). Après un premier site dédié aux carburants pour l'aviation annoncé à l'été 2023, l'entreprise a rassemblé **700 millions d'euros** pour cette seconde unité de production d'*e-fuel*. Soutenue par la Commission européenne et les fonds Mirova et Hy24, la raffinerie utilisera à partir de 2028 **du CO₂ émis par le cimentier Lafarge** et produira du méthanol pour le secteur maritime ainsi que pour l'industrie chimique. "Pour produire de l'hydrogène vert, nous installerons un électrolyseur de 240 MW", explique par ailleurs aux *Échos* le cofondateur d'Elyse Energy, Benoît Decourt.

RECHARGE, STOCKAGE, PILOTAGE : LA CHAÎNE DE VALEUR EN QUÊTE DE STRUCTURATION

Un foisonnement d'entreprises sur les stations de recharge

Des sociétés de tous les horizons investissent le segment

“Nous sommes aujourd'hui à un stade où un réseau national d'avitaillement doit se constituer afin de répondre au développement du parc roulant”, estime le site spécialisé *H2 mobile* en février 2023. **Sans un réseau suffisamment dense, la mobilité hydrogène peinera à décoller.** France Hydrogène et la Plateforme automobile évaluent les besoins à plus de 200 stations en 2025 puis 1 000 en 2030, contre 58 en 2022. L'hydrogène fourni peut être transporté jusqu'à la station depuis un point de fabrication, ou **produit directement sur place lorsqu'un électrolyseur est intégré à l'installation.**

Ce rythme de déploiement soutenu et la dynamique qu'il engendre **attire de nombreuses entreprises, de natures diverses :**

- Des distributeurs d'énergie traditionnels comme TotalEnergies, Picoty (via sa filiale Brétéché) ou MPH Energie (notamment via sa filiale Mesure Process) ;
- Des industriels déjà positionnés sur la production d'hydrogène, tels qu'Engie, Air Liquide ou EDF (via sa filiale Hynamics) ;
- Des start-up spécialisées dans le domaine ;
- Des acteurs provenant initialement de secteurs d'activité connexes, souhaitant se lancer dans l'hydrogène ou s'y renforcer : groupes de BTP, équipementiers, etc.

Toutes ne se positionnent pas de la même manière. Il s'agit notamment de **différencier les fournisseurs**, qui conçoivent et fabriquent les stations et leurs équipements, **des exploitants**, qui gèrent commercialement les stations et leur déploiement.

**3 - 10
millions d'euros**

La fourchette
d'investissement nécessaire
pour installer une station
de recharge à hydrogène.

Source : Les Échos, août 2023

Des partenariats réguliers

Au sein d'une filière en pleine construction, les collaborations ne s'avèrent pas rares, que ce soit pour **accélérer la tenue de projets ou garantir la relation avec un fournisseur.**

TotalEnergies et Air Liquide ont ainsi annoncé, début 2023, la création d'une joint-venture pour mettre en place un réseau européen de stations dédié au ravitaillement de poids lourds. Les deux groupes visent une centaine d'installations sous la marque TotalEnergies, principalement en France, en Allemagne et au Benelux. “La coentreprise, qui sera gérée conjointement par Air Liquide et

RECHARGE, STOCKAGE, PILOTAGE : LA CHAÎNE DE VALEUR EN QUÊTE DE STRUCTURATION

TotalEnergies, assurera l'investissement, la construction, l'exploitation de ces stations, ainsi que l'approvisionnement d'hydrogène sur le marché et sa commercialisation aux clients transporteurs", détaillent les deux partenaires.

Engie Solutions et HRS, start-up spécialisée dans la fabrication de stations, après avoir travaillé conjointement sur plusieurs projets, ont également officialisé leur collaboration fin 2022. Les deux sociétés vont partager leur savoir-faire pour **faire émerger de nouvelles offres dans l'écosystème d'avitaillement** (poste de distribution d'hydrogène, évolutivité des stations, etc.). Ils souhaitent installer ensemble une quinzaine de stations d'ici 2026.

Ces partenariats constituent aussi une stratégie de choix pour les acteurs initialement extérieurs au segment, qui peuvent **y rentrer ou s'y renforcer en s'appuyant sur leur associé**.

Vinci l'a expérimenté avec Hype, jeune pousse exploitante de stations et d'une flotte de taxis à hydrogène. Début 2023, Vinci Concessions a investi 15 millions d'euros dans la start-up, tandis que Vinci Energies devenait son partenaire exclusif pour la construction de ses futures installations. L'objectif est de faire entrer en action 26 nouvelles stations de distribution d'hydrogène produit localement d'ici 2026. Cette collaboration

confirme les ambitions de Vinci, déjà présent dans plusieurs projets autour de l'hydrogène.

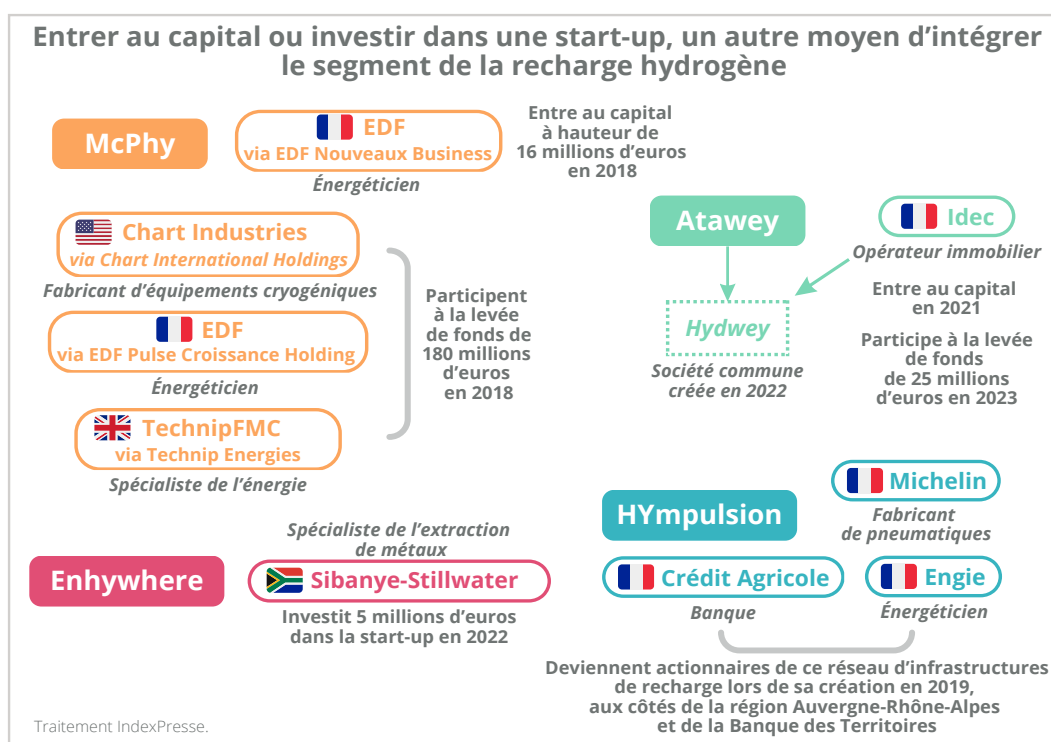
De leur côté, McPhy, fabricant de stations, et Plastic Omnium travaillent depuis 2021 sur l'amélioration des performances des réservoirs à haute pression et la mise en place d'offres commerciales conjointes auprès des acteurs de la mobilité hydrogène. Pour Laurent Carme, directeur général de McPhy, ce partenariat "illustre le type de coopérations que McPhy entend mettre en œuvre pour **croiser ses expertises avec d'autres acteurs majeurs de l'hydrogène, dans une vraie logique de filière**".

Des stratégies variées chez les start-up

Pour se démarquer au sein d'un marché prisé, les start-up de la recharge adoptent des positionnements différenciants en matière de produits et services proposés, et des stratégies hétérogènes de développement de leur activité.

• Se spécialiser exclusivement dans les stations de recharge

"Nous n'avons pas de concurrent direct qui se consacre uniquement aux stations de



ravitaillement en hydrogène", estime en 2023 Olivier Dhez, directeur général délégué de HRS (Hydrogen Refueling Solutions), dans *Investir*. En se focalisant sur les stations de recharge, la start-up **renvoie une image d'expert en termes d'installation et de maintenance**, en France comme à l'étranger : "La société dispose d'un fort potentiel à l'international", souligne *Investir*.

Ataway affiche un positionnement similaire depuis quelques années. Après avoir participé au développement d'un électrolyseur au début de la décennie 2010, la société s'est recentrée sur la fabrication et la commercialisation de stations de recharge.

- **Combiner des activités complémentaires**

A contrario, certaines start-up décident d'être présentes sur plusieurs segments. "Nous avons choisi un positionnement original, qui nous semblait le meilleur pour démarrer. Nous développons **deux activités de manière coordonnée, la gestion de flotte et la conception de stations-service**", explique Loïc Voisin, président d'HysetCo. La société construit donc ses stations de recharge, tout en disposant d'une flotte de 300 taxis à hydrogène qui viennent s'y ravitailler. "HysetCo possède, à l'heure actuelle, le plus grand parc européen de véhicules légers à pile à combustible", soulignait *Les Échos* début 2023. La même année, elle ouvrait la plus grande station-service à hydrogène d'Europe, à Paris.

Hype affiche une stratégie similaire, en cumulant l'exploitation de stations et le transport de passagers. Ses ambitions sont conséquentes : déploiement de 1 000 taxis d'ici 2024, ainsi que de 26 stations en Île-de-France et 18 dans d'autres métropoles d'ici 2025.

Quant à McPhy, elle fabrique à la fois des stations de recharge et des électrolyseurs. Si les seconds sont principalement destinés à l'industrie, ils offrent également à l'entreprise **l'expertise nécessaire pour équiper ses stations et ne pas dépendre d'un fournisseur externe**.

- **Miser sur des stations au format compact**

La différenciation peut s'effectuer sur la station en elle-même, en privilégiant par exemple les petits

"Notre but est de ne jamais être plus cher que les carburants fossiles."

Hechem Nadjar, cofondateur d'Enhywhere, dans Les Échos en août 2023

formats. Enhywhere a opté pour cette alternative en se focalisant sur la fabrication de stations compactes, de la taille d'un conteneur, capables de distribuer entre 60 et 80 kilos d'hydrogène par jour. Fabriquées à Lyon, **elles disposent de leur propre électrolyseur, sont contrôlables à distance et transportables**. Grâce à ce format réduit, Enhywhere **vise une large clientèle, et non pas uniquement les grands groupes ou les collectivités**. "Les grosses stations-service, qui peuvent délivrer une tonne d'hydrogène par jour, [...] seront nécessaires à l'avenir quand le marché sera structuré, mais ce n'est pas le cas aujourd'hui", évalue Hechem Nadjar, cofondateur de la start-up, en août 2023 dans *Les Échos*.

Enhywhere n'est pas la seule entreprise à proposer des stations compactes : Ataway, McPhy et HRS possèdent également dans leur catalogue des modèles de petite taille, qui ne constituent toutefois pas le cœur de leur offre.

- **Étoffer ses capacités de production**

Alors que le maillage territorial des stations de recharge à hydrogène est amené à s'étoffer, il devient crucial pour ces start-up de **posséder des capacités de production suffisantes pour répondre à la demande**. Les investissements industriels représentent donc un moyen adéquat pour affirmer ses ambitions, anticiper la hausse des commandes et changer de rythme de fabrication.

McPhy a ainsi inauguré sa nouvelle usine de production de stations fin 2022, à Grenoble (Isère). "L'enjeu pour nous, c'est la mise à l'échelle !

Il nous faut **passer d'une production pilote à une culture de série industrielle**", indiquait alors Jean-Baptiste Lucas, directeur général de McPhy. Selon *H2 mobile*, ce site de production permet à l'entreprise de multiplier ses capacités de production par sept.

En 2023, c'était au tour de HRS de déménager dans un nouveau bâtiment de production, également dans l'Isère, suite à un investissement de 30 millions d'euros. Sa nouvelle capacité de production avoisine les 200 stations par an, contre 30 sur son précédent site. "Le carnet de commandes est de 109 millions à facturer d'ici

2026 et devrait fortement s'étoffer", indique *Les Échos*.

Atawey compte suivre le mouvement : en février 2023, elle a levé 25 millions d'euros pour bâtir une nouvelle usine au Bourget-du-Lac (Savoie). Elle lui permettra de fabriquer 60 stations de recharge chaque année à partir de 2025, soit une multiplication par quatre de sa cadence de production. "Une manière de **répondre à son concurrent grenoblois McPhy**, qui a inauguré le 27 octobre 2022 sa nouvelle usine", notait *L'Usine Nouvelle* lors de l'annonce.

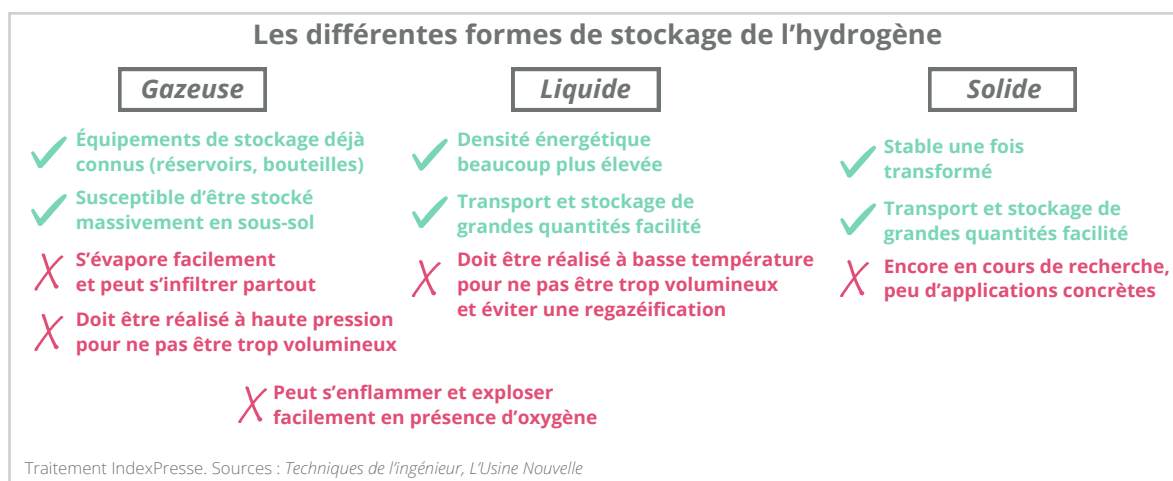
Le défi du stockage et du transport

Une molécule difficile à contenir

Fortement volumineux à pression ambiante, facilement inflammable, léger et donc susceptible de s'infiltrer partout : le stockage et le transport de l'hydrogène apparaissent comme **des tâches complexes pour les industriels**. "Le stockage est un défi contre la physique", avance Jérémie Viale, responsable des partenariats hydrogène au Centre technique des industries mécaniques (Cetim). La place croissante prise par ce gaz dans le mix énergétique oblige cependant à trouver de nouvelles solutions. RTE, le gestionnaire du réseau électrique, souligne lui-même "l'intérêt de **connecter les électrolyseurs à des solutions de stockage d'hydrogène**" pour "optimiser le fonctionnement du système électrique : il

permet de positionner la consommation [des électrolyseurs] lors des périodes où la production renouvelable et nucléaire [...] est abondante et de l'éviter lorsque des centrales thermiques fossiles coûteuses sont nécessaires pour assurer l'équilibre du système électrique".

Industriels, start-up et chercheurs s'escriment donc à **trouver de nouvelles solutions, viables technologiquement et économiquement**. "Pour faire le pont entre la production de l'hydrogène décarboné et son utilisation, tout un ensemble de pièces est nécessaire et doit être élaboré", confirme *L'Usine Nouvelle*. Selon le site spécialisé *Techniques de l'ingénieur*, **les recherches se répartissent entre les trois principales formes de l'hydrogène : gazeuse, liquide et solide** (via un



Engie explore le stockage en cavités salines

Filiale d'Engie, Storengy a inauguré en septembre 2023 **le premier site pilote mondial couplant une production locale d'hydrogène, via des électrolyseurs, à un stockage souterrain en cavité saline.** L'objectif est de pouvoir fournir de l'hydrogène en continu en allant piocher dans le stock, même lorsque les électrolyseurs s'arrêtent de fonctionner. Nommée Hypster, l'installation est basée dans l'Ain et a nécessité 13 millions d'euros d'investissement. "Ce projet pilote est précurseur car **il ouvre la voie à l'industrialisation du stockage à grande échelle**", indique Charlotte Roule, directrice générale de Storengy. En 2030, le groupe envisage de stocker 20 000 tonnes d'hydrogène sur ce site.

Cette expérimentation doit d'abord servir à comprendre comme l'hydrogène "réagit avec la cavité saline, d'évaluer une potentielle dégradation et les traitements nécessaires à sa sortie", explique *La Tribune*. Il s'agit aussi d'**observer l'impact des flux entrants et sortants**, ce qui n'a jamais été effectué sur les tests précédents, aux États-Unis et au Royaume-Uni. Néanmoins, les résultats obtenus ne pourront pas être généralisés à toutes les cavités salines. "Chaque cavité a son propre microbiote, son propre climat", rappelle Ludovic Leroy, formateur dans l'industrie pétro-gazière. **Un stockage adéquat sur un site pourra ne pas l'être sur un autre.**

Derrière Engie, Teréga, autre opérateur français de gaz, s'intéresse également à ce type de stockage. Dans le cadre du projet Hysow, Il a noué un partenariat avec le salinier Salins, pour atteindre 15 000 tonnes d'hydrogène stockés en cavité saline en 2030 puis le double en 2035.

autre matériau). L'innovation concerne aussi bien les matériaux utilisés pour concevoir les réservoirs et tuyaux que les zones de stockage potentielles, comme le sous-sol pour la forme gazeuse.

De nouvelles solutions portées par l'ensemble de la filière

Face à ces problématiques amenées à devenir majeures, **l'innovation émane de tous les types d'acteurs.** De grands industriels comme Engie ou Teréga travaillent sur le stockage en cavités salines, tandis que GRTgaz prend part à plusieurs projets visant à **étudier l'impact du transport d'hydrogène dans son réseau** : résistance du métal, corrosion, etc. "Grâce à la plateforme d'essai FenHYx basée à Alfortville, nous avons développé nos connaissances liées au transport de l'hydrogène", indique par exemple Geoffroy Anger, responsable du pôle hydrogène du groupe, au site spécialisé *H2 mobile*.

PME historiquement présente dans le secteur, RotH2 profite aussi de la dynamique pour explorer de nouvelles pistes. En plus de ses bouteilles

de plongée et autres corps d'accumulateurs hydropneumatiques, l'entreprise travaille désormais sur des réservoirs adaptés au stockage de l'hydrogène, capables de supporter des pressions de 1 000 bar. Ceux-ci sont notamment destinés aux stations de ravitaillement : RotH2 en a déjà équipé une cinquantaine. Des versions réduites, à destination des chantiers, font également l'objet de recherches. RotH2 "aspire à **devenir un acteur de référence dans le stockage stationnaire de l'hydrogène-énergie**", indique *L'Usine Nouvelle*.

Les start-up participent également à cet élan. **Le stockage sous forme solide, "la méthode qui cristallise l'innovation"** selon *Techniques de l'ingénieur*, constitue la spécialité de Jomi Leman, start-up créée par Michel Jehan, cofondateur historique de McPhy. Son procédé repose sur l'utilisation de poudre d'hydrure de magnésium, qui absorbe l'hydrogène. Un disque de 1 cm d'épaisseur et 30 cm de diamètre peut ainsi contenir 600 litres d'hydrogène, souligne *Les Échos*. L'hydrogène peut ensuite être récupéré en chauffant le disque ou en réduisant la pression. Les machines de production appartenaient

HSL Technologies (ex-HySiLabs) transporte l'hydrogène grâce à un vecteur liquide

Fondée en 2015, HSL Technologies a dédié huit ans et 9 millions d'euros de R&D et protection intellectuelle à sa technologie de transport liquide de l'hydrogène. Celle-ci est basée sur de l'hydrure de silicium, utilisé comme vecteur liquide pour capter puis relâcher l'hydrogène. Comparé aux citernes de transport sous pression, "**nous véhiculons sept fois plus de volume**", affirme Pierre-Emmanuel Casanova, cofondateur de la start-up.

En 2023, HSL Technologies a levé 15 millions d'euros afin de **démarrer son industrialisation**, qui prendra la forme, d'ici 2025, de trois unités pilotes de chargement et trois autres de déchargement. L'entreprise envisage d'accoler ses sites de production d'hydrure de silicium, dont la molécule a été baptisée Hydrosil, aux sites de fabrication d'hydrogène, pour **transformer ce dernier au plus tôt**. Alors que les unités pilotes auront une capacité de traitement de 10 tonnes d'hydrogène par an, HSL ambitionne ensuite de déployer, en 2027, des unités capables de traiter 10 000 tonnes d'hydrogène chaque année.

Lors de sa levée de fonds, l'entreprise a notamment accueilli à son capital EDP Ventures et Equinor Ventures, les branches d'investissement du groupe gazier EDP (Portugal) et pétrolier Equinor (Norvège). Selon *Les Échos*, leur présence est synonyme **d'opportunités à l'échelle européenne** pour HSL Technologies, que ce soit en matière de réseaux d'approvisionnement ou de production d'Hydrosil à une échelle supérieure.

toujours à McPhy, qui ne les exploitaient pas, mais Michel Jehan a reçu le soutien d'un actionnaire canadien en 2023, à hauteur de 2,5 millions d'euros, pour les acquérir. Jomi Leman compte maintenant **accélérer rapidement sa fabrication d'hydrure de magnésium** pour réaliser entre 2 et 3 millions d'euros de chiffre d'affaires dès 2024.

Filiale du spécialiste en ingénierie Mincatec, Mincatec Energy se focalise également sur le stockage solide depuis sa création en 2020. Elle emprisonne l'hydrogène via des hydrures métalliques, puis le restitue grâce à des différences de pression et de la chaleur. Le système est notamment pensé pour **intégrer des véhicules ou des systèmes d'autoconsommation de bâtiment**. "Nous ne plaçons pas notre solution en concurrence de l'hydrogène comprimé ou liquide. Nous la voyons plutôt **complémentaire, pour des applications précises**", indique Emmanuel Bouteleux, directeur de la start-up. Une levée de fonds est programmée à l'avenir pour industrialiser la production, ajoutait-il en janvier 2023 auprès de *H2 mobile*.

LHYFE ÉTUDIE LES COMPOSITES THERMOPLASTIQUES

Depuis 2022, la start-up de production d'hydrogène vert Lhyfe collabore avec Strohm, fabricant néerlandais de tuyaux en composites thermoplastiques, pour mettre au point des équipements adaptés au transport de l'hydrogène. Les composites thermoplastiques résistent à la corrosion et pourraient permettre de concevoir des tuyaux branchés directement aux éoliennes, lorsque l'énergie générée par ces dernières sert ensuite à fabriquer de l'hydrogène. Le partenariat des deux entreprises porte notamment sur les éoliennes en mer. Pour Marc Rousselet, directeur du déploiement offshore de Lhyfe, la sécurisation de la chaîne de valeur passe par ce contrôle du transport de l'hydrogène.

Des outils numériques de gestion et de pilotage à élaborer

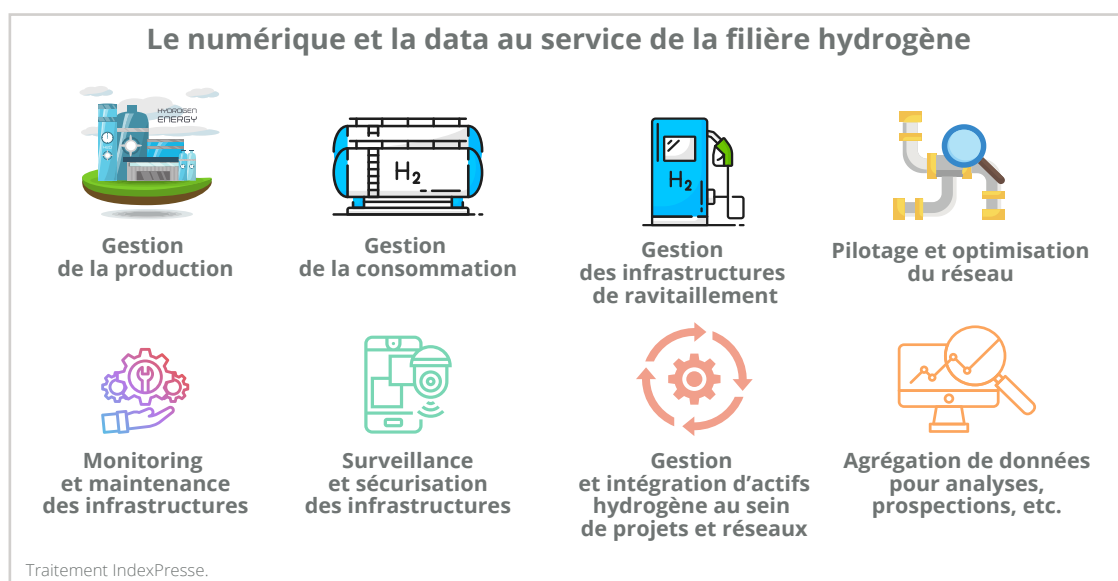
Des ressources précieuses, encore trop peu nombreuses

Alors que la filière hydrogène prend de l'ampleur, apparaît la nécessité de **déployer des solutions digitales appropriées** pour gérer au mieux la nouvelle dimension du secteur et **l'intégration de l'hydrogène bas carbone au sein de l'industrie et des réseaux existants**. "Le développement de l'hydrogène fait intervenir de nouveaux équipements avec leurs propres modèles et contraintes de fonctionnement. Se posent alors des questions de dimensionnement, de suivi des coûts ou encore de stratégies de maintenance. [...] **Le digital rend l'énergie plus sécurisée, plus intelligente et plus simple d'utilisation**", indique le cabinet Wavestone dans son Baromètre 2022.

Les outils numériques peuvent couvrir une variété de besoins en lien avec la gestion de la production, de la consommation et des réseaux énergétiques, l'exploitation des données provenant des équipements pour optimiser leur maintenance et leur sécurité, la régulation des prix, etc. "Il est désormais essentiel de **développer des solutions innovantes et fiables pour garantir la sûreté**

de la production, du transport, du stockage et des usages de l'hydrogène. La complexité de la filière, liée non seulement à la taille des projets mais également à leur inclusion dans des infrastructures urbaines, nécessite de développer de nouvelles approches pour **démontrer la sûreté et la sécurité de ces futures infrastructures**", détaille le cabinet d'ingénierie Assystem.

De telles solutions sont déjà opérationnelles : dans son Baromètre 2022, Wavestone répertorie sept sociétés actives, ayant toutes dépassé les différents statuts de maturité technologique (concept, prototype, pilote) pour atteindre la disponibilité sur le marché. Malgré tout, **l'offre demeure trop parcellaire**, d'autant plus que plusieurs de ces entreprises ne sont pas spécialisées dans l'hydrogène. "Il existe un vrai besoin de **combler ce manque de valeur**", affirmait Alice Paul, consultante chez Wavestone et co-autrice du Baromètre. Les progrès technologiques autour du **big data ou de l'intelligence artificielle ouvrant de plus en plus de possibilités**, de nouveaux outils pourraient émerger à l'avenir et répondre aux besoins spécifiques de la filière.



Quelques solutions déjà existantes

Peu d'entreprises sont actuellement positionnées sur ce segment mais quelques-unes, notamment des start-up, font office de pionnières. HyJack, fondée en 2021, propose une plateforme numérique dédiée à la gestion de projets hydrogène, en facilitant leur préféabilité puis leur intégration au sein de l'écosystème. Elle regroupe une base de données d'acteurs et fournisseurs du secteur, ainsi que **des calculateurs et algorithmes aidant les porteurs de projets dans leur réalisation**. "Déjà utilisée dans plus de 40 pays et par 2 000 utilisateurs, HyJack se développe de jour en jour et souhaite devenir la plateforme en ligne de référence pour **assister et accompagner les entreprises dans leurs transitions énergétiques**", indique le site du salon Horizons Hydrogène.

De son côté, Seed Energy a mis au point le logiciel Odyssey, "pour la prise de décision d'investissement dans les nouveaux systèmes énergétiques". Il permet de modéliser et piloter des systèmes multi-énergies, **tout en comportant un volet**

d'analyse technico-économique. Si la société, lancée en 2017, n'est pas uniquement centrée sur l'hydrogène, elle le définit sur son site comme l'un des piliers de sa solution, tant en gestion de production que de distribution.

FillnDrive se concentre elle sur les stations d'avitaillement. "Nous venons du monde digital et notre objectif est d'accompagner les opérateurs de stations dans l'exploitation commerciale de leurs stations et les utilisateurs de véhicules hydrogène dans leur quotidien par la diffusion en temps réel de la disponibilité de chaque station", détaille Laurent Rouvet, CEO de la start-up, dans *Hydrogen+*. Ses applications offrent donc **plusieurs services aux exploitants** (gestion de l'approvisionnement, surveillance, administration des ventes, etc.), **ainsi qu'aux chauffeurs et gestionnaires de flotte** (informations sur les stations, options de paiement, etc.). La société compte étendre cette panoplie à l'avenir et **envisage d'élargir son public, en s'adressant par exemple aux constructeurs de véhicules**. En novembre 2023, le site de FillnDrive indiquait que 22 stations étaient déjà équipées de sa solution.

SYLFEN ET AKKA TECHNOLOGIES ASSOCIÉS AUTOUR DU BIG DATA

Dans le cadre du développement de son Smart Energy Hub – un équipement destiné aux bâtiments et permettant de stocker de l'électricité renouvelable via des batteries et de l'hydrogène, puis de réutiliser ce dernier pour générer de l'électricité ou de la chaleur – la start-up Sylfen a annoncé en 2021 son partenariat avec Akka Technologies, groupe français de conseil en ingénierie et en services R&D. Celui-ci a épaulé Sylfen dans l'intégration d'une plateforme big data au sein de son système d'information, afin de mettre à disposition des clients "un pilotage des flux d'énergie automatique, prédictif et optimisé pour chaque bâtiment, une communication sur la performance énergétique et environnementale et un service de maintenance prédictive", relaie *Capital*.

ADVESTIS RACHETÉE PAR LE CABINET MAZARS

Née en 2011, Advestis s'est spécialisée en science des données et en intelligence artificielle. Menant des travaux dans la finance, l'industrie ou la recherche, elle a pris part à plusieurs projets au sein de la filière hydrogène. Elle a par exemple collaboré avec le laboratoire Femto, basé à Belfort, pour mettre l'intelligence artificielle au service de la conception puis de la maintenance des piles à hydrogène. La start-up a aussi travaillé avec le Laboratoire de thermique, énergétique et procédés (La-TEP), pour que l'IA facilite l'intégration de l'hydrogène comme moyen de stockage au sein des petits réseaux d'énergie. À l'été 2023, le cabinet de conseil et d'audit Mazars a racheté Advestis pour renforcer son expertise en matière de data science et d'intelligence artificielle.

FORCES EN PRÉSENCE

Cette partie est consacrée à la présentation et à l'analyse transversale des sociétés spécialisées du secteur évoquées dans l'étude.

Elle vise d'une part à dresser une liste des acteurs positionnés sur le marché, focalisée en général sur les start-up. Le cas échéant, ce panorama est complété par l'ajout de sociétés non mentionnées dans l'étude.

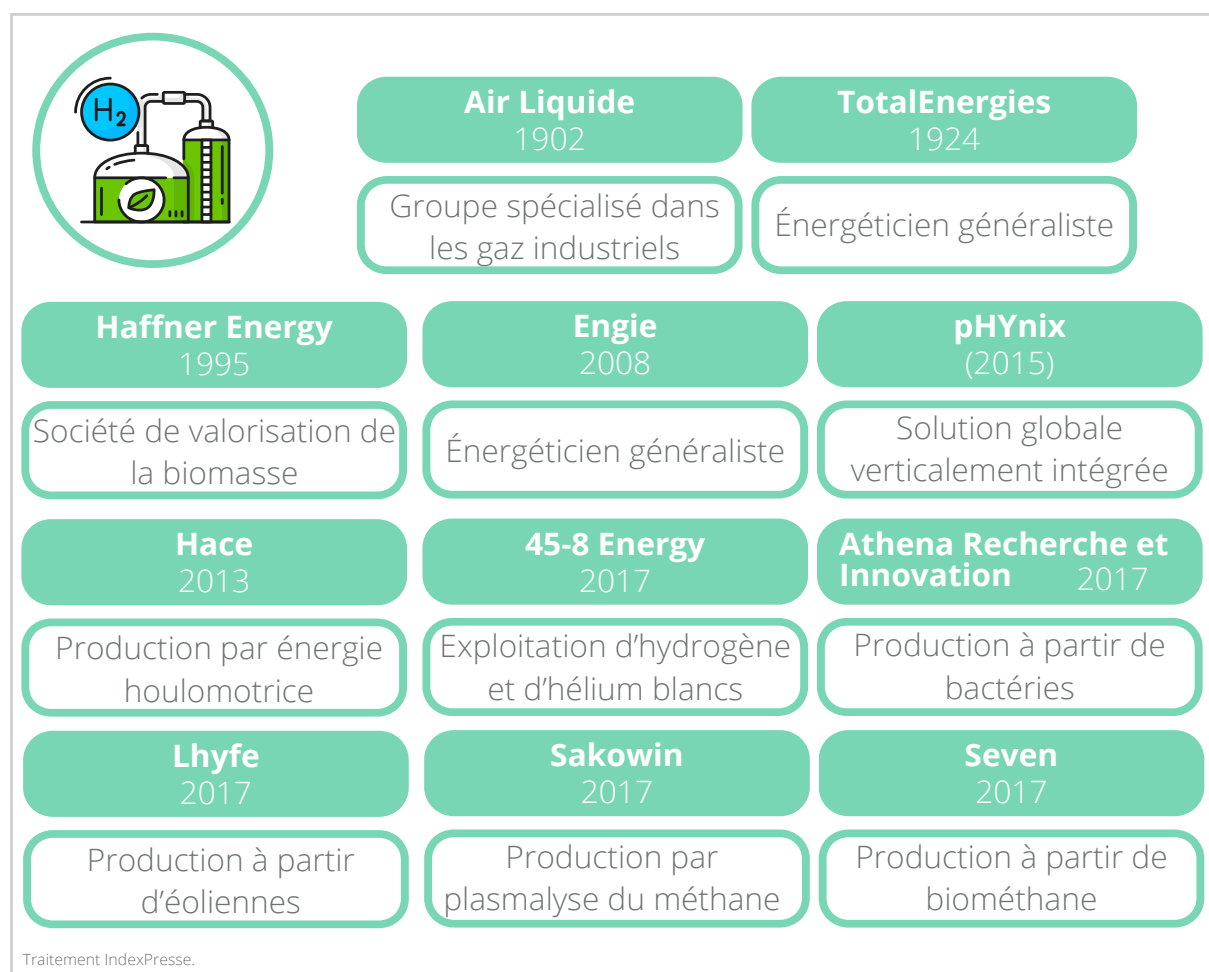
La liste est scindée en plusieurs parties, selon une segmentation pouvant être basée sur les solutions développées ou les modèles d'affaires adoptés. Cette dernière est adaptée à la structure

du tissu d'entreprises étudié.

Sans chercher à être exhaustive, cette liste offre une vision représentative des acteurs émergents du secteur, en couvrant l'essentiel des profils présents : diversités des positionnements, tailles d'entreprise et maturités variables, fonds levés...

D'autre part, cette partie met en évidence des axes marquants et des caractéristiques communes chez plusieurs sociétés du secteur. Elle offre ainsi un autre regard en présentant des phénomènes évoqués de façon différente dans le corps de l'étude.

Entreprises françaises présentes dans la production d'hydrogène bas carbone

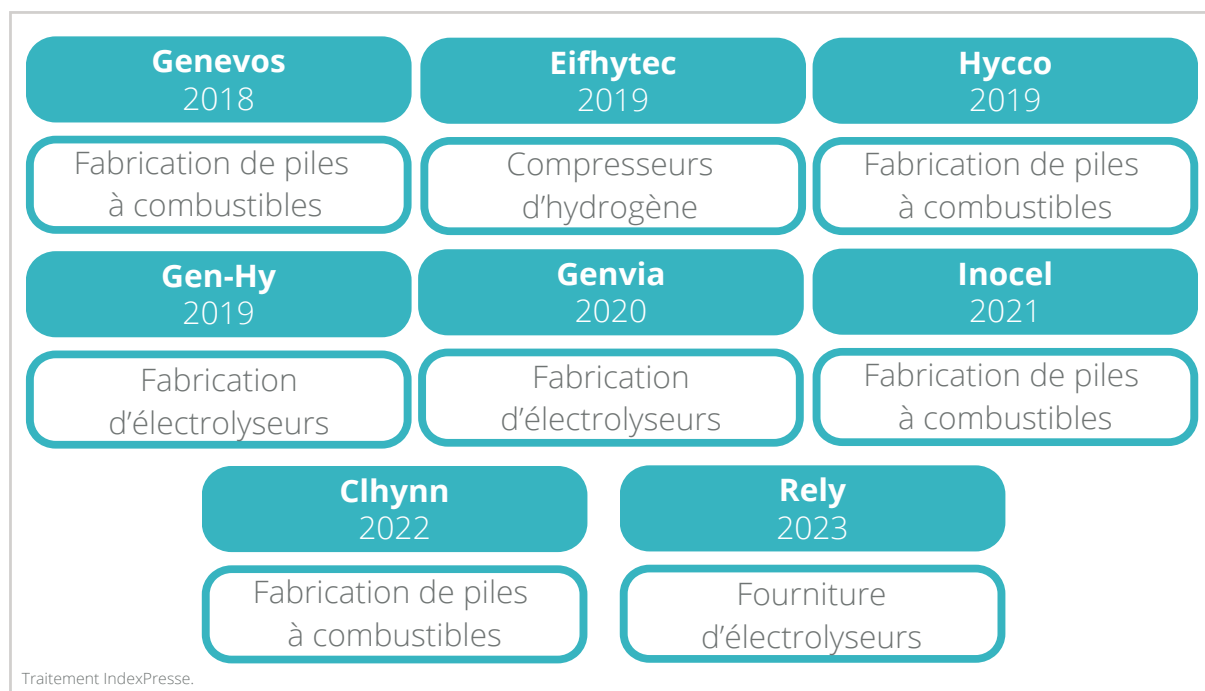


Energo 2018 Production par plasma-catalyse	Hympulsion 2018 Production et gestion des infrastructures	Plenesys 2018 Production par pyrolyse et solutions plasma
Hynamics 2019 Filiale d'EDF spécialisée dans l'hydrogène	Qairos Energies 2019 Production à partir du chanvre	Arhyze 2020 Production basée sur le photovoltaïque
Elyse Energy 2020 Production d'e-méthanol	Farwind Energy 2020 Navires-générateurs basés sur l'énergie éolienne	Verso Energy 2021 Production et solutions de stockage stationnaire
	Spark Cleantech 2022 Production par réacteurs à plasma	

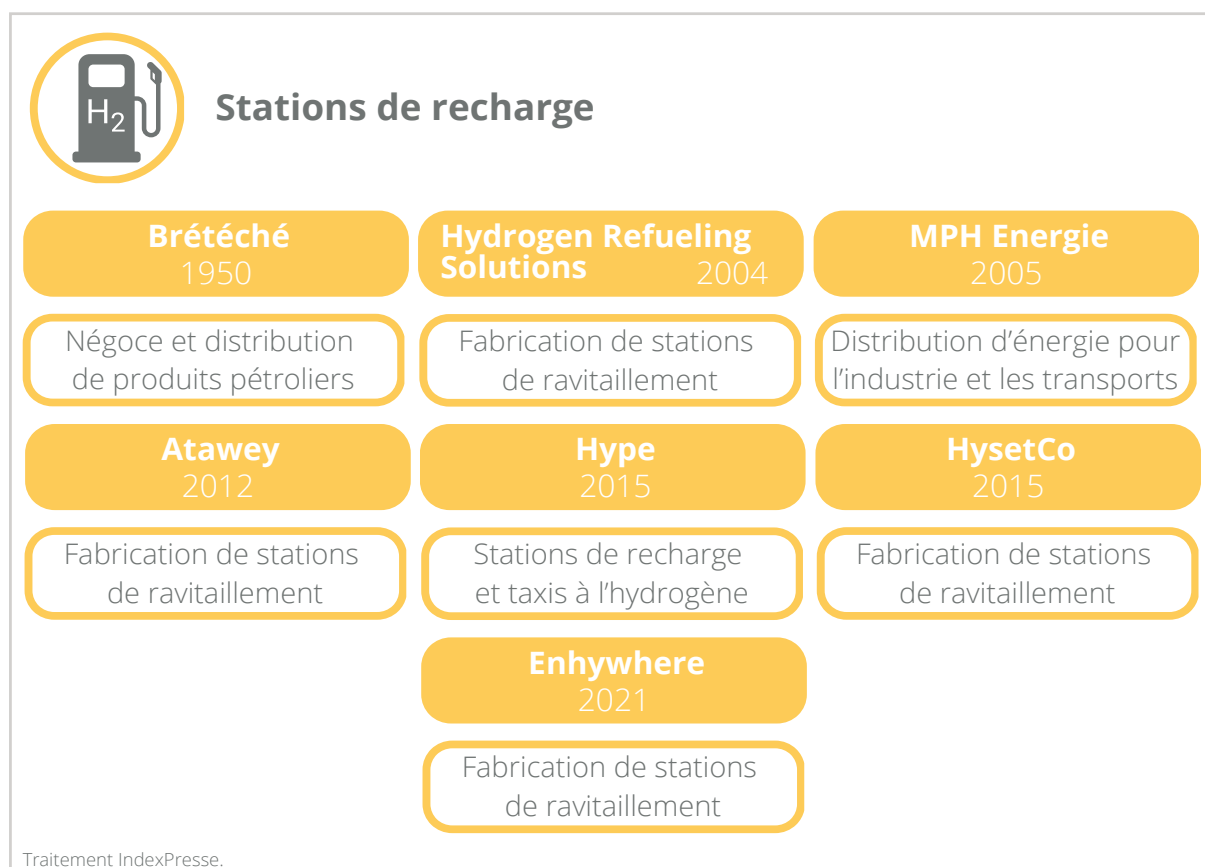
Traitement IndexPresse.

Entreprises françaises présentes dans les équipements : électrolyseurs et piles à combustibles, autres équipements connexes

	McPhy 2007 Fabrication d'électrolyseurs	Symbio 2010 Fabrication de piles à combustibles
Hydrogène de France Energy 2012 Fabrication de piles à combustibles	Elogen 2015 Fabrication d'électrolyseurs	Sylfen 2015 Fabrication d'électrolyseurs



Entreprises françaises présentes dans d'autres segments de la chaîne de valeur





Stockage, réservoirs et transport

RotH2

1912

 Fabrication de réservoirs
sous pression

Plastic Omnium

1946

Équipementier automobile

Forvia

1997

Équipementier automobile

Air Flow

2004

 Stockage et transport
du gaz

GRTgaz

2005

 Gestionnaire public
du réseau de gaz

Mahytec

2008

 Stockage d'hydrogène
et électrolyseurs

Alcrys

2010

 Solutions de régulation
de la pression des gaz

Jomi Leman

2013

 Stockage de l'hydrogène
sous forme solide

HSL Technologies

2015

 Stockage et transport
de l'hydrogène

Mincatec Energy

2020

 Stockage d'hydrogène
solide à basse pression

Absolut Hydrogen

2021

 Stockage, transport et
distribution d'hydrogène


Numérique

Amethyste

1990

 Plateforme de gestion des
actifs industriels

Advestis

2011

 IA pour usages divers, dont
ingénierie dans l'hydrogène

Seed Energy

2017

 Logiciel d'aide à l'investissement
dans l'énergie

FillnDrive

2018

 Gestion de flottes et
d'infrastructures hydrogène

HyJack

2021

 Plateforme pour la gestion
de projets hydrogène

Traitement IndexPresse.

Entreprises françaises présentes dans les usages de l'hydrogène bas carbone



Mobilité terrestre

Green Corp Konnection
2020

Retrofit hydrogène
de poids lourds

Hyliko
2020

Solution globale de mobilité
(poids lourds) à l'hydrogène

Symone
2020

Cars à l'hydrogène pour
passagers et véhicules

IBF H2
2021

Retrofit hydrogène
de poids lourds

Hyvia
2021

Solution globale de mobilité
(poids lourds) à l'hydrogène

**Efficient Hydrogen
Motors** 2022

Moteurs à hydrogène
pour divers véhicules



Mobilité maritime

SeaBubbles
2015

Navettes fluviales
propulsés à l'hydrogène

EoDev
2019

Cargos propulsés
à l'hydrogène

Hynova
2020

Yachts propulsés
à hydrogène

NepTech
2022

Navires pour le transport
de personnes ou de biens

Traitement IndexPresse.



Mobilité aérienne

Avions Mauboussin

1928

Aviation légère, dont modèles à hydrogène

VoltAero

2017

Avions à propulsion électrique ou hydrogène

Fleasy

2018

Aéronef vertical à ailes et rotors, à hydrogène

Beyond Aero

2020

Avion à propulsion hydrogène

MACA

2020

Voiture de course volante à hydrogène

HyLight

2022

Dirigeable à hydrogène



Production électrique

PowiDian

2014

Générateurs d'électricité à hydrogène

H2SYS

2017

Générateurs d'électricité à hydrogène

EnergO

2018

Technologie de conversion power-to-gas

H2X

2020

Générateurs électriques et autres équipements



GravitHy

2020

Acier bas carbone

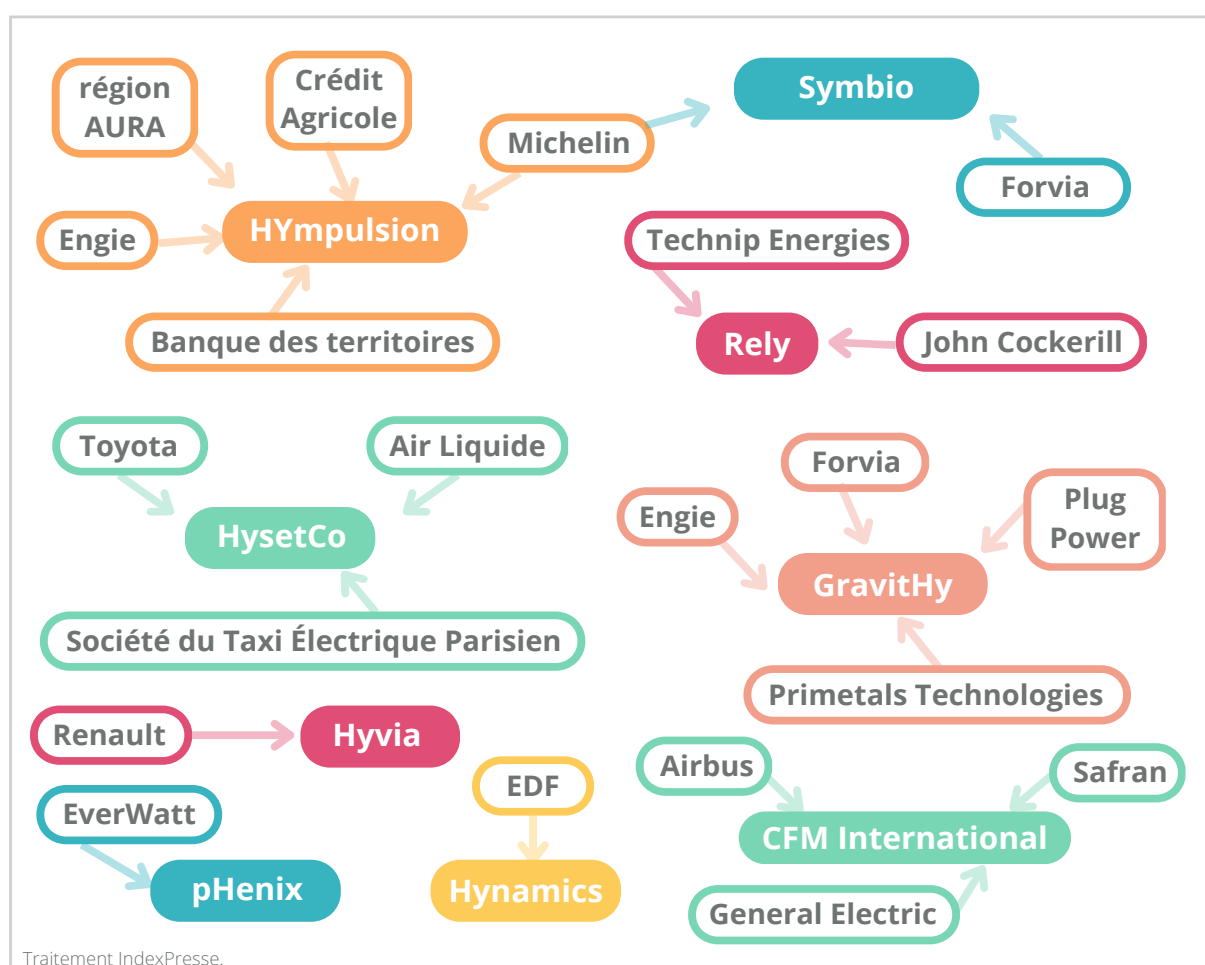
Traitement IndexPresse.

Axes et faits notables

Des sociétés fondées par des groupes d'entreprises

Il n'est pas rare, en observant le tissu d'entreprises du secteur de l'hydrogène bas carbone, de voir des sociétés lancées par un groupement d'acteurs. Cette situation peut s'expliquer par plusieurs raisons. Le rassemblement d'entreprises de spécialités différentes permet de **combiner les expertises, de progresser plus vite dans la R&D et de proposer une offre globale**. Se rapprocher d'un acteur spécialisé dans le secteur représente une voie pour s'implanter plus facilement, **sans devoir acquérir en interne la totalité des compétences** nécessaires. Des acteurs d'un domaine similaire seront quant à eux intéressés

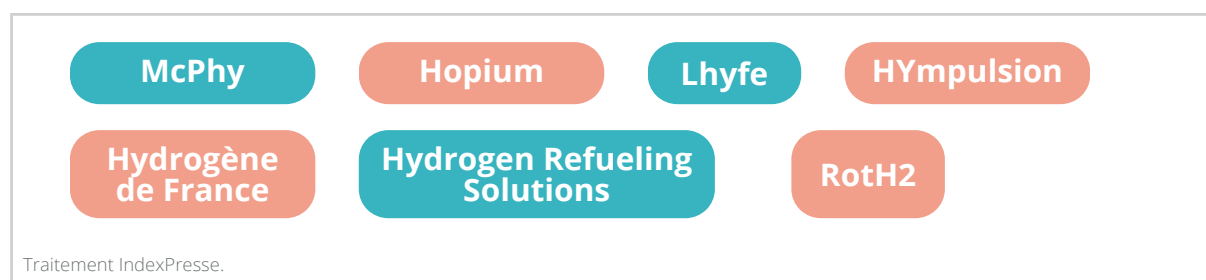
par **le partage du coût de l'investissement** afin de se déployer de façon plus efficace et moins risqué sur ce nouveau marché. Il s'agit également de **sécuriser son approvisionnement**, que ce soit en hydrogène bas carbone, en équipements ou en une matière première produite à partir de cet hydrogène. Des sociétés sont ainsi fondées par **des utilisateurs de l'hydrogène et d'autres entreprises situées dans l'aval** de la filière. Sans forcément s'associer à d'autres acteurs, il arrive par ailleurs que certaines entreprises se positionnent sur le marché ou y segmentent leurs activités par la création d'une **filiale dédiée**.



L'introduction en Bourse, une pratique observée chez plusieurs acteurs

Malgré les difficultés de financement auxquelles font face nombre de start-up du secteur, certaines sociétés sont parvenues à rassembler des capitaux importants, notamment via les introductions en Bourse. Plutôt rare chez les petites entreprises, cette méthode de financement peut permettre **d'obtenir des montants significatifs sur une période resserrée**. Elle offre en outre davantage de garanties pour les actionnaires, en termes de transparence et de suivi de l'activité, et **facilite une répartition du capital entre de multiples acteurs**. Chacun d'entre eux réduit ainsi le risque pris du fait de sa faible participation, ce qui peut contribuer à attirer des capitaux par ce biais. Dans le cadre d'une levée de fonds plus

"classique", le financement est apporté en général par quelques acteurs seulement. **Les montants élevés nécessaires** à la mise en place d'une usine et au lancement d'une production industrielle, d'autant plus avec les contraintes spécifiques de l'hydrogène, peuvent **engendrer des réticences chez les investisseurs** et plaident par conséquent pour l'introduction en Bourse. Les opérations de crowdfunding dans le domaine de l'hydrogène bas carbone s'avèrent de leur côté plus confidentielles. S'introduire en Bourse n'est toutefois **pas un gage de succès** : c'est la mésaventure qu'a connue la start-up Hopium, placée en redressement judiciaire malgré les fonds levés à plusieurs reprises.



LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
45-8 Energy	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
Absolut Hydrogen	Entreprise positionnée dans le stockage, le transport et la distribution de l'hydrogène	France
Adani Entreprises Limited	Spécialiste de l'hydrogène vert et des énergies renouvelables	Inde
Advestis	Entreprise spécialisée en intelligence artificielle	France
Air Flow	Société spécialisée dans le stockage et le transport du gaz	France
Air Liquide	Spécialiste des gaz	France
Airbus	Constructeur aéronautique	France/Allemagne
Akka Technologies	Groupe d'ingénierie	France
Alcrys	Entreprise positionnée dans les systèmes de régulation de la pression des gaz	France
Alstom	Constructeur de trains et équipements énergétiques	France
Améthyste	Fournisseur de solutions numériques pour la gestion d'actifs industriels	France
Arhyze	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
ArianeGroup	Groupe aérospatial	France
Arkema	Entreprise de chimie	France
Assytem	Cabinet d'ingénierie	France
Ataway	Société positionnée dans les stations de recharge à hydrogène	France
Athena Recherche et Innovation	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
Aura Aero	Start-up aéronautique	France
Autocars Dominique & B.E green	Société de transport	France
Avions Mauboussin	Constructeur d'avions légers	France
Banque Populaire	Groupe bancaire	France
Bert&You	Entreprise de transport de marchandises	France
Berto	Entreprise de transport de marchandises	France
Beyond Aero	Start-up aéronautique	France
Bouygues	Groupe de BTP	France
Brétéché	Entreprise du domaine des stations de recharge	France
Caisse d'Épargne	Groupe bancaire	France
Centrax	Spécialiste des turbines à gaz	Royaume-Uni
Chart Industries	Fabricant d'équipements cryogéniques	États-Unis
Cihynn	Fabricant de piles à combustible	France
CMA CGM	Groupe de transport maritime (armateur)	France
Compagnie maritime belge	Constructeur naval	Belgique
Crédit Agricole	Groupe bancaire	France
Daimler	Constructeur automobile	Allemagne
DB Schenker	Entreprise de transport de marchandises	Allemagne
Dintec	Fabricant de machines mobiles	France
Domo Chemicals	Entreprise de chimie	Allemagne
Dwyn	Fonds d'investissement	Émirats arabes unis
EDF	Énergéticien	France
EDP Ventures	Fonds d'investissement	Portugal
Efficient Hydrogen Motors	Motoriste spécialiste de l'hydrogène	France
Elogen	Fabricant d'électrolyseurs	France
Elyse Energy	Producteur d'e-méthanol	France
E-Néo	Spécialiste du retrofit hydrogène de poids lourds	France
Energio	Concepteur de solutions de power-to-gas et de waste-to-gas	France
Enerpac	Énergéticien	Allemagne
Engie	Énergéticien	France
Enhywhere	Société positionnée dans les stations de recharge à hydrogène	France
EODev	Concepteur de navires à hydrogène	France
Equinor	Énergéticien	Norvège
Equinor Ventures	Fonds d'investissement	Norvège
Ergosup	Développeur d'une technologie de compression de l'hydrogène	France
Everfuel	Producteur d'hydrogène bas carbone	Danemark
Farwind Energy	Concepteur d'un navire producteur d'hydrogène	France

LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Fleasy	Concepteur d'un aéronef vertical à hydrogène	France
FlexFuel Energy Development	Spécialiste de l'optimisation de la performance des moteurs	France
Forvia	Équipementier automobile	France
General Electric	Fabricant d'équipements pour les domaines de l'énergie et du transport	États-Unis
Genevos	Fabricant de piles à combustible	France
Gen-Hy	Fabricant d'électrolyseurs	France
Genvia	Fabricant d'électrolyseurs	France
Ginhoux	Société de transport	France
Gravithy	Producteur d'acier bas carbone	France
Green Corp Konnection	Société spécialisée dans le retrofit de véhicules lourds	France
Groupe Vallée	Entreprise de transport de marchandises	France
GRTgaz	Gestionnaire du réseau de gaz	France
H2 Green Steel	Producteur d'acier bas carbone	Suède
H2Nova	Cabinet de conseil spécialisé dans les projets hydrogène	France
H2SYS	Fabricant de générateurs électriques à hydrogène	France
H2X	Fabricant de générateurs électriques à hydrogène	France
Hace	Producteur d'hydrogène par l'énergie houlomotrice	France
Haffner Energy	Société de valorisation de la biomasse	France
HDF Energy	Start-up de l'hydrogène	France
Hopium	Concepteur de voitures à hydrogène	France
HSL Technologies (ex-Hysilabs)	Développeur d'une solution de stockage et de transport de l'hydrogène	France
Hy24	Fonds d'investissement	France
Hycco	Fabricant de piles à combustible	France
Hydrogen Refueling Solutions	Société positionnée dans les stations de recharge à hydrogène	France
HyJack	Fournisseur de solutions numériques pour la gestion de projets dans l'hydrogène	France
HyLight	Concepteur de ballons dirigeables à hydrogène	France
Hyliko	Start-up spécialiste de la mobilité hydrogène	France
Hynamics	Filiale d'EDF dédiée à l'hydrogène	France
Hynova	Concepteur de navires à hydrogène	France
Hype	Exploitant de stations et de taxis à hydrogène	France
HysetCo	Gestionnaire de flottes de taxi à hydrogène et concepteur de stations de recharge	France
Hyundai Motor	Constructeur automobile	France
Hyvia	Filiale de Renault pour la mobilité hydrogène	France
Iberdrola	Énergéticien	Espagne
IBF H2	Entreprise positionnée dans le retrofit de poids lourds	France
Idec	Groupe immobilier	France
Inocel	Fabricant de piles à combustible	France
John Cockerill	Fabricant d'électrolyseurs	Belgique
Jomi Leman	Start-up spécialisée dans le stockage d'hydrogène sous forme solide	France
Kawasaki	Constructeur automobile	Japon
Loxam	Loueur de matériel professionnel	France
MACA	Concepteur d'une voiture de course volante à hydrogène	France
Maersk	Groupe de transport maritime (armateur)	Danemark
Mahytec	Société spécialisée dans le stockage d'hydrogène et les électrolyseurs	France
Manitou	Groupe spécialisé dans la manutention	France
Mazda	Constructeur automobile	Japon
McPhy	Fabricant d'électrolyseurs	France
Michelin	Fabricant de pneumatiques	France
Mincatec	Entreprise d'ingénierie	France
Mob-Ion	Concepteur de scooters à hydrogène	France
MPH Energie	Entreprise du domaine des stations de recharge	France
NepTech	Fabricant de navires à hydrogène	France
pHynix	Fournisseur de solutions hydrogène globales	France
Plastic Omnium	Équipementier automobile	France
Plenesys	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
Plug Power	Fabricant de piles à hydrogène	États-Unis
PowiDian	Fabricant de générateurs électriques à hydrogène	France
Primetals Technologies	Société d'ingénierie et de construction d'usines	Royaume-Uni
Qairos Energies	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
Rely	Fabricant d'électrolyseurs	France
Renault	Constructeur automobile	France
RotH2	Fabricant de réservoirs sous pression	France
Rubis Terminal	Spécialiste du stockage liquide en gros volumes	France

LISTE DES ENTREPRISES CITÉES DANS L'ÉTUDE

Société	Nature de l'entreprise	Pays d'origine
Safr	Société spécialisée dans le matériel de transport	France
Safran	Motoriste aéronautique	France
Sakowin	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
SeaBubbles	Fabricant de navires à hydrogène	France
Seed Energy	Concepteur d'un logiciel d'aide à la décision pour l'investissement en énergie	France
Seven	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
Shell	Énergéticien	Royaume-Uni/ Pays-Bas
Sibanye-Stillwater	Spécialiste de l'extraction de métaux	Afrique du Sud
Siemens	Groupe industriel diversifié	Allemagne
SLB	Fournisseur de services et d'équipements pétroliers	France
Smurfit Kappa	Fabricant d'emballages à base de papier	Irlande
SpaceX	Entreprise aérospatiale	États-Unis
Spark Cleantech	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
Stor-H	Créateur d'une solution de stockage de l'hydrogène	France
Subaru	Constructeur automobile	Japon
Syfen	Fabricant d'électrolyseurs	France
Symbio	Fabricant de piles à combustible	France
Symone	Start-up du transport à hydrogène	France
TechnipFMC	Spécialiste de l'énergie	Royaume-Uni
Tesla	Constructeur automobile	États-Unis
The Jet	Fabricant de navires à hydrogène	Suisse
TotalEnergies	Énergéticien	France
Toyota	Constructeur automobile	Japon
Universal Hydrogen	Start-up aéronautique	États-Unis
Veolia	Gestionnaire de réseaux d'eau et de déchets	France
Verso Energy	Producteur d'hydrogène bas carbone	France
Vicat	Entreprise du BTP	France
Vinci Construction	Entreprise du BTP	France
Vivencia	Coopérative agricole	France
VoltAero	Start-up aéronautique	France
Volvo Trucks	Constructeur automobile	Suède
Wavestone	Cabinet de conseil spécialisé dans les technologies et le numérique	France
WPD	Énergéticien	Suède
Yamaha	Constructeur automobile	Japon
Yara	Producteur d'engrais	Norvège
Zébu Développement	Fonds d'investissement	France
Zenith Marine Services	Société de services maritimes	Émirats arabes unis
ZeroAvia	Start-up aéronautique	États-Unis

Traitement IndexPresse.

LEXIQUE

- **E-fuel**

Carburant de synthèse incluant une part d'hydrogène dans sa production, mélangé notamment avec du CO₂ ou un autre gaz à effet de serre.

- **Électrolyse**

Procédé permettant de générer des réactions chimiques sous l'effet d'un courant électrique. Il s'agit par exemple de décomposer l'eau en y faisant passer un courant électrique afin de séparer l'hydrogène et l'oxygène.

- **Hydrogène bas carbone**

Hydrogène produit via des procédés émettant peu d'émissions de CO₂.

- **Mix énergétique**

Ensemble des énergies consommées sur un territoire, pour tout type d'utilisation, de la production électrique à la mobilité ou aux usages domestiques.

- **Plasmalyse**

Procédé dérivé de la pyrolyse du méthane : ce dernier est séparé en deux composants, l'hydrogène et le carbone, grâce à des champs de plasmas.

- **Power-to-gas**

Technique de stockage d'énergie pouvant recourir à divers procédés pour transformer de l'électricité en gaz et la rendre ainsi disponible pour une utilisation ultérieure.

- **Pyrogazéification**

Procédé thermochimique permettant de transformer un combustible solide en combustible gazeux grâce à une montée en température et l'injection d'un agent oxydant.

- **Retrofit**

Conversion d'un véhicule thermique en véhicule propulsé à l'électrique ou à l'hydrogène.

SOURCES UTILISÉES

Arhab Mehdi, "Verso Energy lève 50 millions d'euros pour développer ses modules d'hydrogène et d'électricité verts", *republik-achats.fr*, 1^{er} février 2023

Attigui Abdessamad, "Comment RotH2 forme ses réservoirs d'hydrogène haute pression avec le fluotournage à chaud", *usinenouvelle.com*, 27 septembre 2023

Barbaux Aurélie, "Air Liquide va produire des électrolyseurs en Allemagne avec Siemens Energy", *usinenouvelle.com*, 23 juin 2022

Barbaux Aurélie, "Gen-Hy va produire des électrolyseurs 100 % made in France dans le Bouds dès 2023", *usinenouvelle.com*, 11 mai 2022

Barbaux Aurélie, "Pourquoi John Cockerill va produire des électrolyseurs sino-belges en Alsace à partir de 2022", *usinenouvelle.com*, 18 mars 2021

Barbaux Aurélie, "EDF mise enfin sur l'hydrogène en entrant au capital de McPhy", *usinenouvelle.com*, 6 juin 2018

Barla Jean-Christophe, "TotalEnergies et Engie veulent tripler la capacité de leur production d'hydrogène vert Masshyla", *usinenouvelle.com*, 13 mars 2023

Barthet Marie-Claire, "Hydrogène et batteries : un engouement durable", *Enjeux*, juin 2023, p.37-57

Bassi Olivia, "Brétéché ouvre la première station-service hydrogène privée de Vendée", *lesechos.fr*, 12 octobre 2023

Bassi Olivier, "Vensys reprend les actifs d'E-Neo, pionnier du rétrofit hydrogène", *lesechos.fr*, 5 septembre 2023

Beauvillain Franck, "Keyou mise sur le rétrofit hydrogène", *L'Officiel des transporteurs*, 7 avril 2023, p.30-31

Berthou Pierre, "Sakowin produit de l'hydrogène sans CO2 grâce au méthane", *forbes.fr*, 3 juillet 2023

Bouche Marion, "La recharge pour la mobilité hydrogène dans les starting-blocks", *Industrie et technologies*, mars 2023, p.10-11

Bouche Marion, "H2Mines travaille sur toute la chaîne de valeur de l'hydrogène", *Industrie et technologies*, mai 2023, p.18-19

Braun Pascale, "L'hélium et l'hydrogène font décoller les fondateurs de 45-8 Energy", *lesechos.fr*, 5 octobre 2022

Braun Pascale, "Verso Energy ancre son premier projet hydrogène à la frontière allemande", *lesechos.fr*, 2 novembre 2023

Braun Pascale, "H2SYS lance Bohxy, le générateur non polluant", *lesechos.fr*, 5 octobre 2022

Brouillet Sylvie, "Genvia inaugure une ligne pilote de production d'électrolyseurs à Béziers", *usinenouvelle.com*, 8 juin 2023

Cambos Isabelle, "Hyères : Veolia produit de l'hydrogène vert à partir de biogaz, une première mondiale", *mesinfos.fr*, 12 décembre 2022

Cazale Victor, "Plastic Omnium, un champion discret et qui passe au vert", *Entreprendre*, mai 2023, p.18-19

Chaigneau Cécile, "Mobilités : comment Seven produit de l'hydrogène vert pour alimenter ses stations multi-énergies", *latribune.fr*, 15 juin 2022

Champetier Jean-Luc, "Croissance forte chez McPhy Energy sur le marché des électrolyseurs", *lesechos.fr*, 20 juin 2023

Champetier Jean-Luc, "HRS : une capacité de production fortement augmentée", *lesechos.fr*, 21 juin 2023

Chapuis Dominique, "Les agriculteurs se tournent vers le biodiesel en attendant les tracteurs à hydrogène", *lesechos.fr*, 4 octobre 2023

SOURCES UTILISÉES

Clémens Monique, "Automobile : Forvia s'offre une grosse plateforme industrielle dans le Doubs", *lesechos.fr*, 12 octobre 2023

Clémens Monique, "Hydrogène : H2SYS accélère son industrialisation", *lesechos.fr*, 21 août 2023

Clémens Monique, "Les avions Mauboussin à hydrogène s'approchent du décollage", *lesechos.fr*, 30 août 2023

Colonna d'Istria Geneviève, "Green Corp Konnection investit dans la production de véhicules lourds rétrofités avec un nouveau site à Lempdes", *usinenouvelle.com*, 1^{er} mars 2022

Cottineau Julien, "Arkema entend être une référence pour les matériaux dans l'hydrogène", assure Armand Ajdari, son directeur R&D", *usinenouvelle.com*, 23 mars 2022

Cottineau Julien, "Philippe Merino, Air Liquide : 'Nous visons le portefeuille le plus complet d'hydrogène bas carbone'", *L'Usine Nouvelle*, mai 2023, p.18

Cottineau Julien, "Un partenariat avec TotalEnergies et 400 millions d'euros investis : le projet d'hydrogène vert d'Air Liquide en Normandie se précise", *usinenouvelle.com*, 14 septembre 2023

Deniau Kévin, "Le fabricant de stations hydrogène Ataway accélère son expansion au Bourget-du-Lac", *usinenouvelle.com*, 8 février 2023

Douet Marion, "L'hydrogène vert, une promesse attirante pour l'Afrique subsaharienne", *lemonde.fr*, 14 septembre 2023

Espalieu Florian, "Jomi Leman veut stocker l'hydrogène sous forme solide", *lesechos.fr*, 9 octobre 2023

Fabréгат Sophie, "Hyflexpower : l'hydrogène pour stocker l'électricité ?", *Environnement & Technique*, février 2023, p.16-17

Fainsilber Denis, "CMA CGM et Maersk font alliance dans la décarbonation des navires", *lesechos.fr*, 19 septembre 2023

Falvy Florence, "L'entreprise vendéenne E-Neo dépose le bilan", *L'Officiel des transporteurs*, juin 2023, p.25

Feitz Anne, "Acier vert : en France, le projet GravitHy avance doucement", *lesechos.fr*, 15 septembre 2023

Fischer Guillaume, "Hydrogène vert : Elogen va construire l'une des plus grandes gigafactories françaises en Centre-Val de Loire", *latribune.fr*, 28 mars 2022

Fortin Pierre, "Enhywhere, le pari des mini-stations à hydrogène", *lesechos.fr*, 15 août 2023

Fortin Pierre, "HysetCo achève la plus grande station-service à hydrogène d'Europe", *lesechos.fr*, 17 janvier 2023

Fortin Pierre, "Energio révolutionne la production du biogaz et de la chimie verte", *lesechos.fr*, 10 janvier 2023

Fortin Pierre, "Comment Airbus prépare l'avion à hydrogène", *lesechos.fr*, 9 novembre 2023

Frachet Stéphane, "Hydrogène : Elogen va bâtir sa gigafactory d'électrolyseurs à Vendôme", *lesechos.fr*, 10 mars 2022

Frachet Stéphane, "Dans l'Ain, Storengy inaugure son premier stockage souterrain d'hydrogène", *usinenouvelle.com*, 18 septembre 2023

Frachet Stéphane, "Carburant durable : une raffinerie à 700 millions d'euros dans les tuyaux près de Lyon", *lesechos.fr*, 21 septembre 2023

Frachet Stéphane, Colonna d'Istria Geneviève, "Le rêve d'une hydrogène vallée en 2050", *L'Usine Nouvelle*, juillet-août 2023, p.74-76

Frank Stéphanie, "De l'hydrogène vert sur le grand bleu", *Le Moniteur du bâtiment*, 8 septembre 2023, p.48-49

Gazzane Hayat, "La Chine assoit peu à peu sa domination dans l'hydrogène bas carbone", *lesechos.fr*, 22 septembre 2023

Geissler Christophe Grimbert David, "Quand l'IA et la data science contribuent au développement de la filière hydrogène...", *lajauneetlarouge.com*, décembre 2022

Goetz Étienne, "Yara mise sur l'hydrogène vert pour décarboner la production d'engrais azotés", *lesechos.fr*, 7 juin 2021

Gorbatko Nadia, "Hydrogène : un soutien massif à la production en France et en Europe", *actu-environnement.com*, 1^{er} septembre 2023

Guimard Emmanuel, "Avec Lhyfe, Matthieu Guesné voit l'avenir de l'hydrogène en vert", *lesechos.fr*, 19 septembre 2023

Guimard Emmanuel, "Manitou ouvre la voie de la manutention à l'hydrogène", *L'Usine Nouvelle*, juin 2023, p.63

Hamon Grégoire, "Où en sont les solutions alternatives au diesel ?", *L'Officiel des transporteurs*, juin 2023, p.26-27

Hamon-Beugin Valentin, "Objectif 1,5 milliard d'euros pour le fonds hydrogène décarboné lancé par Air Liquide, TotalEnergies et Vinci", *usinenouvelle.com*, 1^{er} octobre 2021

Houde Sébastien, Lafaille Julien, Moratal Nuria, Sebi Carine, Vernay Anne-Lorène, "Développement de la filière hydrogène : quels usages privilégier ? Quels défis surmonter ?", *theconversation.com*, 25 mai 2021

Hubert Nadège, "La gigafactory de McPhy à Belfort, un changement d'échelle pour les électrolyseurs", *usinenouvelle.com*, 26 octobre 2023

Ibled Amandine, "Hydrogène vert : Gen-Hy et Eiffage Énergie Systèmes construisent une usine d'électrolyseurs à Montbéliard", *latribune.fr*, 3 février 2023

Ibled Amandine, "Hydrogène vert : la start-up Gen-Hy mise sur sa solution sans métaux rares et à hauts rendements", *latribune.fr*, 14 avril 2023

Jacqué Philippe, "Après son départ de SeaBubbles, Alain Thébault lance The Jet, son nouveau bateau volant", *lemonde.fr*, 30 janvier 2022

Jaffré Isabelle, "Efficient Hydrogen Motors décroche ses premiers contrats", *lejournaldesentreprises.com*, 16 octobre 2023

James Olivier, "Concevoir un premier avion à hydrogène est déjà un défi", *L'Usine Nouvelle*, septembre 2023, p.20

Jamet Jérôme, "Une start-up girondine veut révolutionner la production d'électricité avec l'énergie de la houle", *sudouest.fr*, 22 octobre 2023

Jaroniak Florence, "Genvia met pleins gaz sur l'hydrogène vert", *Le Moniteur du bâtiment*, 28 janvier 2022, p.43

Jourdan Nathalie, "Air Liquide va investir 8 milliards d'euros dans l'hydrogène bas carbone" (Benoît Potier, PDG)", *latribune.fr*, 8 mars 2022

Jublin Matthieu, "Paris. Les taxis à hydrogène tentent de passer la seconde", *Alternatives Économiques*, octobre 2023, p.14

Kan Eliane, Haehnsen Eric, "La France, moteur dans le développement des énergies du futur", *L'Officiel des transporteurs*, juillet-août 2023, p.61-64

Kerboua Narjasse, "La start-up NepTech met à l'eau ses premiers bateaux à propulsion hydrogène", *madeinmarseille.net*, 28 septembre 2023

SOURCES UTILISÉES

Kurmayer Nikolaus J., "Le Green Brief : la réalité derrière l'engouement sur l'hydrogène", *euractiv.fr*, 27 septembre 2023

Kurmayer Nikolaus J., "La France obtient la reconnaissance du nucléaire dans l'hydrogène vert européen", *euractiv.fr*, 12 février 2023

Lamigeon Vincent, "Avions : VoltAero, Aura Aero... ces start-up françaises en pole sur la piste verte", *challenges.fr*, 13 novembre 2023

Lamigeon Vincent, "Beyond Aero, futur champion de l'avion à hydrogène ?", *challenges.fr*, 14 décembre 2021

Largillet Jean-Pierre, "Sophia : l'EIC Accelerator à Plenesys pour sa production d'hydrogène propre", *webtimedias.com*, 24 juillet 2023

Latieule Sylvie, "Chemours va investir 200 millions de dollars à Villers-Saint-Paul", *Infochimie magazine*, mars 2023, p.34-35

Le Bailly Rémy, Le Coz Cécile, "L'hydrogène décarboné, la filière émergente qui attire les milliards", *Investir*, 17 juin 2023, p.18-19

Legueltel Philippe, "Les quais de Rouen bientôt équipés d'une barge à hydrogène", *lesechos.fr*, 25 octobre 2023

Leroux Hugo, "Hydrogène : va-t-il sauver le moteur à combustion ?", *science-et-vie.com*, 3 juillet 2023

Louis Nicolas, "Un navire-énergie propulsé par le vent qui produit de l'électricité", *techniques-ingenieur.fr*, 8 septembre 2023

Mann Nathan, "Un labo d'Engie pour l'hydrogène", *L'Usine Nouvelle*, janvier 2023, p.34-35

Mann Nathalie, "La start-up 45-8 Energy lève 20 millions d'euros pour créer le premier puits d'hélium français", *usinouvelle.com*, 5 avril 2023

Mann Nathan, "L'hydrogène défie la mécanique", *L'Usine Nouvelle*, mars 2023, p.140-142

Molga Paul, "HySiLabs lève 13 millions pour sa technologie de transport de l'hydrogène", *lesechos.fr*, 14 février 2023

Mouton Olivier, "La révolution énergétique scénarisée par Engie", *Trends*, 22 juin 2023, p.24-26

Niedercorn Frank, "Une autre voie pour produire de l'hydrogène vert", *lesechos.fr*, 23 mai 2023

On Dinhill, "L'hydrogène pour la mobilité lourde à l'honneur", *L'Officiel des transporteurs*, 10 février 2023, p.45175

Palierse Christophe, "Hydrogène : Vinci se renforce dans la distribution avec Hype", *lesechos.fr*, 24 janvier 2023

Quartier Thibault, "Allenjoie : Gen-Hy attend 111 millions d'euros du programme hydrogène européen", *letrois.info*, 18 octobre 2023

Rauline Nicolas, "Pourquoi les e-fuels peinent encore à convaincre", *lesechos.fr*, 25 juillet 2023

Rauline Nicolas, "Hydrogène : le français Hy24 investit dans un projet ultra-ambitieux en Asie", *lesechos.fr*, 26 septembre 2023

Rauline Nicolas, "Comment la France s'inspire de la Norvège pour capter et stocker le carbone", *lesechos.fr*, 2 novembre 2023

Raynal Juliette, "Production d'hydrogène vert : 'Tout le monde est en retard' (Valérie Ruiz-Domingo, Engie)", *latribune.fr*, 23 juin 2023

Raynal Juliette, "Hydrogène : les gaziers français veulent stocker des quantités astronomiques sous la terre", *latribune.fr*, 22 septembre 2023

Robert Benjamin, "Zoom sur quatre start-up deeptechs nantaises engagées pour l'environnement", *usinenouvelle.com*, 22 février 2023

Robert Hugo, "Val-d'Oise : Hype développe son réseau de stations hydrogène en Île-de-France", *lesechos.fr*, 25 août 2023

Robert Bérénice, "HSL Technologies stocke de l'hydrogène dans du liquide grâce à un dérivé du silicium", *usinenouvelle.com*, 30 octobre 2023

Rouvet Laurent, "FillnDrive : facilite la distribution d'hydrogène", *innovation24.news*, novembre 2022

Sanchis Gérald, "Décollage de l'avion à hydrogène", *Revue de l'électricité et de l'électronique*, mars-avril 2023, p.26-29

Schmidt Milos, "Qu'est-ce que l'hydrogène 'blanc' ? Les avantages et les inconvénients de la dernière source d'énergie propre d'Europe", *observatoiredeleurope.com*, 5 novembre 2023

Schwoerer Philippe, "France : 1 000 stations et 350 000 véhicules hydrogène en 2030", *h2-mobile.fr*, 7 février 2023

Schwoerer Philippe, "Comment GRTgaz s'active à développer le transport de l'hydrogène", *h2-mobile.fr*, 23 mars 2023

Schwoerer Philippe, "Mincatec mise sur l'hydrogène solide pour révolutionner la mobilité", *h2-mobile.fr*, 14 juin 2023

Siemiatycki Hanna, "La chimie est un des secteurs auxquels Lhyfe s'intéresse en premier", *Infochimie magazine*, juin 2023, p.32-33

Sigot Françoise, "McPhy lève 180 millions d'euros pour lancer sa 'gigafactory' d'électrolyseurs", *lesechos.fr*, 14 octobre 2020

Spaes Joël, "Partenariat technologique entre McPhy et Plastic Omnium dans les stations hydrogène", *pvmagazine.fr*, 6 mai 2021

Sprimont Diane, "Le projet de transformation de chanvre en hydrogène près du Mans pourrait être abandonné d'ici fin 2023", *francebleu.fr*, 25 septembre 2023

Steinmann Lionel, "Hopium : le plan de la dernière chance de la start-up qui se rêvait en 'Tesla de l'hydrogène'", *lesechos.fr*, 21 septembre 2023

Taffin Anne, "Hydrogène : les start-up se concentrent sur la production et la mobilité", *maddyness.com*, 5 octobre 2022

Thouverez Pierre, "Quels matériaux pour un stockage de l'hydrogène plus performant et accessible ?", *techniques-ingenieur.fr*, 13 décembre 2022

Thual Frédéric, "Comment Qairos Energies veut produire de l'hydrogène avec du chanvre", *latribune.fr*, 1^{er} mars 2022

Torregrossa Michaël, "Station hydrogène : Engie Solutions renforce sa collaboration avec HRS", *h2-mobile.fr*, 23 décembre 2022

Torregrossa Michaël, "Stations hydrogène : McPhy monte en puissance avec une nouvelle usine à Grenoble", *h2-mobile.fr*, 2 novembre 2022

Torregrossa Michaël, "Stations hydrogène : TotalEnergies et Air Liquide s'attaquent aux poids lourds", *h2-mobile.fr*, 2 février 2023

SOURCES UTILISÉES

Torregrossa Michaël, "Kit moteur hydrogène : EHM s'associe à Alliance Automotive Group", *h2-mobile.fr*, 6 février 2023

Torregrossa Michaël, "Formation hydrogène : avec Def'Hy, la filière s'organise", *h2-mobile.fr*, 13 février 2023

Triniac Manon, "Production d'hydrogène : Spark Cleantech annonce une levée de fonds de 4 millions d'euros", *maddyness.com*, 12 octobre 2023

Triniac Manon, "Que font les fonds ? Le portrait de Hy24", *maddyness.com*, 27 mars 2023

Ubertalli Olivier, "Le train à hydrogène se met à rouler en France", *lepoint.fr*, 7 septembre 2021

Vallet Cédric, "Énergies renouvelables : l'Europe relève l'ambition", *Alternatives Économiques*, mai 2023, p.66-67

Villaret Étienne, "Symone, le bus qui pourrait révolutionner les autoroutes", *autoplus.fr*, 20 janvier 2023

Viviani Mathieu, "HyLight, la pépite française qui conçoit des dirigeables à hydrogène", *lesechos.fr*, 28 novembre 2022

Wajsbrot Sharon, "TotalEnergies lance un gigantesque appel d'offres pour se convertir à l'hydrogène vert", *lesechos.fr*, 14 septembre 2023

"Akka s'associe à la start-up grenobloise Sylfen", *capital.fr*, 2 mars 2021

"Gironde : deuxième expérimentation réussie et lancement d'une levée de fonds pour la société Hace", *usinenouvelle.com*, 2 novembre 2023

"H2SYS : la start-up de l'hydrogène qui ne manque pas d'air", *maddyness.com*, 30 août 2021

"Hassen Rachedi ne manque pas d'air", *Entreprendre*, octobre 2022, p.40-41

"Hydrogène : la France face à l'enjeu industriel des électrolyseurs", *challenges.fr*, 8 août 2023

"Hydrogène : Siemens Energy et Air Liquide inaugurent une usine en commun à Berlin", *bfmtv.com*, 8 novembre 2023

"Hydrogène bas carbone ; le gouvernement précise sa stratégie", *lesechos.fr*, 29 août 2023

"Hydrogène 'vert' : Vivescia teste les engrais décarbonés", *lafranceagricole.fr*, 13 avril 2023

"Hyliko projette le développement de deux écosystèmes territoriaux hydrogène majeurs", *faq-logistique.com*, 17 octobre 2023

"Hympulsion, la joint-venture derrière le projet Zero Emission Valley", *latribune.fr*, 20 mai 2019

"Hynamics, de l'hydrogène bas carbone pour l'industrie et la mobilité", *bfmtv.com*, 1^{er} février 2023

"Inauguration de la ligne pilote de production d'électrolyseurs à haute température", *prefectures-regions.gouv.fr*, 9 juin 2023

"Inde : TotalEnergies et Adani s'associent pour créer un acteur géant de la production d'hydrogène vert", *totalenergies.com*, 14 juin 2022

"La première usine à électrolyseurs est née !", *ADEME et vous*, octobre 2016, p.13

"Le dirigeable français à hydrogène s'envole", *Entreprendre*, mars 2023, p.44-45

"Le groupe EDF lance un nouveau plan industriel dédié à l'hydrogène 100 % bas carbone", *edf.fr*, 13 avril 2022

"L'hydrogène en France en 2022. Une nouvelle ère industrielle", *France Hydrogène*, 2022

"Mazars fait l'acquisition d'Advestis et poursuit son accélération dans la data science et l'IA", *mazars.fr*, 18 juillet 2023

"Qu'est-ce que l'hydrogène décarboné exactement ?", *infos.ademe.fr*, avril 2021

"Radar 2022. Écosystèmes innovants de la filière hydrogène", *Wavestone*, 2022

"Spark Cleantech : décarboner la production d'hydrogène", *innovation.grdf.fr*, 23 juillet 2021

"Strohm and Lhyfe join forces to develop solutions for offshore renewable hydrogen transport", *strohm.eu*, 10 mai 2022

"TotalEnergies veut créer 'un géant de l'hydrogène vert' en s'associant à l'indien Adani", *capital.fr*, 14 juin 2022

"Un pipeline d'hydrogène entre Barcelone et Marseille prévu en 2030", *lemonde.fr*, 10 décembre 2022

La collection IndexPresse *Business Etude*

Comment accéder à des données fiables, pertinentes et surtout synthétisées, alors que l'information n'a jamais été aussi accessible en apparence ?

Voilà une question à laquelle sont confrontés quotidiennement les décideurs dans les entreprises lorsqu'il s'agit de prendre les bonnes décisions.

C'est pourquoi nous avons créé la collection **IndexPresse Business Etude**, des études sectorielles complètes, réalisées à partir des plus grands titres de la presse

économique et professionnelle. En s'appuyant sur des informations fiables et de qualité, les études d'IndexPresse offrent des synthèses analytiques et éclairées sur les secteurs d'activité émergents ou en mutation.

Vous aurez ainsi toutes les clés en main pour accompagner votre réflexion stratégique, en vous appuyant sur l'examen des enjeux de votre marché, afin d'anticiper ses évolutions et valider, ou modifier, votre positionnement dans le jeu concurrentiel.

IndexPresse *Business Etude*

Date de parution - novembre 2023.



Renaud HAMMAMY

renaud.hamamy@indexpresse.fr

Auteur

Étude rédigée en collaboration avec **Samuel ARNAUD**

Utilisé dans quelques activités industrielles, quasi-exclusivement produit à partir d'énergies fossiles, l'hydrogène connaît une transformation majeure avec la montée en puissance de son équivalent bas carbone. Issu du recours aux énergies renouvelables ou au nucléaire, il voit également la palette de ses usages s'étendre du fait des besoins croissants de décarbonation dans de nombreux secteurs d'activité. Malgré la multiplication des projets, des incertitudes demeurent sur le plan technique tandis que contraintes de financement pèsent sur les acteurs du marché.

Vaporeformage, électrolyse, pyrogazéification : comment produit-on de l'hydrogène ? Quelle est la différence entre l'hydrogène vert et bas carbone ? Les carburants de synthèse (e-fuels) ont-ils un avenir ? Pourquoi des acteurs de la mobilité privilégient-ils la méthode HICE par rapport à la pile à combustible ? Qu'est-ce que la pratique du rétrofit ? Dans quelle mesure le *power-to-gas* apporte-t-il de la flexibilité au réseau électrique ? Comment le CCUS s'inscrit-il dans l'économie de l'hydrogène bas carbone ?

Cette étude apporte des éléments de réponse et de réflexion pour comprendre les enjeux et les perspectives du secteur, décrypter les modèles de développement à potentiel et identifier les orientations stratégiques pour se positionner dans le jeu concurrentiel.

Photo de couverture : © Fox Ave Designs



IndexPresse

IndexPresse
19 rue René Thomas
38000 Grenoble
Tél. 04 76 92 05 25
indexpresse@indexpresse.fr