

# Accompagner le déploiement de la filière hydrogène française opéré à l'initiative des écosystèmes territoriaux

Par David MARCHAL et Luc BODINEAU  
Ademe

L'Ademe (Agence de la transition écologique) soutient la technologie hydrogène depuis plus de quinze ans sur le volet R&D et, depuis 2018, en ce qui concerne le déploiement d'écosystèmes territoriaux. Pour l'Agence, son soutien doit poursuivre un triple objectif : pouvoir décarboner massivement certains secteurs ne disposant d'aucune autre alternative (mobilité lourde, industrie), accompagner la maturation d'une filière industrielle française et assurer le développement d'un hydrogène s'accompagnant de bénéfices pour le système électrique. Dans cet article, nous rappelons le fait que la filière a atteint la maturité technologique et précisons les enjeux de R&D futurs. Par ailleurs, nous décrivons les marchés à soutenir prioritairement en termes de compétitivité-prix et d'enjeux industriels. Nous faisons également un focus particulier sur les écosystèmes territoriaux qui constituent un des marchés de court terme pour amorcer le développement de la filière dans les territoires et offrent de premiers débouchés aux industriels avant la mise en place de dispositifs de soutien plus massifs. Enfin, un éclairage est apporté sur l'exercice de prospective qu'est Transition(s)2050, lequel permet de conforter les orientations des politiques publiques et d'identifier des secteurs prometteurs aujourd'hui non soutenus.

## De la recherche en matière d'hydrogène aux premiers marchés nécessaires au développement d'une filière française

L'Ademe soutient depuis plus de quinze ans des travaux de recherche et d'innovation dans le domaine de l'hydrogène et des piles à combustible, au travers de ses appels à projets et le programme d'investissements d'avenir (PIA) (voir la Figure 1 ci-contre). Ce dernier a pour vocation d'accompagner la structuration de la filière industrielle par le cofinancement de démonstrateurs de grande envergure. Quarante-deux projets innovants ont ainsi fait l'objet d'un financement depuis 2011, représentant un soutien en termes d'aides publiques de 175 M€ et un investissement total de 607 M€.

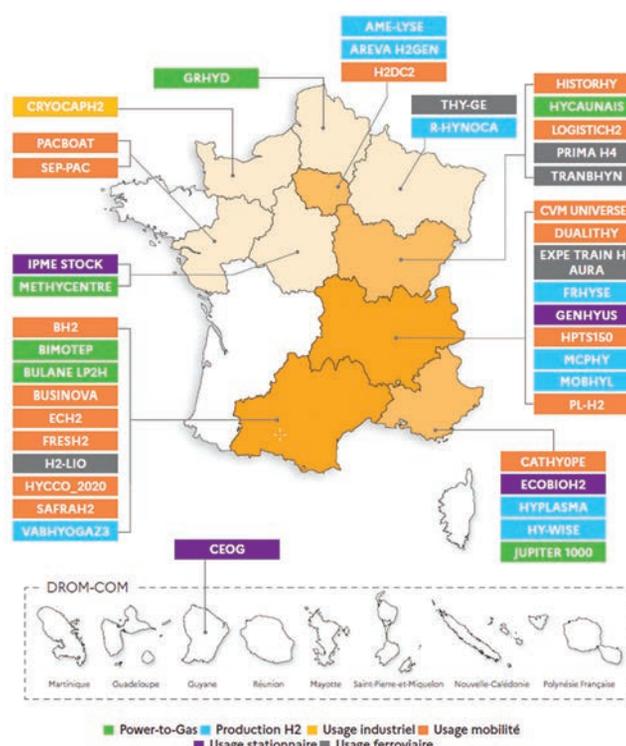


Figure 1 : Localisation des projets Hydrogène soutenus dans le cadre du PIA – Source : Bilan thématique Hydrogène et Power-to-Gas, Édition 2021 de l'Ademe, <https://bibliothèque.ademe.fr/recherche-et-innovation/4999-bilan-thematique-hydrogene-et-power-to-gas-edition-2021-9791029716348.html>

Les enjeux technologiques que recouvrent ces projets sont multiples :

- L'augmentation des performances des électrolyseurs et des piles à combustible, et plus spécifiquement des technologies à membranes échangeuses de protons à basse température, en visant entre autres à :
  - l'accroissement de la durée de vie des cellules électrolytiques, grâce à une meilleure compréhension et gestion des phénomènes de vieillissement observés au niveau des membranes ;
  - l'amélioration du rendement matière et énergie, grâce à l'accroissement continu de la taille des cellules et un recours optimisé aux catalyseurs (platine, iridium) et à leur récupération en fin de vie.
- L'adaptation des procédés de mise en forme (enduction, sérigraphie, thermoformage) mobilisés pour la fabrication des éléments constitutifs des électrolyseurs et des piles (membranes, assemblage des membranes électrodes, plaques bipolaires, interconnecteurs), afin d'en maîtriser les coûts d'industrialisation.
- La fabrication de sous-systèmes associant le *stack* (l'empilement des cellules) et ses auxiliaires (gestion des flux de gaz, d'eau, de chaleur et de courant). L'enjeu consiste ici à les concevoir pour pouvoir être intégrés et pilotés au sein de systèmes plus vastes et interagir avec eux : qu'ils soient embarqués dans un véhicule prototype ou soient adossés à un micro-réseau électrique.
- Enfin, au travers de démonstrateurs à taille réelle, la réalisation de tests sur ces sous-systèmes opérés sur un temps long (plusieurs milliers d'heures) et en conditions réelles : c'est ce qui est fait au travers de démonstrateurs de *power-to-gas*, d'unités de production d'hydrogène innovantes (électrolyse, biomasse) ou de l'exploitation de premiers véhicules (bus, navires, camions).

La maturité des technologies et leur maîtrise (performances, coût, durée de vie) sont aujourd'hui suffisantes pour envisager un déploiement aval sur certains marchés applicatifs. Les enjeux de recherche

et d'innovation demeurent d'actualité ; les efforts en la matière doivent être renforcés : il s'agit en effet de préparer les nouvelles générations d'éléments et d'équipements nécessaires à l'essor de la chaîne technologique hydrogène.

L'accompagnement des activités de recherche et d'innovation par l'Ademe depuis plus de quinze ans permet aujourd'hui d'identifier le potentiel de cette technologie (voir le Tableau 1 ci-après).

## Amorçage de la constitution d'une filière au travers des usages de l'hydrogène

Si l'électrolyse est une technologie mature, l'hydrogène électrolytique demeure encore trop onéreux par rapport à l'hydrogène carboné issu du gaz naturel. L'impact environnemental de ce dernier est néanmoins très élevé (11,7 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub> produit<sup>(1)</sup>). Si l'hydrogène électrolytique peut jouer un rôle clé en tant que technologie de décarbonation, il doit au préalable faire l'objet d'une baisse forte de ses coûts.

Un accompagnement public s'avère utile. Mais celui-ci doit être pensé dans une optique de priorisation des soutiens à apporter au profit des secteurs les plus proches du marché ou de ceux qui représentent l'opportunité industrielle la plus marquée pour l'économie française. Se dessinent ainsi deux marchés complémentaires.

## Le marché de la mobilité lourde professionnelle...

Il s'agit tout d'abord du marché de la mobilité lourde professionnelle – le transport de personnes ou de marchandises –, pour lequel le prix cible de l'hydrogène en station-service doit se situer entre 7 et 8 €/kg pour permettre d'atteindre la compétitivité par rapport

<sup>(1)</sup> <https://bibliothèque.ademe.fr/cadic/7092/note-h2-bleu-2022.pdf>

Les atouts de l'hydrogène pour la transition écologique	Les points faibles et/ou challenges à relever pour développer les applications de l'hydrogène
<p>Une chaîne énergétique potentiellement sans carbone grâce à l'électrolyse</p> <p>Aucune émission polluante lors de son utilisation finale (rejet d'eau et de chaleur), qualité de l'air au niveau local</p> <p>Des technologies modulaires avec des productions allant du kW à plusieurs centaines de MW, adaptables selon les modèles énergétiques</p> <p>Une flexibilité temporelle et spatiale permise par le découplage entre production primaire d'énergie et l'usage de celle-ci</p>	<p>Un rendement énergétique global – de la source électrique à l'usage – de l'ordre de 25 % ; il est inférieur à celui des batteries, lorsque le recours à celles-ci est possible</p> <p>Des conditionnements de l'hydrogène (à haute pression ou sous forme liquide) peu performants en termes de masse ou de pertes</p> <p>Emploi de matériaux précieux (platine, iridium)</p> <p>Coûts de production encore élevés, en attente de bénéficier de l'effet d'industrialisation</p>

Tableau 1 : Atouts et faiblesses de l'hydrogène pour la transition écologique – Source : <https://bibliothèque.ademe.fr/mobilite-et-transport/1685-rendement-de-la-chaine-hydrogene.html>

à des véhicules thermiques : bus, autocars, camions. Ce prix cible est atteignable grâce au recours à des électrolyseurs de taille moyenne (de quelques MW à plusieurs dizaines de MW), répartis sur tout le territoire et associés à un acheminement optimisé de l'hydrogène jusqu'aux stations, ce qui permet de contenir les coûts liés à cette étape du transport de l'hydrogène. Ce marché se caractérise aussi par une limitation de l'impact environnemental lié au transport de l' $H_2$  sur de longues distances ( $0,8 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$  pour  $100 \text{ km}^{(2)}$ ).

Ce marché s'appuie structurellement sur les opportunités créées par les contraintes réglementaires relatives à la qualité de l'air en milieu urbain et périurbain, lesquelles poussent les opérateurs et les collectivités à déployer des véhicules lourds performants. Son essor dépend néanmoins du développement de l'offre de véhicules à hydrogène et des conditions de son industrialisation. Il est subordonné au développement en parallèle des progrès réalisés en matière de véhicules électriques à batterie, lesquels représentent la principale alternative pour des besoins où disposer d'une autonomie limitée suffit. Si le surcoût actuel est conséquent (un camion de 44 tonnes roulant à l'hydrogène est d'un prix quatre à cinq fois plus élevé que celui d'un camion diesel), l'industrialisation des technologies « Pile à combustible » et l'évolution à la hausse des carburants fossiles rendent le modèle d'affaires viable à terme (voir la Figure 2 ci-après).

### ... et le marché de l'industrie

Le second marché est celui de l'industrie, où l'hydrogène est d'ores et déjà employé pour des usages de type matière, notamment dans le raffinage, la pétro-

chimie et la chimie pour la production de carburants et d'engrais. Pour ces acteurs industriels aux usages captifs, le prix de l'hydrogène est directement corrélé au prix du gaz naturel, dont il est extrait par vapour-formage : l'hydrogène issu de l'électrolyse doit donc atteindre la cible prix que représente cet hydrogène carboné, de l'ordre de  $2 \text{ €/kgH}_2$  pour un cours du gaz à  $20 \text{ €/MWh}$ . La décarbonation des usages sur ce marché passera par le recours à des électrolyseurs de plusieurs dizaines à centaines de MW permettant des économies d'échelle et à une électricité produite à très faible coût.

Une partie du marché industriel est néanmoins constitué par l'hydrogène dit « marchand » : l'hydrogène considéré est conditionné et transporté vers des consommateurs industriels diffus de la métallurgie, de l'industrie agroalimentaire, de l'électronique, etc. Pour ces clients, le coût de l'hydrogène livré peut atteindre aujourd'hui, voire dépasser  $8 \text{ €/kg}$ . Ces consommations représentent un marché d'amorçage pour l'hydrogène d'électrolyse, qui permet de produire sur site de manière compétitive en évitant des coûts de logistique et d'acheminement.

Pour ces deux marchés applicatifs, l'accompagnement public est nécessaire. Il combine plusieurs objectifs dans une logique de filière française :

- le déploiement d'offres d'équipements et de services associés (électrolyseurs, équipements de conditionnement et de distribution, piles équipant les véhicules, etc.) dans une logique d'industrialisation aux échelles européenne et française ;
- le soutien aux infrastructures de production pour abaisser le coût de mise à disposition de l'hydrogène issu d'électrolyse et rendre économiquement acceptable son utilisation.

<sup>(2)</sup> <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/4213-analyse-de-cycle-de-vie-relative-a-l-hydrogene.html>

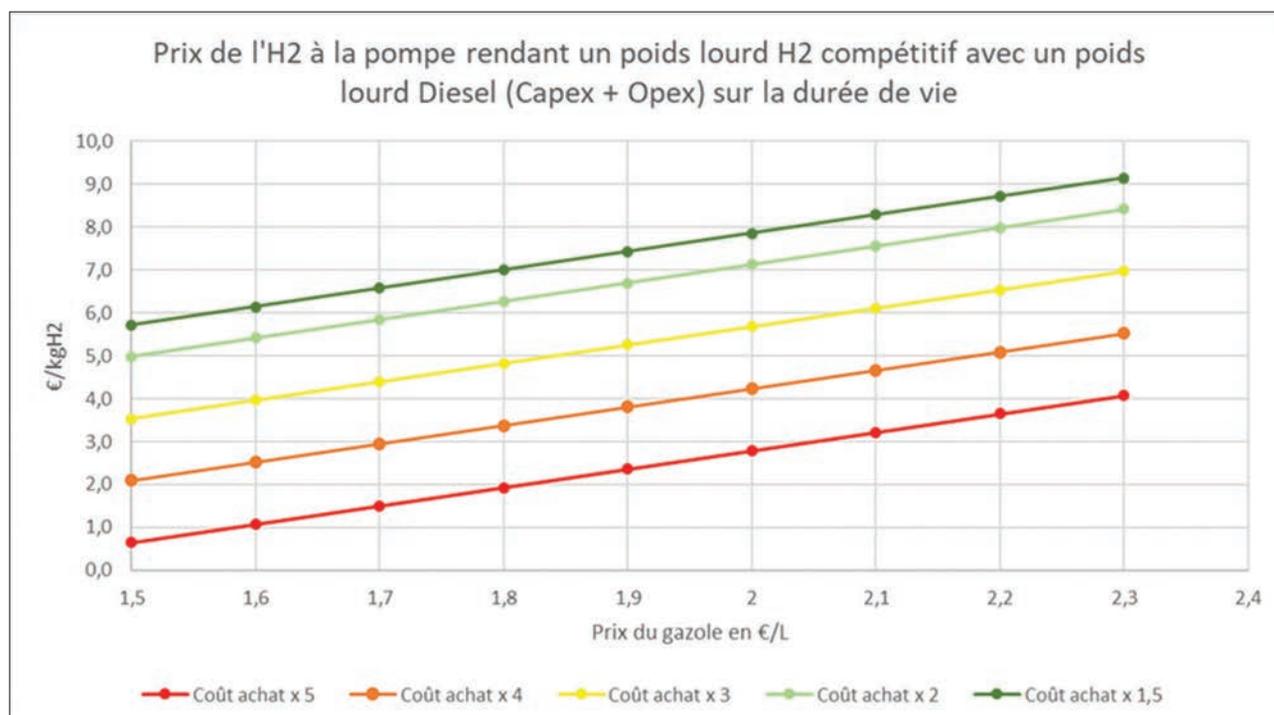


Figure 2 : Comparatif de compétitivité entre des poids lourds utilisant de l'hydrogène et des poids lourds diesel : le prix à la pompe de l' $H_2$  peut rester aux alentours de  $7 \text{ €/kg}$  si le coût d'achat des véhicules utilisant ce gaz est 1,5 fois plus élevé que celui d'un véhicule diesel – Source : Ademe.

## Le déploiement des écosystèmes : état des lieux

Le plan national de déploiement de l'hydrogène initié en 2018, puis la Stratégie nationale hydrogène de 2020 ont amorcé une logique d'accompagnement de la filière par le soutien à la fois de l'offre et de la demande locales, au travers des appels à projets portés par l'Ademe pour le compte de l'État. Ces appels à projets ont pour vocation de soutenir des « écosystèmes territoriaux hydrogène », c'est-à-dire des investissements combinant, sur un même territoire, une infrastructure de production/distribution de l'hydrogène issu de l'électrolyse et des usages industriels de ce dernier ainsi qu'en matière de mobilité.

L'enjeu est de permettre la constitution de consortiums complets (collectivités, opérateurs énergéticiens, entreprises du transport, etc.) pour mettre en œuvre de manière opérationnelle des installations : cela recouvre la gestion des risques techniques associés aux installations et aux véhicules, les autorisations administratives, le financement des projets et l'acceptation des surcoûts d'exploitation, la formation des opérateurs, la synchronisation des prises de décisions entre les différents partenaires, etc.

L'Ademe, pour le compte de l'État, a lancé plusieurs appels à projets (AAP) successifs destinés à accompagner le déploiement territorial de ces écosystèmes. Le Tableau 2 ci-après présente les principaux résultats de ces appels. Il est précisé que certains projets sont toujours en cours d'instruction. Ce tableau est un inventaire des réalisations projetées, dans l'hypothèse où tous ces projets seraient effectivement mis en œuvre.

Plusieurs observations peuvent être faites et différents enseignements peuvent être tirés de ces appels à projets successifs :

- Est observée une nette accélération des intentions de projets et d'investissements : ainsi, l'appel à projets de 2021 comptait une soixantaine de candidatures. Les acteurs impliqués sont aussi bien des acteurs privés (entreprises, opérateurs énergéticiens) que des collectivités ou organismes associés (syndicats d'énergie, SEM). Ces projets concernent tous les types de territoires, urbains comme ruraux.

- Les usages visés sont essentiellement des usages de mobilité, développés à l'initiative des collectivités. Néanmoins, des opérateurs du transport de marchandises et des logisticiens sont de plus en plus présents dans les derniers appels à projets relevés à travers l'acquisition de camions et d'utilitaires.

- La construction de tels écosystèmes se déploie sur un temps long : des premières réflexions développées en amont par les acteurs du territoire jusqu'à la mise en service des installations, les étapes sont nombreuses. On compte *a minima* deux ans entre la décision d'investissement et l'exploitation des installations, ce qui nécessite un engagement continu et soutenu des partenaires.

En attendant que le niveau de maturité de la filière soit suffisant pour permettre la mise en place d'un dispositif de soutien public plus adapté à un déploiement massif, ces premiers écosystèmes permettent de donner une visibilité à court terme aux acteurs industriels pour assurer la montée en puissance de leur capacité de production.

## Place de l'hydrogène dans les scénarios de neutralité carbone

Fin 2021, l'Ademe a publié ses travaux prospectifs relatifs à la neutralité carbone à l'horizon 2050 et intitulés : Transition(s) 2050. Ces travaux reposent sur une modélisation croisée de l'ensemble des secteurs d'activité de la société (agriculture, transports, bâtiment, industrie) et proposent quatre scénarios contrastés permettant d'atteindre la neutralité carbone en France : génération frugale (S1) ; coopérations territoriales (S2) ; technologies vertes (S3) ; et pari réparateur (S4).

### Méthodologie, usages retenus et ceux non retenus

C'est l'hydrogène, en tant que matière, produit intermédiaire ou vecteur énergétique, qui a été pris en considération dans cet exercice. La panoplie des usages possibles de l'hydrogène s'avérant très vaste, le recours à celui-ci a été considéré, pour chaque secteur ou sous-secteur, au regard des autres technologies disponibles pour minorer les émissions et réduire l'empreinte carbone. La coexistence de technologies pour un

AAP	Nombre de projets soutenus	Investissements et aides de l'Ademe	Capacités d'électrolyse et de distribution	Volumes des usages Déploiement de véhicules
Écosystèmes de mobilité hydrogène (2019)	21	449 M€ Aides de 98 M€	22 MWélec 57 stations-services	2 000 tH <sub>2</sub> /an 170 véhicules lourds
Écosystèmes territoriaux hydrogène (2021)	35	1 214 M€ Aides de 296 M€	89 MWélec 60 stations-services	10 600 tH <sub>2</sub> /an, dont 1 300 pour des usages industriels 630 véhicules lourds

Tableau 2 : Bilan à date des projets d'écosystèmes soutenus par l'Ademe.

secteur donné peut conduire en effet à une situation de concurrence ou, au contraire, de complémentarité :

- Dans le domaine des transports terrestres par exemple (mobilité individuelle et collective des particuliers, au niveau des différents segments du transport de marchandises), le recours au carburant hydrogène est en compétition ou est complémentaire à d'autres options, comme les solutions batteries, les biocarburants liquides, le gaz et les carburants de synthèse (e-fuels).
- Dans l'industrie, certains secteurs seront amenés à faire des choix en matière de procédés ou de modèles qui conditionneront l'opportunité ou non de recourir à l'hydrogène pour décarboner leurs activités : dans la sidérurgie, par exemple, où l'électrification directe peut jouer un rôle important.

Cette analyse contextuelle a également conduit à écarter certains usages de l'hydrogène, là où son emploi ne s'avère pas nécessaire. C'est le cas de l'usage de l'hydrogène dans les bâtiments, de ses usages thermiques dans les fours industriels ou pour l'équilibrage des réseaux électriques *via* la solution du *power-to-hydrogen-to-power*.

### Principales conclusions en fonction des différents scénarios

Les consommations d'hydrogène sont supérieures à celles constatées aujourd'hui dans tous les scénarios étudiés (jusqu'à 4,5 fois) et la technologie de l'électrolyse s'avère indispensable pour remplacer l'hydrogène actuellement produit à partir de gaz fossile. Au

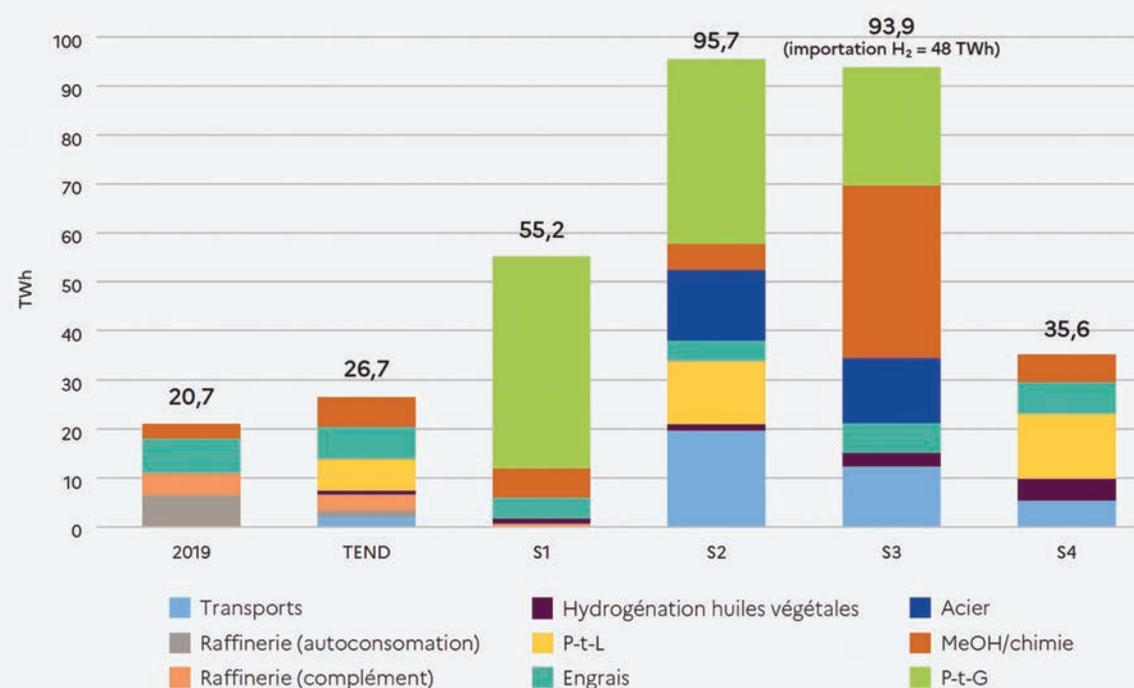
maximum, la production d'hydrogène sur le sol français atteindra 96 TWh en 2050 (S2) pour des usages diffus (*power-to-gas* et mobilité), auxquels s'ajouteront des usages industriels plus centralisés, tels que la production d'engrais et de méthanol, la synthèse de carburants liquides et la réduction de l'acier. Le scénario 3 est le seul à évoquer l'option des importations d'hydrogène (48 TWh) (voir la Figure 3 ci-après).

Le développement de la mobilité lourde à hydrogène apparaît comme nécessaire dans la plupart des scénarios pour décarboner les usages correspondants. L'intérêt de l'amorçage de ce marché, à travers la logique de soutien aux écosystèmes territoriaux, est ainsi confirmé. Les premières années de la décennie actuelle seront cependant cruciales pour valider l'adéquation des offres de véhicules par rapport aux besoins de mobilité et aux conditions d'exploitation par les opérateurs (voir le Tableau 3 de la page suivante).

Par ailleurs, ces travaux identifient de nouveaux usages stratégiques à prendre désormais en considération dans la phase de déploiement de la filière :

- la place du *power-to-CH<sub>4</sub>* apparaît essentielle dans trois des quatre scénarios modélisés pour contribuer à décarboner le vecteur gaz et les usages finaux non électrifiables (bâtiments résidentiels et tertiaires, usages industriels du gaz) ;
- le recours au *power-to-liquid* apparaît lui aussi nécessaire pour produire les molécules et/ou carburants de synthèse devant permettre de décarboner les secteurs de la chimie et du transport lourd.

**Graphique 9** Bilan des consommations d'hydrogène en 2050 en TWh pour les différents scénarios, incluant l'autoconsommation des raffineries



\* P-t-G : power-to-gas ; \*\* P-t-L : power-to-liquid.

Figure 3 : Bilan des consommations d'hydrogène en 2050, par scénario et par usages – Source : Rapport Transition(s) 2050 de l'Ademe, <https://transitions2050.ademe.fr/>

		<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>	<b>S4</b>
2030	Consommation en TWh H <sub>2</sub> /an	22	35,2	49,4 (dont 6 Twh importés)	22,7
	Part des ressources électricité et gaz	Respectivement 23 % et 77 %	Respectivement 62 % et 38%	Respectivement 89 % et 11 %	Respectivement 23 % et 77 %
	Puissance du parc d'électrolyse, en GW	1,8	5,1	11,8	0,9
2050	Consommation en TWhH <sub>2</sub> /an	55,2	95,7	93,9 (dont 48 Twh importés)	35,6
	Part ressource électricité et gaz	Respectivement 81 % et 19 %	Respectivement 100 % et 0 %	Respectivement 100 % et 0 %	Respectivement 66 % et 34 %
	Puissance du parc d'électrolyse, en GW	20,1	30,1	28,8	4,8

Tableau 3 : Parc de production d'hydrogène, par technologie et par scénario.