Book H2DEC

Édition 2024

Accélérer l'innovation de l'hydrogène décarboné

Production · Stockage · Conversion

FRANCE 2030

RÉSEAU SATT

ÉDITO
Catherine GUILLEMIN et François HÉDÉ 3

LE CONTEXTE ÉNERGÉTIQUE 4

LA STRATÉGIE NATIONALE D'ACCÉLÉRATION 6

LES CHIFFRES CLÉS 7

LES GRANDS OBJECTIFS 10

LA SITUATION DE LA FILIÈRE 11

PAROLES D'EXPERTS
Hoang BUI 14

PAROLES D'EXPERTS
Abdelilah SLAOUI 16

PAROLES D'EXPERTS
Hélène BURLET 18

KEY OPINION LEADER INDUSTRIEL
Philippe BOUCLY 21

PAROLES D'INVESTISSEURS
Pierre-Germain MARLIER 24

PAROLES DE CHERCHEURS
Daniel HISSEL 26

PAROLES DE CHERCHEURS
Vincent MAISONNEUVE et Samuel MATHIOT 28

PAROLES DE CHERCHEUSES
Stéphanie ROUALDÈS 30

PAROLES DE CHERCHEUSES
Patricia DE RANGO 32

PAROLES DE CHERCHEUSES
Catherine AZZARO-PANTEL 34

PAROLES DE START-UP
Jules BILLIET 36

CANDIDATER À H2DEC 38

LES PARTENAIRES 39

Directeur de publication : C. Guillemin, SATT Sayens - F. Hédé, SATT Linksium
Direction de rédaction : F. Bouyge, SATT Sayens - C. Duprez, SATT Ouest Valorisation | Conception : A. Petit, SATT Sayens
Crédits photos : Adobe Stock, Freepik | Date de publication : Janvier 2024

Avec l'hydrogène décarboné, faire de la France le leader mondial de l'innovation du futur énergétique

En relevant les défis liés au changement climatique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'hydrogène détient la clé d'une grande partie de la transition vers un avenir énergétique durable.

Certes, cette transition nécessite des investissements importants et ambitieux pour la recherche, l'innovation, le développement mais aussi pour le déploiement des infrastructures. Fort de ces constats, l'État a lancé, de nombreuses initiatives, au premier rang desquelles un volet spécialement dédié de **France 2030**, doté d'une enveloppe de neuf milliards d'euros. Le choix de cet effort majeur ne doit rien au hasard. Notre pays figure en effet aux avant-postes de la recherche et de l'innovation.
Au fil de la lecture de ce livre blanc, les témoignages inédits particulièrement éclairants des principaux acteurs de la filière ; institutionnels, financeurs, industriels, start-ups et bien sûr chercheurs, confirment que s'il ne convient pas à tous les usages, l'hydrogène s'impose comme incontournable en particulier dans la décarbonation de l'industrie et de la mobilité lourde. Encourager et soutenir la filière hydrogène, c'est par conséquent aussi et surtout affirmer et accroître la position de leader de la France vis-à-vis de cette source d'énergie du futur.
C'est précisément dans cette optique qu'a été conçu et lancé H2DEC. Parfaitement articulé avec en amont les « programmes équipements prioritaires de recherche » (TRL 1-4), dispositifs structurants de soutien à la recherche dédiés à l'hydrogène décarboné, le programme de maturation-prématuration met à disposition un dispositif de financement et d'accompagnement exceptionnel pour l'innovation issue des universités et organismes nationaux de recherche en vue d'accélérer le transfert vers les industriels. Le PEPR et le programme maturation-prématuration sont des démarches de soutien à l'innovation sur des enjeux prioritaires pour l'économie française portées par France 2030.
Le consortium H2DEC regroupe ainsi 18 acteurs de la recherche publique et de l'innovation dont les structures de transfert de technologies couvrent la totalité du territoire français. La coordination est réalisée par deux SATT : Sayens pour les actions de prématuration et Linksium pour celles relevant de la maturation. Cette remarquable concentration de moyens rendue possible grâce au soutien de l'Etat (France 2030) entend répondre aux priorités formulées par la Stratégie Nationale d'Accélération dédiée à l'hydrogène décarboné et donc aux ambitions françaises et européennes en la matière.
Le livre blanc **H2DEC** fait une large place à des entretiens avec des acteurs de la filière en expliquant les enjeux centraux et en réalisant un état des lieux des forces, des avancées et des défis qui nous attendent. Une véritable mobilisation nationale est dès à présent en marche autour de ce sujet déterminant pour le monde de demain et la place que la France y occupera.

Que vous soyez chercheurs, entrepreneurs, financeurs ou institutionnels, c'est aujourd'hui que se joue notre avenir et il convient d'unir nos forces autour de ce projet. H2DEC constitue une formidable opportunité pour cette mobilisation, et ses partenaires sont engagés à vous y aider. Bonne lecture.

SAYENS SATT CATALYSEUR D'INNOVATIONS
Catherine GUILLEMIN
Présidente SATT Sayens

Linksium technology transfer & startup building Grenoble Alpes
François HÉDÉ
Président SATT Linksium

L'HYDROGÈNE, KÉSAKO ?

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, de crise énergétique et de désindustrialisation, l'hydrogène constitue un atout majeur. S'il est l'élément chimique le plus abondant sur Terre, il est en revanche peu présent à l'état naturel.

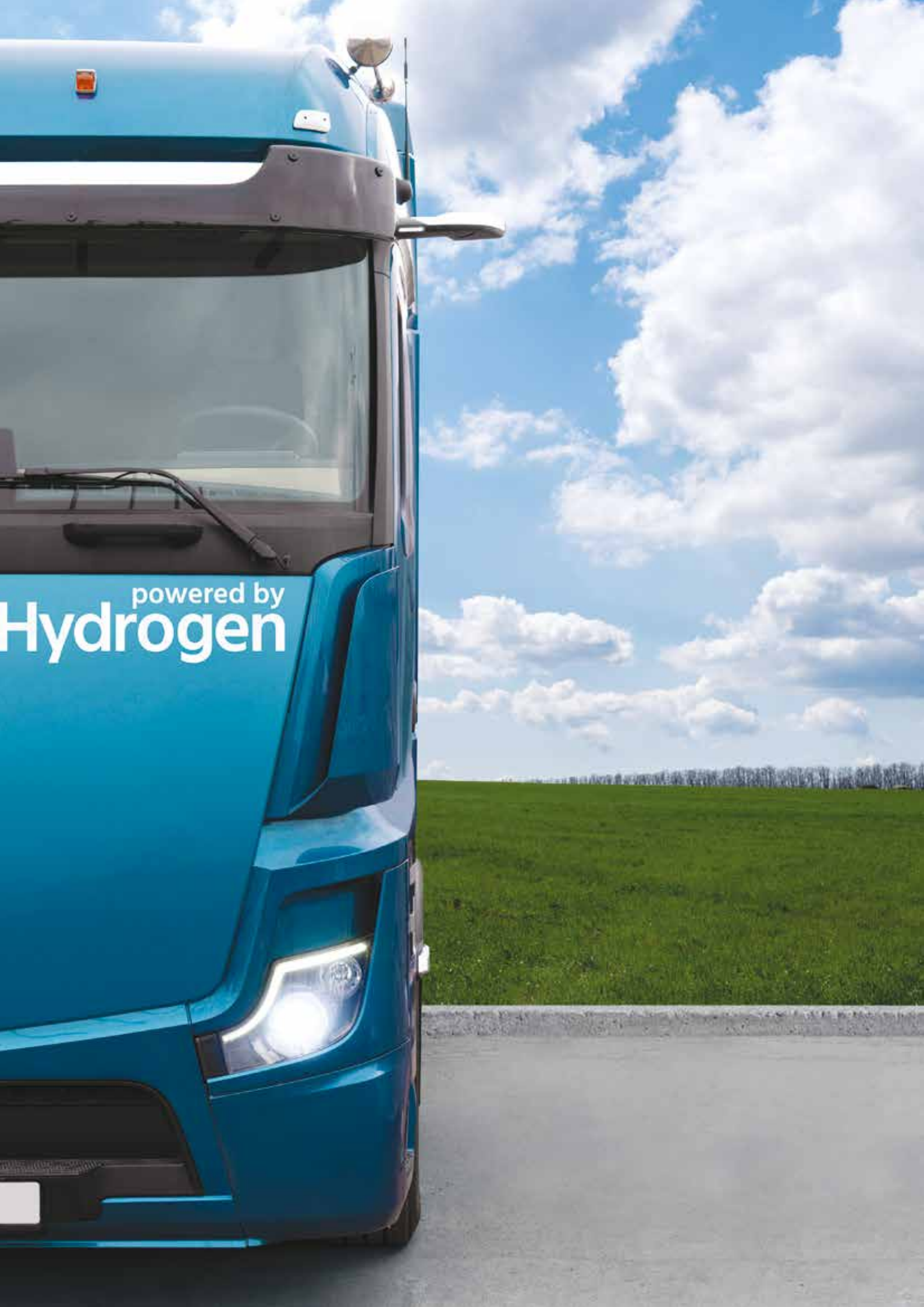
On le trouve ainsi très majoritairement combiné avec d'autres atomes, en particulier l'oxygène dans l'eau ou le carbone dans les hydrocarbures. Autres atouts majeurs, il se révèle deux à trois fois plus énergétique que le pétrole ou le gaz et ne rejette que de l'eau lors de sa combustion… Il offre par conséquent une opportunité majeure de décarbonation pour des secteurs aussi importants et impactants que les transports, l'industrie ou encore l'énergie.

Dans le cas des transports, qu'il s'agisse de véhicules routiers, ferroviaires, maritimes, fluviaux ou autres, comme les chariots élévateurs par exemple, l'énergie électrique constitue une véritable révolution et une arme de décarbonation massive.

Dans le cas qui nous intéresse, elle est produite par une pile à combustible alimentée par l'hydrogène. Une méthode silencieuse, sans émission et au temps de recharge rapide, qui convient parfaitement aux véhicules nécessitant à la fois une puissance motrice et une autonomie importante pour une utilisation intensive. C'est notamment le cas des transports collectifs ou de marchandises, ou encore de la collecte d'ordures ménagères.

Dans l'industrie, il s'avère en effet idéal pour décarboner des domaines aussi énergivores que la production de ciment, de fer, d'acier, d'engrais ou encore de produits chimiques, dont la conversion à l'électricité s'avérerait trop coûteuse.
Or c'est précisément dans le domaine de l'énergie que la révolution sera l'une des plus fortes. L'hydrogène constitue une source idéale pour les bâtiments, les sites isolés ou les applications de secours. L'électricité générée par les énergies renouvelables obtenues par électrolyse peut être convertie et stockée sous forme d'hydrogène décarboné sur de longues durées et transportée sous forme liquide ou gazeuse, voire de molécules. Son utilisation sera alors différée. Il apporte ainsi une réelle flexibilité aux réseaux électriques et gaziers en permettant de stocker l'électricité non consommée et d'optimiser le recours aux énergies renouvelables

Présenté en complément il y a tout juste un an, le plan RePower EU a multiplié par deux les objectifs concernant l'hydrogène renouvelable. La Commission encourage notamment l'installation d'électrolyseurs de grande puissance.
De nombreux pays, comme l'Allemagne, le Royaume-Uni, l'Espagne, les Pays-Bas ou encore l'Italie, ont chacun adopté des stratégies ambitieuses de développement de la filière. Et la France se trouve aux avant-postes !


powered by
Hydrogen

La Stratégie Nationale hydrogène décarboné : un enjeu de souveraineté nationale

Une priorité nationale depuis 2018

En France, le développement de la filière hydrogène constitue une question de souveraineté. Elle offre à la fois l'opportunité de réindustrialiser le territoire national, de créer et de reconvertir des emplois, et de progresser en matière d'indépendance technologique et énergétique. Aussi est-elle identifiée et soutenue comme une industrie stratégique.
Le pays a été l'un des premiers à déployer un plan dédié dès 2018 et à lui apporter un important soutien. Le premier PIA, Programme d'investissements d'avenir, a ainsi mobilisé plus de 100 millions d'euros qui se sont soldés notamment par la mise en œuvre de démonstrateurs et la prise de participations dans des entreprises à fort potentiel. L'ANR, Agence Nationale de la Recherche, a soutenu la recherche publique en mobilisant plus de 110 millions d'euros.
En 2020, l'hydrogène décarboné est identifié comme prioritaire parmi les 11 marchés clés retenus par un collège d'experts réuni autour du Conseil de l'Innovation, sur lesquels le pays souhaite concentrer sa nouvelle vague d'investissements d'avenir. Une large consultation sous la forme d'un « Appel à Manifestation d'Intérêt » (AMI) est alors engagée pour permettre aux porteurs - industries, territoires, centres de recherche - de faire connaître leurs projets et de recenser les verrous techniques, réglementaires et financiers qui nuisent à l'émergence d'une chaîne de valeur. Le Conseil National de l'Industrie et les représentants des filières s'impliquent également dans cette réflexion qui se solde par un vrai succès avec plus de 160 dossiers déposés

Une stratégie nationale résolument volontariste jusqu'à 2030

Dans la foulée, **le gouvernement annonce un investissement sans précédent. Dotée d'une enveloppe de deux milliards d'euros issue du plan de relance, la stratégie pour le développement de l'hydrogène décarboné fixe une trajectoire qui court jusqu'en 2030** et qui doit mobiliser au total sept milliards d'euros de soutien public. Son but : favoriser un passage rapide à l'échelle industrielle et engendrer ainsi une baisse significative des coûts de production. Une priorité nationale, compte tenu du contexte mondial et des enjeux environnementaux, économiques, de souveraineté énergétique et d'indépendance technologique. Cette somme sera investie dans trois grandes priorités.

PERSPECTIVE 2030

Une décennie pour le développement de l'hydrogène renouvelable et bas-carbone

2030 – Objectifs de la Stratégie Nationale

pour le développement de l'hydrogène décarboné en France

6,5 GW* d'électrolyse déployés

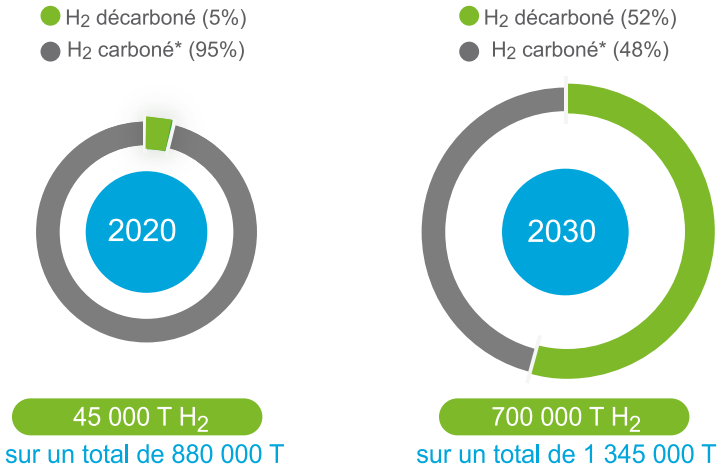
* 5 MW d'électrolyse déployés en 2020

6 000 000 T CO_2* évitées par an

* soit les émissions de la Ville de Paris sur une année

Développement de la production d'hydrogène

pour l'industrie et les nouveaux usages



* hydrogène issu de sources fossiles

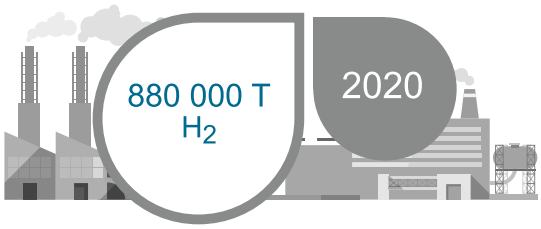
*Source : « Infographie Chiffres clés H2 2020-2030 », France Hydrogène, 2023

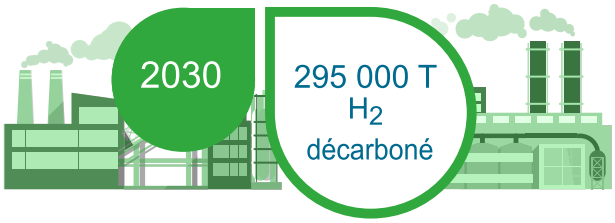
Les chiffres clés

Pour quels usages ?

Industrie

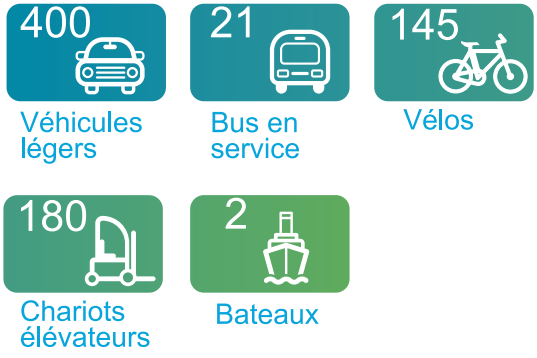
Un vecteur de décarbonation



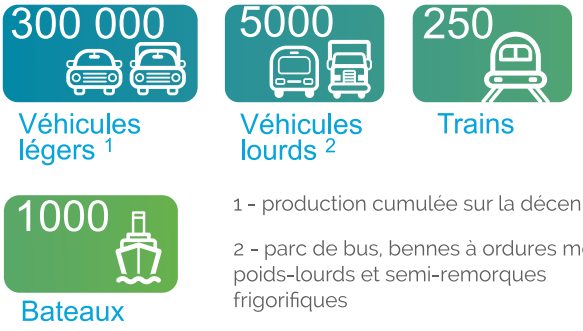


Mobilité

En circulation en 2020



Objectifs de la filière en 2030, 342 000 T d'H_2 décarboné pour :



1 - production cumulée sur la décennie

2 - parc de bus, bennes à ordures ménagères, poids-lourds et semi-remorques frigorifiques

Objectifs à 2028 de la Programmation Pluriannuelle de l'Energie
- *20 000 à 50 000 véhicules utilitaires légers*
- *800 à 2000 véhicules lourds*

Stations de recharge H_2

Rappel des objectifs de la PPE 2028 : 400 à 1000 stations

*Source : « Infographie Chiffres clés H2 2020-2030 », France Hydrogène, 2023

Les chiffres clés

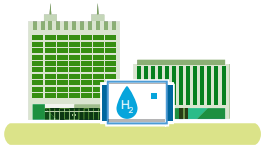
Énergie

2020 — Intégration des énergies renouvelables — 2030

Stockage intersaisonnier

Refuge dans le Parc de la Vanoise

Bâtiments tertiaires à Saint Herblain



Village de Mafate à la Réunion

Site en Guyane

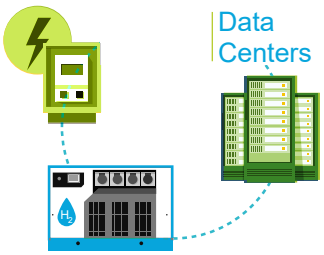
Myrte en Corse

Les nouveaux usages

Alimentation de secours

Data Centers

Générateurs électrogènes à hydrogène



Alimentation à quai des navires

Injection réseau testée (jusqu'à 20% d'hydrogène)

GRHYD

Jupiter 1000

Minerve

Hycaunais…

Injection réseau et stockage massif d'hydrogène

43 000 T H_2 renouvelable ou bas-carbone

HyGreen

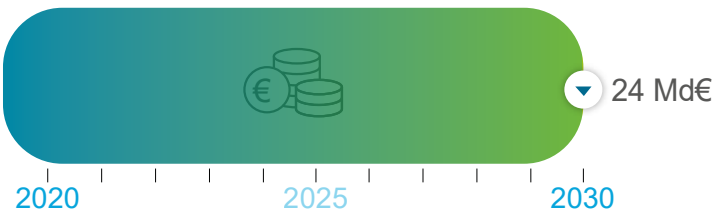
EMIL'HY

HYGEO...

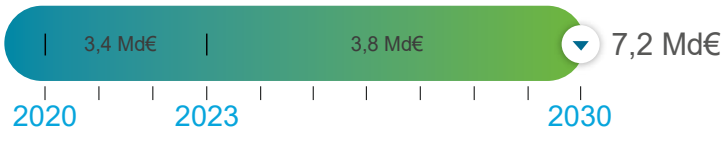
2030 - Les moyens déployés

pour atteindre les objectifs de la filière H_2

Besoins d'investissements — identifiés par la filière H_2



Soutien public — Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France



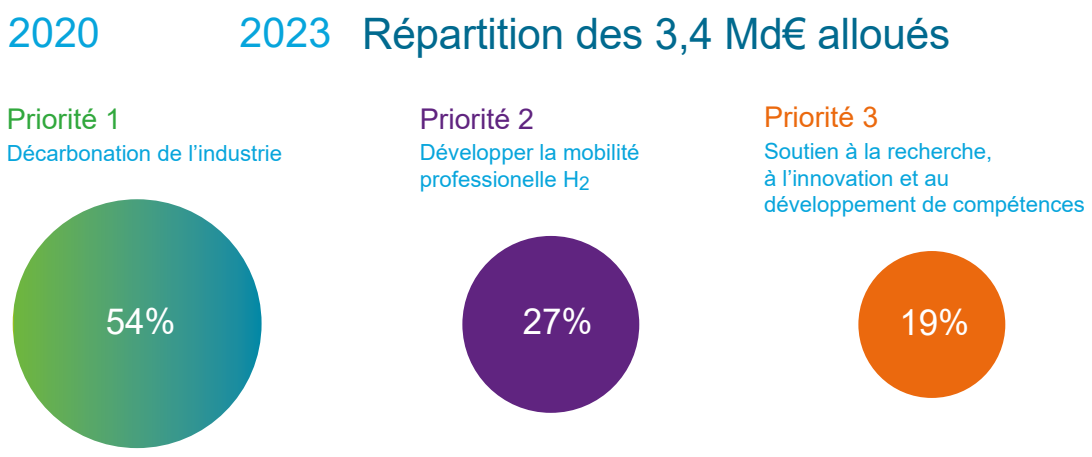
*Source : « Infographie Chiffres clés H2 2020-2030 », France Hydrogène, 2023

Les 3 grandes priorités de la Stratégie Nationale

La première consiste à **décarboner l'industrie** via l'émergence d'une filière française de l'électrolyse. Avec un objectif chiffré de 6,5 gigawatts d'électrolyseurs installés en 2030 et 475 000 tonnes par an d'hydrogène renouvelable et bas carbone produites pour alimenter les usages industriels. Et en corollaire la possibilité de conserver ces industries, notamment la sidérurgie, sur le sol français… Cette énergie devra aussi remplacer l'hydrogène carboné utilisé dans le raffinage, la chimie et des secteurs comme l'électronique ou l'agroalimentaire par exemple. Ce qui nécessite d'adapter et de développer les procédés industriels qui leur sont propres.

Car la deuxième priorité du plan réside précisément dans l**e développement d'une offre de mobilité lourde à l'hydrogène décarboné** : il s'agit de promouvoir des équipements et composants, tels que des piles à combustibles, des réservoirs ou des systèmes électroniques, liés à la mobilité lourde. Un appel à projets « Briques technologiques et démonstrateurs » doté de 350 millions d'euros a été lancé pour améliorer les composants et systèmes liés à la production et au transport d'hydrogène, et à ses usages tels que le transport ou la fourniture d'énergie. D'ici 2030, de 1 000 à 1 700 stations hydrogène doivent être déployées, au service de 300 000 à 450 000 véhicules légers, 5 000 à 10 000 poids lourds et au moins 1 000 bateaux.

Enfin, la troisième priorité consiste à **soutenir la recherche, l'innovation et le développement de compétences** afin de favoriser les usages de demain. Parmi lesquels le recours à l'hydrogène dans les réseaux énergétiques pour décarboner le secteur gazier notamment, son intégration dans certains procédés industriels, comme la sidérurgie ou la chimie, pour diminuer les émissions de CO2, ou encore son utilisation dans la mobilité lourde avec les avions et les navires décarbonés.
Afin d'atteindre ces trois objectifs, la Stratégie Nationale propose un ensemble d'outils qui permettront de poursuivre l'effort de R&D et de soutenir l'innovation en faveur de l'industrialisation de nouvelles technologies.



*Source : « Infographie Chiffres clés H2 2020-2030 », France Hydrogène, 2023

Une filière française dynamique

Dynamisée par la politique résolument volontariste de l'Etat, une véritable filière est en train de se structurer dans le pays. France Hydrogène fédère plus de 460 acteurs sur l'ensemble du territoire qui couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur, de la production aux principaux domaines d'utilisation de l'hydrogène, en passant par la conception et la fabrication d'équipements et de composants clés pour la filière.

Deux ans après le lancement de la Stratégie Nationale Hydrogène décarboné, les premiers investissements massifs se matérialisent et les usines sortent de terre. Véritable pas de géant pour la filière, ce déploiement porte la promesse d'une souveraineté technologique, synonyme de renouveau pour l'emploi industriel sur tout le territoire.

Le déploiement croissant des véhicules, des stations et des sites industriels en 2022

Les grands sites industriels concernent :

- **L'électrolyse** : création de quatre gigafactories d'électrolyseurs pour produire de l'hydrogène, décarboner l'économie et satisfaire une partie des besoins du marché européen en hydrogène renouvelable ou bas-carbone. Par exemple Air Liquide va construire un électrolyseur géant de 200 MW en Normandie. Ces projets de méga usines sur le territoire national sont en effet essentiels pour conserver la maîtrise des briques à forts contenu technologique et valeur ajoutée.
- **Les équipements et composants-clés** pour la mobilité lourde et professionnelle comme les piles à combustible ou encore les réservoirs, mais également certains composants clés comme les membranes. Elles joueront aussi un rôle essentiel pour renforcer et pérenniser les bassins industriels qui se développent dans le domaine de l'hydrogène, et pour développer l'emploi local. Par exemple Plastic Omnium va ouvrir une usine de réservoirs dans l'Oise

La mobilité poursuit son accélération

L'offre de véhicules s'étoffe de manière significative sur l'ensemble des segments de la mobilité lourde et/ou intensive.

58 stations de recharge en service

1155 véhicules hydrogène sur les routes dont

33 **550**

240 **325**

*Source : Rapport France Hydrogène 2022

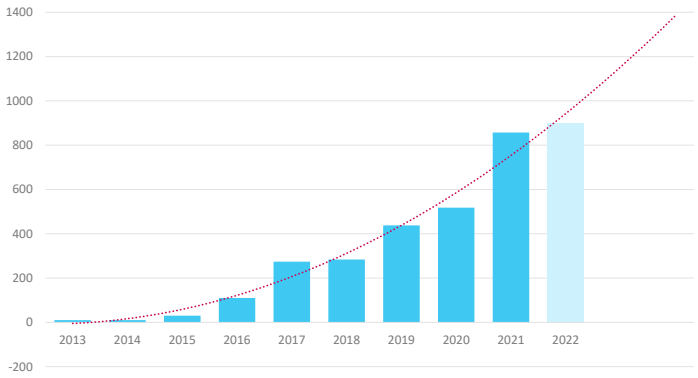
La situation de la filière française

Le rôle central de la recherche

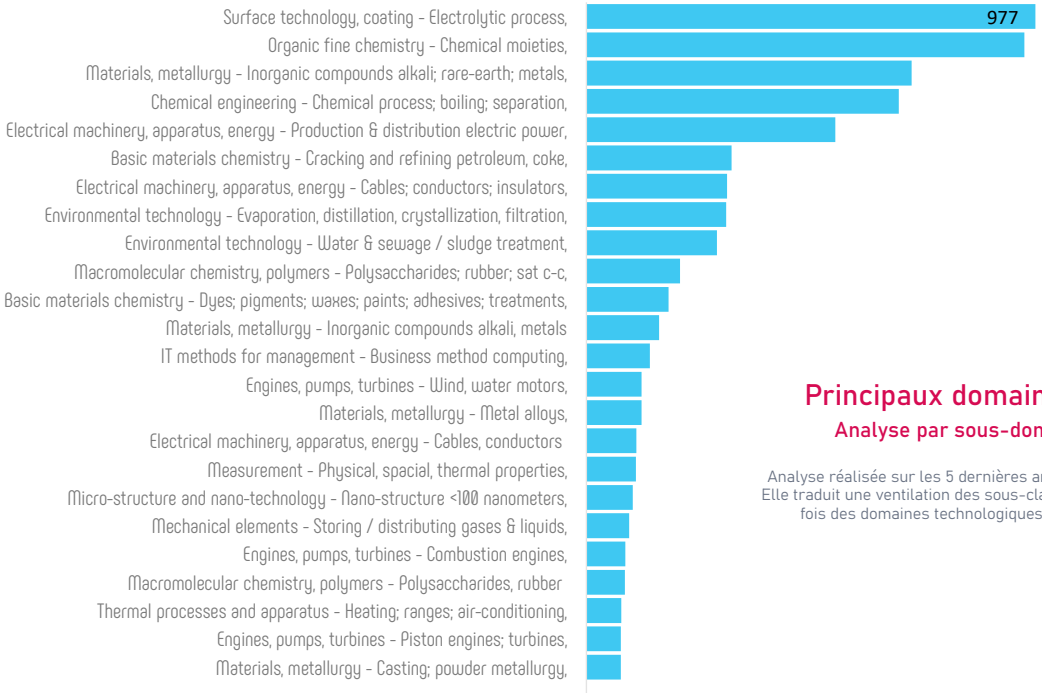
Le rôle de la recherche sera primordial pour atteindre les objectifs et relever les nombreux défis de la stratégie nationale.
Parmi ces défis, la R&D actuelle vise à générer des gains significatifs tant au niveau de la production, qu'à celui du transport et de sa conversion. D'où l'importance des travaux notamment sur l'électrolyse « haute température » qui permettrait de passer d'un rendement de l'ordre de 60% à plus de 90%. Les technologies de mise en œuvre de l'hydrogène étant encore relativement récentes, le potentiel d'optimisation est de facto très élevé. La recherche a également un rôle important à jouer sur le plan de sa production, parfois jugée chère et polluante. Or, si l'industrialisation massive et le passage à l'échelle de la filière via l'augmentation du nombre et de la taille des installations contribueront à faire baisser les coûts, les nouvelles technologies de production d'hydrogène renouvelable ou bas carbone qui se développent rapidement auront aussi une importance majeure.
Le nombre de brevets en lien avec l'hydrogène ne cesse de progresser.

Les domaines technologiques couverts par ces brevets sont couvrent l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène, depuis la production d'hydrogène décarboné, sa purification, son stockage gazeux, liquide ou solide, jusqu'à sa conversion en électricité à travers les piles à combustible.
Fin 2020, on répertoriait ainsi en France près de 350 chercheurs et ingénieurs reconnus internationalement pour leurs travaux sur l'hydrogène. Entre 2014 et 2019, ces derniers ont produit près de 2 500 publications, déposé plus de 200 brevets.

Dynamique des dépôts de brevets sur les 10 dernières années



Analyse mesurant le nombre de famille de brevets prioritaires par année de priorité, soit la tendance des investissements technologiques dans le domaine



Principaux domaines d'innovation

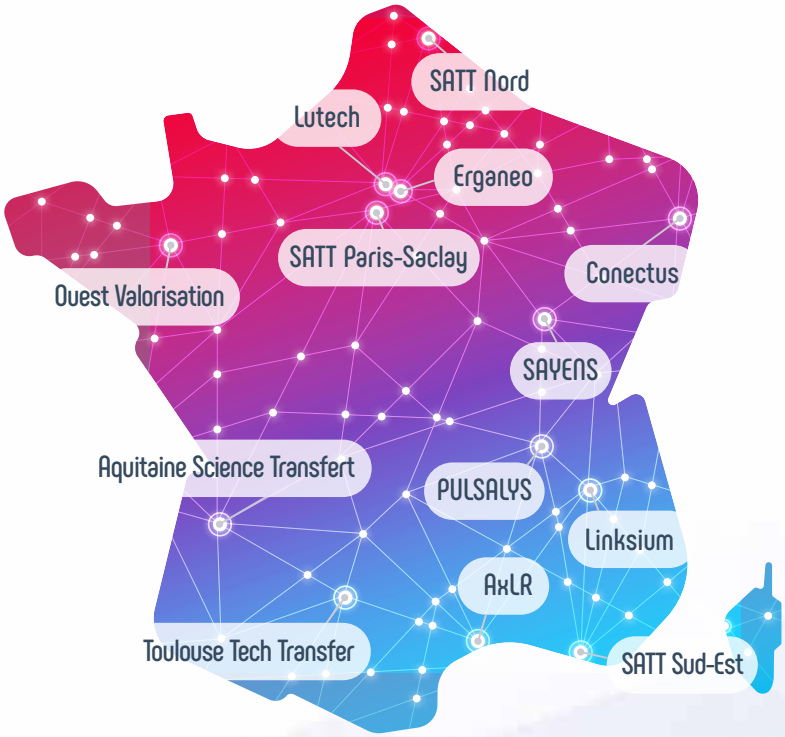
Analyse par sous-domaines techniques

Analyse réalisée sur les 5 dernières années, sur les brevets en vigueur
Elle traduit une ventilation des sous-classes de brevets. Elle apporte à la fois des domaines technologiques, mais également applicatifs.

RÉSEAU SATT

BOOSTEZ VOS **INNOVATIONS**

TRANSFORMONS NOTRE INDUSTRIE



FRANCE 2030

Tout chercheur peut changer l'avenir de nos sociétés

Hoang BUI

Coordonnateur des Stratégies Nationales « hydrogène décarboné » et « décarbonation de l'industrie » au Secrétariat Général pour l'Investissement

Quels champs de recherche couvre la SNA ?

Cette Stratégie Nationale d'Accélération vise à décarboner l'économie française, et en premier lieu l'industrie et la mobilité lourde. Les secteurs susceptibles d'être concernés sont très nombreux, ce qui implique une mobilisation massive à la fois au niveau des équipements et de la production d'hydrogène en vue de répondre à différents usages.

Quelles sont ses missions et ses priorités stratégiques ?

Des priorités ont effectivement été définies. Ce qui signifie de facto que nous ne soutenons pas l'hydrogène à tout prix.
Pour comprendre la nécessité de ces choix, il faut se souvenir que l'hydrogène n'existe quasiment pas à l'état naturel. Il est donc nécessaire de le produire. **L'une des principales ressources énergétiques utilisées dans ce but est l'électricité via l'électrolyse de l'eau**. L'hydrogène produit est comprimé jusqu'à 700 bars pour être stocké afin d'alimenter par exemple une pile à combustible incorporée dans une voiture à hydrogène. Laquelle va produire de l'électricité pour alimenter le moteur.
Or quand l'on étudie le ratio de la quantité d'électricité récupérable par le moteur du véhicule par rapport à celle consommée pour produire l'hydrogène, on s'aperçoit que l'on perd 75 % de celle de départ ! Ce qui signifie qu'il vaut mieux avoir recours directement à l'électricité quand c'est possible afin, in fine, de l'économiser et que l'hydrogène doit être réservé à des usages pour lesquels il n'existe pas d'autre solution de décarbonation plus pertinente en termes de rendement énergétique. Cela explique que la stratégie française ne soutient pas les véhicules légers, pour lesquels la batterie apparaît comme la solution la plus pertinente, la déperdition d'électricité utilisée dans ce cas ne se montant qu'à 20 % environ.

En revanche, pour les véhicules lourds du type autocars ou camions, voire les bateaux ou les trains, cela devient beaucoup plus intéressant. Pour les premiers, les performances des batteries actuelles ne permettent pas de satisfaire des scénarios d'usage de transport de charges lourdes sur de longues distances. En ce qui concerne le train, tous les tronçons ferroviaires n'étant pas électrifiés, le choix de l'hydrogène se justifie en substitution à des motrices diesel notamment. Pour le maritime, le choix reste encore à faire pour décarboner le secteur entre l'hydrogène, le gaz naturel, le biogaz, les biocarburants ou encore les e-fuels.

Dans l'industrie, pour prendre le cas des fours qui fonctionnent au gaz naturel, la décarbonation peut passer par l'électrique. Le souci est que ces modèles montent moins bien en température et se révèlent parfois insuffisants pour des applications à très haute température. Dans ce cas, le recours à l'hydrogène en combustion peut se justifier pour décarboner ces fours. De même, dans la sidérurgie, les hauts-fourneaux nécessitent du charbon et sont des gros émetteurs de

CO_2 pour réaliser la réduction du minerai de fer. Le carbone peut ici d'autant plus être bénéfiquement remplacé par l'hydrogène que ce dernier produit seulement de la vapeur d'eau. Tout cela explique que les choix se sont portés vers la mobilité lourde, car la batterie ne se montre pas suffisamment performante à l'heure actuelle, et vers l'industrie, pour ce qui concerne l'utilisation de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique mais aussi comme molécule chimique dans certains process.

Quels sont les atouts des laboratoires et de l'écosystème français de la recherche ?

Lorsqu'il a lancé France 2030, le Président de la République a annoncé des moyens supplémentaires pour soutenir l'hydrogène, portant l'enveloppe initiale de sept à neuf milliards d'euros. Il l'a fait car **la France possède effectivement les atouts pour devenir un leader mondial de l'hydrogène décarboné**. L'un d'entre eux réside précisément dans le savoir-faire et les investissements réalisés depuis longtemps sur ce sujet par les laboratoires de recherche hexagonaux, notamment le CNRS et le CEA, que ce soit sur la pile à combustible, l'électrolyse ou le stockage. Ce qui explique, par ailleurs, le choix de ces deux organismes pour piloter le programme du PEPR (Programme et Équipements prioritaires de Recherche)

Qu'attendez-vous des chercheurs de ces laboratoires ?

L'hydrogène est utilisé depuis longtemps dans le secteur du raffinage pour la désulfuration des hydrocarbures. Mais si l'on veut le déployer massivement pour d'autres cas d'usage, dans l'industrie et la mobilité lourde, il va falloir relever plusieurs défis. En termes de coûts pour commencer : comme il s'agit d'une filière naissante, les coûts d'investissements – capex - et de fonctionnement – opex - demeurent très élevés par rapport aux solutions fossiles. Rajoutons aussi que certains équipements, comme les électrolyseurs et les piles à combustible, nécessitent actuellement de recourir à des métaux stratégiques coûteux. Ce qui nécessite donc de trouver des solutions pour les faire baisser.
Un deuxième réside dans la fiabilité et la durée de vie des équipements. Comment faire en sorte que la pile à combustible dure plus de 20 000 heures contre seulement quelques milliers actuellement ? Ou que les stockages à 700 bars soient sûrs tout en restant compétitifs ? Comment augmenter la durée de vie des cellules intégrées dans les électrolyseurs, tout en augmentant la densité de courant ? Les exemples ne manquent pas… Si ces innovations sont essentiellement incrémentales, n'oublions pas non plus les ruptures ! Existe-t-il d'autres leviers compétitifs de production de l'hydrogène, comme la photocatalyse qui utilise la lumière du soleil ? Comment améliorer et réaliser la mise à l'échelle de l'électrolyse à haute température ?…
Le volet sociétal fait également l'objet de préoccupations majeures. Les questions de sécurité autour de l'hydrogène, d'acceptation du public ou de bilan environnemental global sont ainsi traitées et doivent être prises en compte, en particulier par les collectivités à l'heure du choix.
Tous ces travaux sont menés en lien avec le PEPR, conçu et soutenu par l'Etat pour adresser ces grandes questions et relever ces défis industriels dont le pays a besoin pour des applications à court et moyen termes dans son économie.

Quel message souhaiteriez-vous faire passer en priorité aux chercheurs ?

Tout chercheur sait qu'il peut changer l'avenir de nos sociétés. Il y a en l'occurrence, sur l'hydrogène, une forte attente de cette communauté pour accélérer la transition climatique et énergétique en cours dont nous avons impérativement besoin au regard du dérèglement que nous constatons tous. Au-delà de la question essentielle de la survie de la planète existe aussi un enjeu de réindustrialisation et de compétitivité. La décarbonation doit permettre de créer des emplois, en maintenant sur notre sol un certain nombre d'activités et en en rapatriant d'autres grâce à l'hydrogène et aux autres moyens de décarbonation.
Les chercheurs ont l'occasion d'avoir un impact majeur à court et moyen termes sur l'économie et l'environnement. Leurs travaux sont indispensables pour rendre soutenable et pour accélérer la transition énergétique de notre pays et la protection du climat.
Les chercheurs sont aussi le fer de lance des entreprises écotechnologiques et industrielles françaises à l'export, qui doivent offrir des solutions notamment de décarbonation qui sont compétitives et qui répondent au besoin. Nous attendons beaucoup d'eux !

PEPR et H2DEC : une interaction et une complémentarité fortes

Abdelilah SLAOUI

Responsable de la Cellule Energie du CNRS et Directeur adjoint scientifique de CNRS Ingénierie & Coordinateur scientifique du PEPR Hydrogène pour le CNRS

Quels champs de recherche couvre le PEPR ? Quelles sont ses missions et ses priorités stratégiques ?

Le PEPR représente le pilier « Recherche, Développement et Innovation » de la Stratégie Nationale d'Accélération (SNA) sur l'hydrogène décarboné. A ce titre, en dépit d'un budget de seulement 83,5 millions d'euros sur 8 ans, comparé aux 9,1 milliards de la SNA, ce programme permet de fédérer plus de 30 équipes de recherche appartenant à des unités de plusieurs organismes de recherche du pays et engage la formation d'une centaine de doctorants et de 80 post-doctorants dans le domaine de l'hydrogène.
Sa mission principale part donc de la recherche **fondamentale pour aller jusqu'aux premiers démonstrateurs avec, comme objectif principal, de soutenir la filière dans l'ensemble de ses activités stratégiques avec une vision de transférabilité des recherches à court et moyen termes vers les acteurs économiques**. Le but final, à plus long terme, est de constituer une nouvelle industrie dans la filière hydrogène. Le programme se matérialise sous la forme de trois grands axes de R&D.
Le premier concerne la production d'hydrogène bas carbone par différentes techniques : électrolyse PEM, haute température ou AEM, photoélectrocatalyse. Le deuxième axe est sa conversion et son usage via la combustion - pour des applications plutôt industrielles - et les piles à combustibles, privilégiées pour le volet « mobilité-transport ». Enfin, il peut s'avérer nécessaire de stocker cet hydrogène avant de l'utiliser. Certains projets du programme étudient les possibilités de stockage sous formes liquide, solide ou gazeuse, qui va de pair avec le besoin de le transporter en toute sécurité.
En complément de ces travaux purement R&D, il est question de comprendre les conséquences à la fois sociales, techniques et économiques du déploiement massif de l'hydrogène pour les intégrer dans l'ensemble de la réflexion.
Pratiquement, le programme est composé de 18 projets couvrant l'ensemble des axes cités ci-dessus. Le programme comprend également un projet Equipex qui a permis de disposer d'un arsenal d'équipements afin de permettre d'effectuer des tests les plus sophistiqués possible à grande échelle, semi-industrielle, que ce soit par exemple sur les électrolyseurs ou les piles à combustible.

Quels messages particuliers souhaitez-vous faire passer ?

Concernant l'hydrogène en tant que tel, l'aspect « démystification » me semble très important. Beaucoup de contre-vérités sont en effet proférées, que ce soit pour l'exalter comme solution miracle ou au contraire le dénigrer. Il convient de lui donner la place qu'il mérite comme vecteur d'énergie. Ni plus, ni moins.
Je souhaite aussi insister sur le fait que le **PEPR s'inscrit dans un écosystème beaucoup plus large, dont fait partie également le programme de prématuration-**

maturation H2DEC. Nous travaillons en direct avec d'autres programmes de recherche France 2030 complémentaires au nôtre, comme ceux sur la décarbonation de l'industrie, les batteries ou les systèmes énergétiques. Sans oublier bien sûr l'Europe qui possède également ses propres programmes auxquels nous participons et sur lesquels nous nous efforçons de peser.

Comment collaborez-vous avec le programme H2DEC et en quoi êtes-vous complémentaires ?

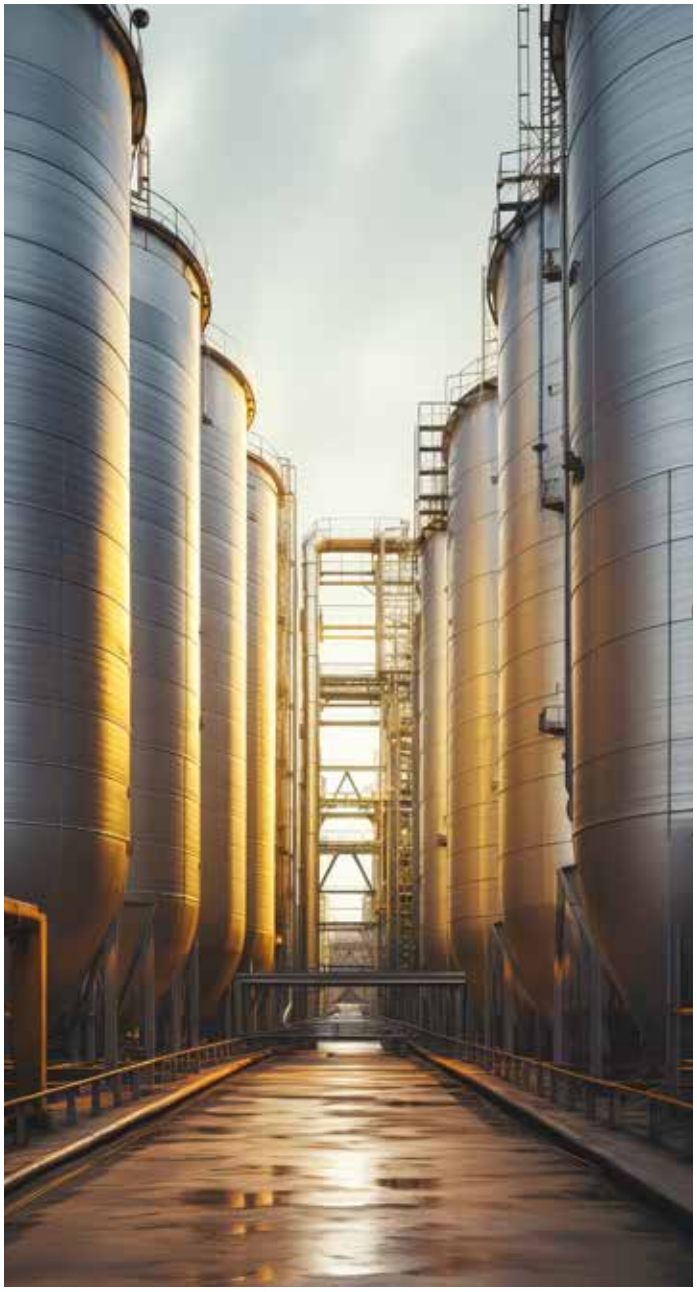
H2DEC constitue le pilier de la SNA chargé de prendre le relais du PEPR, aux missions purement R&D, sur la partie prématuration et maturation. Je participe au comité de direction en tant que représentant du PEPR et nous serons donc en interaction forte avec ce programme.
L'une de ses particularités à relever - car elle n'est pas générale à toutes les SNA - est qu'un projet de prématuration-maturation doit préalablement avoir reçu l'accord et le financement de l'organisme dont dépend le porteur avant d'être examiné par le comité H2DEC pour un abondement et donc éventuellement un financement complémentaire.

Quels sont les atouts des laboratoires et de l'écosystème français de la recherche ?

Les activités de recherche sur l'hydrogène en France ne datent pas d'hier. Elles remontent au moins à une cinquantaine d'années. Aussi, même si les financements ont connu des hauts et des bas, **le pays bénéficie d'une expertise de très haut niveau qui le place sans conteste parmi les principaux leaders internationaux.** L'ANR - Agence nationale de la recherche - a toujours supporté les recherches dans ce domaine et lui a permis de garder cette place de premier plan.

Qu'attendez-vous des chercheurs ?

J'attends d'eux qu'ils profitent de la synergie générée dans les consortia des 19 projets pour relever les défis sur toute la chaîne de valeur de la filière hydrogène en proposant des solutions technologiques viables et durables qui tiennent compte des aspects sociétaux, économiques et environnementaux. Sans oublier, bien sûr, de valoriser leurs travaux par le biais de publications scientifiques de très haut niveau permettant d'augmenter les connaissances, mais également, chaque fois que c'est possible, de déposer des brevets, de lancer des startups et/ou d'accompagner les entreprises du secteur – tout cela pour le bénéfice de l'économie du pays et de la décarbonation de l'industrie et du transport.
Pour résumer : qu'ils soient les meilleurs dans leurs domaines respectifs !



Le monde français de la recherche se mobilise au service de la stratégie nationale sur l'hydrogène

Hélène BURLET

Coordinatrice du PEPR consacré à l'hydrogène au CEA, en copilotage avec le CNRS

Quel rôle le CEA joue-t-il dans le consortium H2DEC ?

Un rôle particulier. Alors que l'État souhaitait n'avoir qu'un seul projet prématuration/maturation par stratégie, deux ont été déposés dans la SNA hydrogène suite à l'Appel à Projet. Le premier était porté entièrement par la SATT Sayens, et le second par la SATT Linksium en chef de file maturation et le CEA pour la prématuration. Il nous a donc été demandé de nous rapprocher pour n'en présenter qu'un seul, commun, ce qui a demandé un peu de temps car les deux incluaient quelques différences notables. Au terme de nos travaux, Sayens a été désignée chef de file prématuration et Linksium maturation.
Le CEA étant déjà fortement impliqué dans le PEPR en tant qu'établissement responsable, il s'est mis en retrait mais occupe néanmoins de facto un rôle important. C'est en effet son représentant au comité de pilotage de H2DEC, fonction que j'ai l'honneur d'occuper en tant que codirecteur scientifique CEA du PEPR H2, qui en assure la présidence. J'ai donc une double casquette, présidente du comité et représentante du CEA, cette dernière seule me donnant un droit de vote au terme des délibérations. Le CEA copréside également, au côté de Linksium et Sayens, le comité d'engagement et de suivi qui décide des abondements aux différents projets.

Pouvez-vous nous décrire les axes de recherche et les priorités du CEA sur l'hydrogène décarboné ?

Le CEA travaille sur toute la chaîne de valeur de l'hydrogène, mais a défini depuis plusieurs années des axes prioritaires qui se retrouvent dans la feuille de route de la SNA Hydrogène décarboné publiée en septembre 2020. La priorité a été mise sur la production et la conversion. Avant de pouvoir consommer l'hydrogène, il faut être capable de le produire de façon propre, c'est-à-dire en utilisant une source d'énergie décarbonée. La France a fait le choix d'une production nationale d'hydrogène pour des raisons de souveraineté. Il faut donc disposer et déployer des technologies de production massive d'hydrogène décarboné. Les technologies matures ou à l'état de démonstrateur qui répondent à ce besoin reposent sur l'électrolyse de l'eau.
Dans ce cadre, le CEA a choisi de mettre l'accent, via d'importants moyens, sur la technologie dite « hautes températures », entre 700 et 800 degrés.
Le premier intérêt de cette technologie est son recours à des membranes céramiques et à des catalyseurs à base nickel, nettement moins chers et moins critiques que les membranes polymères et catalyseurs à base de platinoïdes utilisés dans les technologies dites « basses températures ». Autres avantages, les rendements sont meilleurs - en moyenne 20 points de plus que pour les basses températures - et le

système est réversible : partant d'eau sous forme de vapeur et pas de liquide, le système gaz / gaz peut être inversé par simple basculement du mode électrolyse au mode pile à combustible. En revanche, elle est nettement moins mature que les technologies PEM - Proton Exchange Membrane - d'électrolyse à basse température – 80 degrés – qui sont déjà commercialisées… mais nécessitent platine et iridium. Jusqu'à récemment, il n'y avait pas d'acteurs français positionnés sur la technologie « hautes températures » - en Europe, seul l'allemand SUNFIRE la développait. Le CEA a décidé de créer en 2022 avec Schlumberger la joint-venture GENVIA pour pallier ce manque.

Seconde priorité : la pile à combustible de type PEM pour la mobilité lourde – camions, bateaux, trains… -, segment qui nous paraissait plus intéressant et cohérent économiquement et écologiquement parlant que celui de la mobilité légère. Là aussi, les défis à relever sont nombreux : la durabilité bien sûr, mais aussi la nécessité de diminuer la quantité de platine requise pour obtenir les rendements souhaités à un coût maîtrisé. Avec toutes les problématiques de recyclage du platine en particulier qu'il faut anticiper dès la conception des stacks…

En complément de ces deux grandes priorités, figure la question du stockage de l'hydrogène. Après avoir notamment travaillé sur des solutions solides et gazeuses, nous mettons désormais l'accent sur les LOHC - Liquid Organic Hydrogen Carriers. L'hydrogène est fixé dans un milieu liquide et restitué au moment de son utilisation, les deux processus par réaction chimique, ce qui permet un stockage à la fois conséquent en volume et durable. Les solutions qui existent actuellement sur le marché reposant sur des liquides très corrosifs, avec tout ce que cela implique sur le plan environnemental, nos travaux visent à éviter cet écueil.

Sur la question du transport de l'hydrogène, nous collaborons avec GRTgaz au sein d'un laboratoire commun sur l'étude de la fragilisation par l'hydrogène des matériaux, en particulier les métaux de canalisations. Les atomes d'hydrogène étant tout petits, ils ont en effet tendance à pénétrer dans certains aciers, générant une réaction chimique qui fragilise le matériau pouvant entraîner des ruptures sous l'effet d'un choc. Ce qui peut s'avérer dangereux dans le cas d'un gazoduc… Nous cherchons donc à comprendre le mécanisme à l'origine de cette fragilisation et à déterminer les matériaux les plus résistants, dans le but notamment d'évaluer dans quelle mesure il est possible de réutiliser les pipelines construits pour du gaz naturel pour le transport de l'hydrogène, quitte à les reconditionner par un traitement adapté.

Si tous ces sujets concernent les composants, nous essayons aussi de raisonner au niveau des systèmes. Par exemple, comment intégrer et utiliser de façon optimale une pile à combustible hybridée avec une batterie dans un camion. Nous mettons également en œuvre beaucoup de modélisation, depuis le choix, voire la conception, des matériaux jusqu'à la prévision de la performance d'un stack sollicité dans des conditions d'usage précis, via la simulation numérique.

Enfin, nous travaillons sur la thématique du couplage entre source électrique et électrolyseur. Pour être rentable, un électrolyseur doit fonctionner de façon quasi continue. S'il est alimenté par une source d'énergie renouvelable, comme le solaire photovoltaïque ou des éoliennes, le problème de l'intermittence se pose. Il faut alors concevoir un système qui permette de stocker l'énergie en cas de surplus de production, et la restituer dans les périodes sans ou en défaut de production. Le CEA étudie plusieurs systèmes de stockage répondant à cette problématique. Il travaille également sur le couplage entre électrolyseur et réacteur nucléaire. Il est en effet le seul organisme de recherche français à avoir l'expertise nécessaire pour pouvoir étudier ce couplage direct - c'est-à-dire sans passer par le réseau -, et ce plus particulièrement dans le cas des nouveaux petits réacteurs SMR. L'idée ici est de concevoir des SMR multifonctionnels, pouvant fournir électricité, chaleur et hydrogène en fonction des besoins des utilisateurs finaux.

Avez-vous des success stories de start-ups à partager ?

J'en citerais deux. La plus ancienne, SYLFEN, créée en 2015, repose sur la technologie hautes températures adaptée à des petites puissances. Elle a développé un hub qui fonctionne de façon totalement réversible. Le produit se présente sous la forme d'un conteneur fermé qui contient un électrolyseur réversible et un système de stockage. Il peut être installé dans un

parking de site industriel, une résidence hôtelière ou encore un hôpital. Le hub permet, en cas d'excédent d'électricité par rapport aux besoins du site, de la transformer en hydrogène. A contrario, lorsqu'il en manque, il est possible de basculer en mode pile à combustible pouvant fournir électricité et chaleur. Dans ce mode, le hub peut aussi être alimenté en gaz naturel.
Plus récente, INOCEL se positionne sur le marché des piles à combustible grâce à une technologie CEA couronnée de succès puisque cette start-up a été sélectionnée dans la première promotion du programme French Tech 2030. Alors qu'elle a été créée en mai 2022, elle comptait déjà 80 collaborateurs fin 2023 répartis entre le centre de R&D et la ligne pilote situés à côté de Grenoble, et annonce d'ores et déjà la mise en place d'une gigafab près de Belfort. Cette pile est destinée à la mobilité lourde et au stationnaire en recherchant l'alliance de fortes puissances et durabilité.

Quels sont les partenariats que vous avez d'ores et déjà mis en place avec la filière ?

En dehors de GENVIA, que j'ai déjà évoqué et qui concerne les hautes températures, citons, sur la mobilité et les piles PEM, le partenariat avec INOCEL et un autre avec SYMBIO, auprès de qui nous avons aussi réalisé un transfert technologique. Enfin, le partenariat avec GRTgaz est plus que symbolique puisque nous travaillons avec eux non seulement sur les problèmes de fragilisation des matériaux, mais aussi sur le « power-to-gas » qui permet de produire des gaz de synthèse à partir d'hydrogène et de CO_2. On aborde ainsi ici le nouveau domaine de recherche des e-fuels.

L'hydrogène sort de nos laboratoires, réputés pour leur excellence, pour être déployé massivement

Philippe BOUCLY

Président de France Hydrogène

Pouvez-vous nous présenter France Hydrogène et ses actions ?

France Hydrogène est l'association qui réunit l'ensemble des acteurs de l'hydrogène dans l'Hexagone. Elle jouit de la superbe dynamique qui emporte à la fois notre pays, mais aussi l'Europe et le monde en général. Nous comptons en effet 460 adhérents, contre 120 en 2019. Parmi eux, plus d'une centaine de grands groupes, mais aussi plus de 200 PME/PMI et start-ups, tous les laboratoires français qui travaillent sur le sujet et de nombreuses collectivités territoriales. Parmi celles-ci figurent toutes les Régions de France, toutes dotées d'une stratégie hydrogène ou d'une feuille de route qui s'accompagne de budgets alloués souvent conséquents, ce qui s'avère d'autant plus important que c'est en leur sein que se développent la plupart des projets.
La Bourgogne Franche-Comté, l'Occitanie, Auvergne Rhône-Alpes, la région Sud, la Normandie ou encore les Pays de la Loire se montrent ainsi particulièrement dynamiques. Nous avons donc créé dans chaque région une délégation régionale avec un délégué France Hydrogène entouré d'adjoints afin d'y animer la communauté.
Au siège parisien, l'équipe permanente s'est aussi considérablement étoffée : lorsque j'ai intégré l'association en 2013, il n'y avait qu'une assistante alors que nous comptons à présent une vingtaine de salariés répartis sur quatre pôles. Le premier, consacré à l'expertise, rassemble une base de connaissances sur les projets en développement en France et dans le monde, et sur les technologies, en permanente évolution.
Les trois autres en découlent puisque c'est sur cette base que sont menées à la fois des actions de communication, de lobbying et de développement vers l'international. **La France étant reconnue pour sa stratégie hydrogène à la fois cohérente et performante, de nombreux pays nous approchent en effet pour signer des accords de partenariat qu'il convient ensuite de faire vivre en leur donnant de la substance.**
Nous sommes par ailleurs membre du Conseil National de l'Hydrogène, dont nous participons au secrétariat, d'Hydrogen Europe, et cofondateurs de la Task Force Hydrogène avec le MEDEF International.
Les « position papers » de l'association sont élaborés au travers de groupes de travail. L'un d'eux, très actif, est consacré à la « mobilité ». Un autre, « relations institutionnelles », examine les projets de lois et fait des propositions pour aider à promouvoir l'hydrogène dans les différents secteurs. Un troisième, « International », structure les différentes actions entreprises avec l'étranger. Le groupe de travail consacré à la réglementation est destiné à faire évoluer les textes réglementaires, ce qui s'avère d'autant plus important que l'hydrogène acquiert progressivement un rôle de vecteur énergétique.

Key opinion leader industriel

Quelles sont les priorités stratégiques actuelles en matière d'hydrogène décarboné ?

Nous avons répertorié l'an dernier tous les projets actuellement en gestation en France chez les différents porteurs de projets. Ils se montent à plus de 250, signe du dynamisme de la filière. Néanmoins, lorsque nous les interrogeons sur les décisions finales d'investissements, il n'en existe quasiment aucune, la raison avancée étant l'absence de visibilité… La priorité stratégique consiste donc à apporter cette visibilité à la filière, et cela dans deux domaines.
Le premier concerne le réglementaire et le législatif. Nous participons par exemple aux réflexions de la Commission de Régulation de l'Energie sur le futur statut des réseaux. Il y a également beaucoup à faire dans le domaine maritime et fluvial. Et au niveau mondial, il convient de fixer un cadre commun en œuvrant à la normalisation et à la certification : l'hydrogène qui sera produit à l'autre bout du monde doit l'être dans les mêmes conditions qu'en Europe, en particulier en matière de rejet de CO_2.
Le second domaine est économique. Quand l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau, la composante majeure du coût est le prix de l'électricité. Nous travaillons donc sur les conditions dans lesquelles les porteurs de projets vont pouvoir y accéder : quel type de contrat, sur quelle durée, à quelles conditions, avec quelle électricité renouvelable ou bas carbone… Tout cela pour aboutir à un prix de revient le plus bas possible. Nous visons un coût entre 50 et 60 euros du MWh, ce qui semble accessible et s'avère nécessaire à la filière pour être compétitive.

Quels sont les principaux besoins de vos membres ?

Ils sont en demande non seulement de visibilité, mais aussi de décryptage - notamment en matière de cadre normatif et législatif - et de partage de connaissances.
Ils attendent aussi de nous que nous défendions une vision forte de la filière et que nous créions un véritable réseau. Le nombre de nos adhérents ayant beaucoup augmenté, ils ne se connaissent pas et l'une de nos tâches les plus importantes est de faire en sorte d'y remédier. Nous organisons notamment des webinaires d'une heure durant lesquels chacun peut prendre la parole lors de pitchs de cinq minutes. A raison de 460 membres, et même si tous ne souhaitent pas parler, je vous laisse imaginer le nombre de webinaires à organiser… Mais il est primordial de le faire pour coordonner les actions et encourager les synergies et collaborations qui permettront de monter des projets et d'accélérer.
Enfin, nous avons aussi une forte demande qui concerne l'accès aux financements. Il est souvent difficile de s'y retrouver entre les différents guichets régionaux, nationaux et européens, et nous les guidons.

Comment voyez-vous le rôle des start-ups dans la course actuelle et quelle place occupent-elles dans France Hydrogène ?

Environ 10% de nos membres, soit une cinquantaine, sont des start-ups. **Elles jouent un rôle de pionnier dans l'exploration de solutions et se caractérisent par leur agilité et leur créativité. Les grands groupes ne s'y trompent d'ailleurs pas.**
Certains y investissent : c'est le cas de Bouygues avec PowiDian, Saint-Gobain et Eiffage avec Gen-Hy, Air Liquide, Toyota et TotalEnergies avec les taxis parisiens HysetCo, ou encore Forvia, Michelin et Stellantis avec Symbio. Ils peuvent également racheter purement et simplement la start-up. Enfin, beaucoup, comme Air Liquide, Engie ou GRTgaz, possèdent des incubateurs. Leur rôle consiste donc à éclairer le chemin en produisant des idées et des procédés nouveaux.
J'ajouterais néanmoins un bémol.
En comparaison avec d'autres pays, la France souffre en effet de la difficulté à passer de la start-up à l'industrialisation. En dépit des exemples que je viens de donner, il existe une réticence de certains grands groupes à monter à leur capital. Mais ils ne sont pas les seuls responsables : comme l'a fort justement pointé un rapport de l'association GreenTech For France, les fonds de capital-risque français pourraient faire beaucoup mieux pour soutenir les start-ups. C'est d'autant plus dommage que notre pays fait preuve d'une grande inventivité, dans l'hydrogène comme ailleurs…

Quels sont, à votre sens, les atouts des laboratoires et de l'écosystème français de la recherche ?

Nos laboratoires sont mondialement reconnus pour leur excellence. Elle se traduit par les brevets qu'ils déposent, avec une forte prépondérance de la recherche publique hexagonale, notamment sur les technologies de l'hydrogène et l'acier bas carbone. Notre pays se situe ainsi au quatrième rang mondial et dépose 14% des brevets de la recherche publique mondiale.
Il existe de surcroît, dans le cadre du CNRS, une fédération de recherche sur l'hydrogène qui permet aux différents laboratoires de travailler en réseau, ce qui accroît encore leur efficacité.

Qu'attendez-vous des chercheurs de ces laboratoires ?

Actuellement, l'hydrogène sort des laboratoires pour être déployé alors qu'il y a encore moins de dix ans, lorsque nous en parlions, on nous rétorquait que rien n'avançait et qu'il était de surcroît cher et dangereux, en se référant à la fameuse catastrophe du zeppelin Hindenburg qui a eu lieu en… 1937 ! On nous demandait donc de retourner à nos chères études et de revenir quand nous serions prêts…
C'était bien mal connaître le travail des chercheurs ! S'il était effectivement cher par exemple, c'était précisément parce qu'il restait relativement confidentiel, avec une production quasi-artisanale et très limitée. Le fait de commencer à le déployer enclenche une boucle vertueuse car cela engendre à son tour un besoin de recherche afin d'améliorer les procédés.
Alors que **la filière s'est engagée sur la voie de la massification de la production avec le soutien du gouvernement, il reste en effet beaucoup de domaines dans lesquels il est nécessaire d'approfondir les connaissances.**
C'est le cas notamment de la durabilité qui englobe la durée de vie des piles à combustible, celle des stacks des électrolyseurs ou l'évolution du platine utilisé comme catalyseur. Il convient également d'augmenter la fiabilité des électrolyseurs, un débat actuel questionnant celle des électrolyseurs chinois, en apparence moins chers.
Il faut aussi accroître l'efficacité, par exemple en matière de procédé de liquéfaction de l'hydrogène pour son transport ou encore de réduction du recours aux platinoïdes ou leur recyclage. La recherche d'alternatives aux PFAS – les substances per- ou polyfluoralkylées, également appelées « polluants éternels » -, utilisées pour les membranes des piles à combustible et dont la suppression à terme est discutée, est également importante.
Ce ne sont que quelques sujets parmi tant d'autres mais qui permettent de se rendre compte qu'il reste encore beaucoup à faire !

Dans l'hydrogène, les start-ups d'aujourd'hui deviendront les groupes industriels de demain

Pierre-Germain MARLIER

Directeur des investissements - Hy24

En quoi consiste votre activité ?

Hy24 est une société d'investissement qui gère à ce jour un fonds d'infrastructure. Notre société se consacre entièrement au développement de l'économie mondiale de l'hydrogène en investissant sur l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène décarboné. A travers ce premier fonds, « le Clean Hydrogen Infrastructure Fund » clos à deux milliards d'euros en octobre 2022, nous contribuons à porter à l'échelle les projets d'hydrogène les plus prometteurs en Europe, Asie Pacifique, dans les Amériques et dans la région MENA. Hy24 joue aujourd'hui un rôle de catalyseur au sein de l'écosystème hydrogène. Le marché de l'hydrogène présente aujourd'hui certaines particularités étant donné le niveau actuel de développement des projets en France et dans le monde. Les projets hydrogène sont développés par des start-ups ou des PME et lorsqu'ils arrivent à maturité, ceux-ci nécessitent des financements importants. C'est théoriquement à ce stade que nous devrions intervenir. Dans la pratique, nous sommes amenés à assumer un rôle qui ne consiste pas simplement à attendre que les projets soient à maturité et en recherche de financements. Nous avons en effet souhaité être moteur dans le développement des technologies de l'hydrogène au sens large : la mobilité, la production, les carburants de synthèse… Nous investissons par conséquent, dès l'amont, dans des entreprises qui développent ces projets en leur apportant une première base de capital afin de leur permettre de les mener à maturité, stade auquel nous continuons ensuite de les suivre. **L'hydrogène est présent dans chacun de nos projets, ceux-ci recouvrent un panel extrêmement vaste et diversifié de secteurs.**

Pouvez-vous nous donner des exemples ?

Nous investissons dans des sociétés de développement qui possèdent parfois des actifs dans l'Hexagone, comme le développeur de projets allemand Hy2Gen, spécialisé dans la construction d'installations de production de carburants verts à base d'hydrogène – les fameux « e-carburants » – destinés au transport maritime, terrestre et aéronautique, ainsi qu'à d'autres applications industrielles. Je pourrais également citer l'opérateur danois Everfuel, qui travaille dans le développement accéléré des capacités d'électrolyse des pays nordiques, H2 Mobility, l'opérateur du plus grand réseau européen de stations d'hydrogène, Enagás Renovable, agrégateur des grands projets espagnols d'hydrogène vert, le suédois H2 Green Steel, qui œuvre dans l'acier vert, étape majeure vers la décarbonation de l'industrie sidérurgique, le singapourien InterContinental Energy, également dans le domaine

des carburants verts, ou encore, tout récemment, un partenariat avec Masdar, basé aux Emirats Arabes Unis et qui se trouve derrière de grands projets d'infrastructure d'hydrogène vert. Parmi tous ceux-ci figure un français, Elyse Energy, qui développe des projets d'e-méthanol et de carburants aéronautiques durables en France et en Espagne.

Pourquoi avoir choisi l'hydrogène ?

Plus qu'une place, il y avait surtout un rôle à prendre sur ce marché pour contribuer à le porter à l'échelle. S'il existe en effet une réelle appétence actuellement pour ce type de capital, ce qui nous motive avant tout chez Hy24, c'est notre conviction que **l'hydrogène a un rôle central à jouer dans la transition énergétique pour servir les objectifs de décarbonation des industries lourdes les plus émettrices.**
D'après l'Agence internationale de l'énergie, l'hydrogène représentera 15% de la demande finale en énergie d'ici 2050. L'atteinte de nos objectifs de décarbonation sera permise à la fois grâce à une réduction de la consommation et un passage à une électrification directe ou indirecte, en fonction des applications visées. Nous regardons ainsi où cela a du sens – ou pas - d'introduire de l'hydrogène.
Pour cela, nous suivons tout simplement ce que nous dit la science. Or, pour prendre l'exemple de la mobilité, elle indique clairement que si nous voulons réduire significativement les émissions, nous devons passer d'un système global basé sur la combustion à un autre fondé sur l'électrique.
Ce qui revient à supprimer les émissions situées au niveau des pots d'échappement au profit de celles issues de la production d'électricité, plus centralisée et plus simple à décarboner.
Il convient alors de choisir la solution convenant le mieux au profil opérationnel des véhicules concernés : si les batteries conviennent aux trajets journaliers en voiture, les camions ont besoin de puissance, les trains d'autonomie, et les taxis et poids lourds d'une disponibilité énergétique permanente. Autant d'applications sur lesquelles l'hydrogène s'applique parfaitement !

Comment sont arbitrés vos choix d'investissements d'avenir ?

Un fonds d'investissement obéit à une logique. Une fois notre choix fait, nous allons investir sur les trois ou quatre prochaines années et nous aurons ensuite vocation à garder ces projets dans notre portefeuille entre sept et douze ans. Aussi, lorsque nous étudions une opportunité d'investissement, la première question que nous nous posons est d'essayer d'évaluer la valeur de l'investissement au-delà de cet horizon et pourquoi. Nous sommes forcés d'exercer un mandat à long terme si nous voulons connaître le succès, notre valeur de sortie correspondant à celle qu'un acquéreur verra dans nos sociétés en portefeuille pour dix ou quinze ans après notre sortie. Il convient donc de se demander si le projet comprend un avantage stratégique qu'il conservera sur le long terme, qu'il s'agisse de la proximité avec des sources d'électricité décarbonées et compétitives, avec un client, avec des canaux de distribution comme des ports ou des pipelines…
Un autre critère déterminant concerne par ailleurs les émissions de CO_2 abattues par euro investi.

Recommanderiez-vous l'investissement dans ce domaine ?

Bien sûr, surtout actuellement pour les acteurs du Private Equity !
Nous commençons en effet à voir émerger des projets matures qui parviennent à lever des fonds (dette) auprès des banques. Aussi, pour ces acteurs et pour les petites sociétés de développement dont nous avons parlé, il y a un rôle à jouer dès maintenant pour lancer le marché en investissant dans la phase de développement. Car une fois la maturité atteinte, les grosses entreprises industrielles participeront à grande échelle. Il existe des positions stratégiques à sécuriser à des endroits clés, près des ports, des ressources renouvelables ou des clients par exemple. Mais il convient également de bouger vite car le rôle de **l'hydrogène dans la transition énergétique est indéniable : il existe des applications pour lesquelles il sera impossible de s'en passer !**
Les start-ups d'aujourd'hui deviendront les groupes industriels de demain.

Le transfert de technologies : une formidable occasion de participer à changer le monde

Daniel HISSEL

Directeur-adjoint de la Fédération Hydrogène du CNRS & Professeur et vice-président en charge de l'innovation à l'Université de Franche-Comté

En quoi vos travaux préfigurent-ils l'avenir de l'hydrogène décarboné ?

Nous travaillons avec mon équipe sur l'intégration de l'objet hydrogène dans des applications qui touchent à la fois la mobilité, légère ou lourde, et le stationnaire via la production d'énergie électrique et thermique. Dans ce contexte de recherche mais aussi de partenariat et de transfert industriel, notre objectif est que l'hydrogène occupe toute la place susceptible de lui être confiée dans le cadre du futur énergétique. Ses multiples possibilités d'applications nous intéressent tout particulièrement.
Nous travaillons ainsi sur **l'augmentation des performances des systèmes hydrogène au sens très large du rendement et de l'efficacité, mais aussi de l'efficience énergétique** : nous nous penchons sur l'objet dans sa globalité, l'origine des matériaux qui le constituent, l'analyse de l'ensemble de son cycle de vie… Nous travaillons aussi sur la durabilité de ces objets hydrogène, dans leur contexte d'application. Nous développons ainsi notamment des algorithmes de diagnostics de l'état de santé et de pronostics de durée de vie pour qu'il puisse perdurer le plus longtemps possible dans son environnement réel avec des performances optimales. Ces deux axes concourent à une baisse des coûts d'usage et d'exploitation.

Avez-vous une expérience des transferts de technologies ?

Oui. Avec quelques collègues, nous avons en effet fondé en 2017 une entreprise qui s'appelle H2SYS, pour « Hydrogen to Systems », parcourant à cette occasion l'ensemble de la chaîne prématuration-maturation avec le soutien de la Région Bourgogne Franche-Comté et de la SATT Sayens.
Implantée à Belfort, H2SYS, qui compte aujourd'hui 25 salariés, produit des groupes électrogènes hydrogène de moyennes et fortes puissances, ainsi que des outils didactiques et pédagogiques autour de l'hydrogène.

Qu'en retenez-vous ?

J'ai vécu cela comme une formidable expérience. Si elle nécessite du temps, la démarche est extrêmement différente de ce que nous faisons au quotidien en tant que chercheurs. Ce qui suppose d'avoir à ses côtés des collègues, devenus de facto des associés, tout aussi motivés que vous par l'enjeu et prêts à se mobiliser au moment adéquat autour du porteur de projet pour l'accompagner au mieux.

Quel est le bénéfice de travailler dans le cadre et sur les priorités définies par la SNA sur l'hydrogène décarboné ?

Mon équipe est très impliquée dans les actions de recherche entreprises autour de la SNA. Nous travaillons en effet sur l'efficience énergétique et la durabilité en vue de réduire les coûts, la finalité étant de répercuter ces baisses sur le marché. Nous sommes donc complètement en phase avec la SNA. **Ainsi, dans le domaine de la production d'hydrogène décarboné, nous avons de nombreuses actions en cours sur la durée de vie et les performances des électrolyseurs.**
Nous en avons aussi sur les usages par nos travaux sur l'efficience énergétique et la durabilité des piles à hydrogène dans des applications ciblées par la SNA, en particulier la mobilité lourde et la production dans des sites stationnaires, notamment les zones non-interconnectées comme les îles des DROM.
Si nous travaillons depuis de nombreuses années tant avec des chercheurs que des industriels, œuvrer dans le cadre de la SNA crée une vraie différence en nous octroyant des financements, non seulement par notre participation à des projets ciblés, mais aussi à l'Equipex du PEPR qui nous donne accès à des moyens expérimentaux lourds supplémentaires.
Mon équipe figure en effet parmi les trois établissements financés dans ce cadre. Tout cela nous permet de rester au niveau de la concurrence internationale !

Qu'est-ce qui motive les chercheurs à faire du transfert de technologies ?

Cette question m'intéresse d'autant plus que je suis également vice-président de mon Université en charge de l'innovation, le transfert de technologies entrant bien évidemment dans ce périmètre.
Or, ce sujet est extrêmement complexe. L'intérêt collectif est bien sûr évident. Cela crée des entreprises et de l'emploi en France et nos travaux servent la société en général : en décarbonant l'industrie et les transports, nous avons la formidable occasion de participer à changer le monde !
Malheureusement, les sources de motivations individuelles des chercheurs et des enseignants-chercheurs restent encore insuffisantes en France car le transfert n'est pas réellement pris en compte dans leurs carrières.
S'ils se mobilisent et créent une entreprise, voire en prennent la tête, cela crée un trou dans leur CV, au risque de finir par constituer plus un handicap qu'une aide... Il y a donc une vraie réflexion à mener, qui dépasse largement le seul périmètre de l'hydrogène. Il faut impérativement que ces démarches soient valorisées au sein des carrières individuelles ! Il existe un vrai fossé entre ce qui se passe en France et dans d'autres pays où nos confrères sont beaucoup plus valorisés par de telles initiatives.
Le problème n'est pas que les chercheurs français ne veuillent pas se mobiliser : les outils existent mais pas les retours individuels, et c'est un moteur de motivation également important.

Selon vous, en quoi est-ce impactant d'orienter ses travaux vers H2DEC ?

Que ce soit en prématuration ou en maturation, l'intérêt est aujourd'hui de combler ce que l'on ne sait pas faire au sein des laboratoires et des établissements grâce à l'aide de professionnels qui vont apporter les outils et les moyens pour les aider à aller vers le marché et le transfert, et valoriser ainsi leurs meilleures innovations.
En l'occurrence, nous disposons d'un système qui est très bien structuré en France. Amis et collègues chercheurs, profitez-en !

Nous, chercheurs, avons un rôle social à jouer

Vincent MAISONNEUVE

Professeur des Universités à l'Institut des Molécules et Matériaux du Mans (IMMM) à Le Mans Université

En quoi vos travaux préfigurent-ils l'avenir de l'hydrogène décarboné ?

Vincent Maisonneuve (VM) – Depuis sa création en 1966, contemporaine de la construction de notre université, l'IMMM conçoit de nouveaux matériaux en étudiant l'organisation intime des atomes dans le but d'obtenir des propriétés et des fonctionnalités adaptées aux applications ciblées. Le fluor est l'élément au cœur de nos activités de recherche en chimie du solide. Dans ce contexte, nous avons découvert un matériau qui allie avec succès l'oxygène et le fluor avec des propriétés hors normes améliorant de façon significative le rendement énergétique des électrolyseurs, ce qui constitue l'un des grands défis en matière de production d'hydrogène.

Samuel Mathiot (SM) – Les électrolyseurs industriels actuels, qui travaillent en milieu basique et à des températures légèrement plus élevées que l'ambiante, présentent en effet habituellement un rendement énergétique autour de 50 à 60% ; notre matériau oxyfluoré, apposé au niveau de l'anode, améliore nettement ce dernier. Nous nous situons donc dans de l'innovation incrémentale et non de rupture, l'électrolyse de l'eau ayant fait l'objet de beaucoup de recherches antérieures, notamment sur la géométrie des électrodes. Nos travaux devraient donc permettre de réduire les coûts et l'énergie nécessaires à la production de l'hydrogène.

Samuel MATHIOT

Ingénieur de recherche à l'Institut des Molécules et Matériaux du Mans (IMMM) à Le Mans Université

Avez-vous une expérience des transferts de technologies ?

VM – Notre projet est justement en phase de transfert avec une prématuration qui s'apprête à déboucher sur de la maturation. Un premier brevet, déposé pour l'Europe il y a deux ans, s'étend désormais aux USA, au Canada et à l'Australie. En soi, notre matériau est simple : il se compose de cobalt, de fer, d'oxygène et de fluor et peut être élaboré facilement en moins de deux heures grâce à une élaboration à température ambiante suivie d'un chauffage à 300 degrés.
Toute cette préparation se fait, de façon relativement

vertueuse, en milieu aqueux avec de l'éthanol. Mais elle a aussi recours à l'acide fluorhydrique, ce qui implique des conditions de sécurité particulières. Avant d'envisager d'aller plus loin dans son éventuelle industrialisation, il est nécessaire de développer une production du matériau oxyfluoré à plus grande échelle tout en conservant ses propriétés exceptionnelles et donc de rendre le processus de synthèse plus robuste. C'est dans cette optique que Samuel, jeune ingénieur spécialisé en électrochimie, a rejoint notre équipe de cinq chercheurs qui œuvre sur ce sujet.

SM – Le laboratoire opère en effet sur de petites quantités de matériau oxyfluoré, qui se situent entre 0 et 1 gramme. Or, nous souhaitons désormais passer à 100 grammes, puis bien au-delà ! Je travaille donc sur un projet R&D de prématuration visant un passage à terme à l'échelle industrielle en collaboration avec le pôle CNRS Innovation. Notre objectif étant sur le point d'être atteint, nous recherchons désormais un partenaire industriel afin de passer à la phase maturation via un développement à plus grande échelle qui permettra de consolider notre innovation. En parallèle à mon travail, deux thèses de doctorat sont en cours pour mieux comprendre l'origine des propriétés de notre matériau et proposer des améliorations futures. Les premiers résultats se révèlent d'ailleurs très encourageants avec des performances accrues associées à une durée de vie augmentée tout en réduisant significativement la quantité de cobalt, élément présent dans les batteries Li-ion actuelles qui pose un problème de disponibilité.

Quel est le bénéfice à travailler dans le cadre et sur les priorités définies par la SNA hydrogène décarboné ?

VM – Il m'est difficile de répondre à cette question puisque, pour le moment, nous travaillons uniquement avec la SATT Ouest Valorisation et n'avons encore pas eu de contact avec le consortium. En revanche, il est certain que nous cherchons à être connu et reconnu de l'ensemble des acteurs qui participent au développement de la filière hydrogène, qui vont du monde académique à celui de l'industrie. Ce qui est loin d'être simple…

SM - Plus que des fonds, nous recherchons actuellement des partenaires. La SATT, le CNRS, notamment via son entité Innovation, le PEPR ou encore la Fédération Hydrogène nous y aident. Mais nos contacts, notamment avec les industriels, restent encore à développer. Une telle initiative est donc la bienvenue !

A votre sens, qu'est-ce qui pousse les chercheurs à faire du transfert de technologies ?

VM – Avant tout, une motivation personnelle : le plaisir réel de participer à l'atteinte de ce bel objectif que constituent la transition énergétique et la neutralité carbone.

SM - Aujourd'hui, les chercheurs possèdent une vision à plus long terme de leurs travaux qui consistent à trouver des applications concrètes, même si l'échelle de temps entre la production académique et industrielle peut sembler longue. Les orienter vers l'hydrogène décarboné permet de participer à ce mouvement.

VM – Nous croyons à ce que nous faisons : nous ne sommes pas là pour faire des recherches dépourvues de débouchés ! Nous avons un rôle social à jouer. A ce titre, j'aime particulièrement le double sens du mot « valorisant » qui s'applique à la fois à l'échelle industrielle, mais aussi à une dimension plus personnelle…

Un atout majeur pour répondre aux enjeux climatiques et environnementaux

Stéphanie ROUALDÈS

Maître de conférences à la Faculté des Sciences de l'Université de Montpellier, rattachée à l'Institut Européen des Membranes (IEM)

En quoi vos travaux préfigurent-ils l'avenir de l'hydrogène décarboné ?

A l'IEM de Montpellier, nous sommes une vingtaine de chercheurs et enseignants-chercheurs à mener nos activités dans le domaine de l'hydrogène, de l'amont à l'aval de la filière. Nous couvrons ainsi à la fois les problématiques de sa production, son stockage, sa purification et sa conversion en pile à combustible au travers d'approches en synthèse, en caractérisation et en intégration des matériaux dans le but d'applications. Dans mon équipe plus spécifiquement, nous préparons par des techniques de synthèse douce, peu impactantes sur l'environnement, différentes natures de matériaux en films minces visant à constituer des couches actives – membranes, électrodes, photo-électrodes – au sein de cellules électrochimiques de production ou conversion d'hydrogène. Nous développons notamment, depuis le début des années 2000, des membranes électrolytes par voie plasma. Lesquelles, en tant que films conducteurs ioniques particulièrement minces et stables, pourraient avantageusement remplacer les électrolytes liquides ou le Nafion® solide dans les procédés d'électrolyse et les piles à combustible basse et moyenne températures.
En complément, nous préparons également depuis quelques années des photo-électrodes qui préfigurent le développement de photo-électrolyseurs pour la production d'hydrogène sous la seule activation de la lumière solaire, permettant ainsi de s'affranchir de l'électricité nucléaire. **Un hydrogène par conséquent « vert » au sens strict du terme ! Avec de tels électrolyseurs, nous visons, de manière innovante, l'usage d'eaux usées en lieu et place d'eaux pures, ce qui permet ainsi d'entrevoir la possibilité de couplage de la production d'énergie propre avec la dépollution des eaux, un autre enjeu planétaire majeur !**

Avez-vous une expérience des transferts de technologies ? Si oui, qu'en avez-vous tiré ?

J'en ai une qui date de la fin des années 2000 dans le domaine de l'hydrogène, et plus précisément des piles à combustible. Il s'agissait alors d'un projet de développement financé conjointement par l'Europe, l'Etat, la Région Centre et la Communauté de Communes du Drouais – actuelle Agglo du Pays de Dreux – dans l'optique de relancer l'économie de ce territoire. Il associait deux laboratoires académiques autour des technologies plasma, le GREMI à Orléans et l'IEM à Montpellier, ainsi qu'une start-up locale qui avait été fondée dans cette optique, le MID Dreux. Ce projet visait à concevoir un ensemble de bâtis de dépôts plasma en ligne pour la fabrication en continu de cœurs de piles à combustible basse température, à l'instar des procédés de dépôt en voie sèche qui ont émergé dans les 60's dans le domaine de la microélectronique.

Deux thèses conjointes avaient abouti à des résultats prometteurs mais la start-up a malheureusement fermé ses portes peu après le lancement du projet, ce qui a donc empêché de parvenir à un transfert technologique probant.
Néanmoins, cette expérience s'est avérée fructueuse et riche d'enseignements pour moi, qui étais alors au tout début de ma carrière d'enseignant-chercheur. J'ai en effet dû apprendre dans ce contexte à concilier les intérêts financiers, scientifiques et technologiques des différents acteurs d'un projet de développement d'envergure puisque son budget était de plusieurs millions d'euros. J'ai réalisé que ce n'était pas chose aisée de travailler avec des partenaires parlant des langages différents et n'ayant pas les mêmes priorités. Bien que non-abouti, ce projet a aussi permis de démontrer les potentialités des procédés plasma pour la préparation de dispositifs de la filière hydrogène vert alors qu'ils sont industriellement circonscrits aux domaines de la microélectronique et de l'optique.

Quels bénéfices y a-t-il à travailler dans le cadre et sur les priorités définies par la SNA hydrogène décarboné ?

Le premier bénéfice est évidemment de disposer de sources de financement nombreuses et variées, aussi bien en termes de budget que de nature de consortium ou encore de niveau d'objectif. Il est ainsi possible de bénéficier aussi bien de courts projets de quelques dizaines de milliers d'euros permettant de cibler un objectif bien spécifique et souvent avec une dimension risque importante que d'autres s'étalant sur plusieurs années avec des budgets de plusieurs centaines de milliers à plusieurs millions d'euros avec des consortiums beaucoup plus larges et des visées plus appliquées. Le second bénéfice est de disposer d'une gamme étendue de communautés scientifiques bien structurées aux échelles régionales, nationales et internationales permettant des échanges fructueux qui boostent l'avancement de la recherche et du transfert technologique.

Avez-vous des projets de transferts qui entreraient dans ce cadre ?

Dans le contexte du couplage que j'évoquais précédemment entre la photo-production de l'hydrogène et la dépollution de l'eau, qui constitue actuellement l'objectif de recherche majeur de mon équipe, nous avons approché la société ETE, localisée en Occitanie et spécialisée dans le traitement de l'eau par des solutions innovantes. Cette société a récemment manifesté un intérêt pour ce couplage. Nous pourrions donc être amenés à collaborer dans un futur proche.
Par ailleurs, sur la filière pile à combustible, nous venons de démarrer une thèse financée par Michelin. Elle vise à développer des membranes électrolytes innovantes, en l'occurrence préparées par procédé plasma, pour des piles à combustible fonctionnant en milieu alcalin qui ont l'avantage de s'affranchir de la présence de métaux nobles aux électrodes, avec la réduction des coûts qui en découle, et pour lesquelles il n'existe toujours pas de membrane de référence dans le commerce, contrairement à la filière acide avec le Nafion®. Cette collaboration naissante pourrait potentiellement conduire à un transfert de technologie à moyen terme.

Qu'est-ce qui motive les chercheurs à faire du transfert ?

Avant tout, l'attrait de la concrétisation d'un projet de recherche au travers de la réalisation d'un prototype ou de l'émergence d'une nouvelle activité industrielle. Cela donne le sentiment aux chercheurs - justifié - d'être utile à la société. Une autre motivation réside dans **l'intégration dans un partenariat enrichissant qui a vocation à faire progresser tous les acteurs du projet sur des objectifs communs, mais aussi sur des voies propres à chacun, à visées de savoir fondamental, d'application industrielle ou d'essor économique.**

Selon vous, en quoi est-ce impactant d'orienter ses travaux vers H2DEC ?

L'importance de l'hydrogène décarboné dans la transition énergétique et pour la préservation de la planète fait désormais consensus. Je suis moi-même intimement convaincue qu'il constitue un atout majeur pour répondre aux enjeux climatiques et environnementaux actuels. Mais pour une réelle émergence à grande échelle de cette filière, de gros efforts de recherche sont encore nécessaires, notamment du fait de son caractère pluridisciplinaire qui requiert une concertation pointue entre des chercheurs de tous horizons scientifiques, le monde politique et le milieu économique. Sur le volet recherche en particulier, il est évident qu'il faut orienter ses travaux vers le développement de matériaux, de techniques de caractérisation et de procédés spécifiquement adaptés à la filière en question.

Chercheurs et transfert de technologies : les choses évoluent

Patricia DE RANGO

Directrice de recherche à l'Institut Néel (CNRS)

En quoi vos travaux préfigurent-ils l'avenir de l'hydrogène décarboné ?

Son développement passe par **la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir d'électricité bas carbone ou renouvelable.** Or en France, l'objectif est d'installer 6,5 GWh d'électrolyse d'ici 2030, ce qui représenterait une production de 600 000 tonnes d'hydrogène par an. Par conséquent, de gros efforts sont actuellement réalisés pour accélérer la production d'électrolyseurs à grande échelle. Quatre gigafactories sont notamment en cours de construction.

Dans cette optique, il existe une problématique essentielle mais dont on entend peu parler : comment stocker de telles quantités d'hydrogène ? La technologie actuellement la plus utilisée consiste à le faire sous forme de gaz comprimé à une très haute pression, de l'ordre de 350 à 700 bars.

Cette technologie mature est adaptée au stockage de quelques dizaines de kilogrammes d'hydrogène, par exemple pour les véhicules légers. Mais elle risque de poser des problèmes à la fois en termes de sécurité et d'encombrement dès qu'il s'agira de stocker des quantités beaucoup plus importantes, pour la mobilité lourde, les stations-services en milieu urbain, le stockage tampon d'énergies renouvelables, ou encore l'acheminement de grosses quantités d'hydrogène produites sur un autre continent par exemple.

L'Australie parle ainsi d'en importer en Asie et il est aussi question de le faire depuis l'Amérique du Sud… Il existe bien une autre solution, l'hydrogène liquide à très basse température, qui offre une plus forte compacité mais à un coût énergétique plus important nécessaire au refroidissement et au maintien à très basse température.

Pertinente dans quelques cas très spécifiques, cette solution ne s'applique donc pas à un déploiement à grande échelle.

Mes travaux portent par conséquent sur les hydrures métalliques en vue d'un stockage solide. Il s'agit d'utiliser les propriétés qu'ont certains composés métalliques ou alliages d'absorber l'hydrogène à une pression modérée – quelques dizaines de bars – pour former un « hydrure métallique ».

Le métal absorbe l'hydrogène comme une éponge, cette réaction étant réversible : il suffit d'abaisser la pression dans le réservoir ou de chauffer l'hydrure pour en désorber l'hydrogène. L'intérêt de ce stockage sous forme solide est double : d'une part en termes d'encombrement, grâce à une densité volumique plus importante des composés que sous forme gazeuse, et d'autre part en termes de sécurité, l'absorption étant réalisée à pression modérée, compatible avec celle délivrée par un électrolyseur.

La désorption de l'hydrogène étant une réaction endothermique, cela permet par ailleurs de faire chuter très rapidement la température du réservoir en cas de fuite et donc de la limiter.

Cette solution est particulièrement pertinente pour la mobilité lourde et le stockage stationnaire.

Avez-vous une expérience des transferts de technologies ?

J'en ai eu une première entre 2008 et 2015. Avec mes collègues de l'Institut Néel, nous avions en effet développé un certain nombre de brevets sur le stockage réversible dans l'hydrure de magnésium qui ont abouti à la création de McPhy Energy à qui nous avons transféré nos licences. L'objectif était principalement orienté vers des applications stationnaires pour le stockage de grandes quantités d'hydrogène. Le magnésium présente en effet l'avantage d'être peu onéreux par rapport à d'autres métaux, son inconvénient étant qu'il nécessite d'être chauffé à 300 degrés pour désorber l'hydrogène.
Nous avons pris conscience à cette occasion de tous les problèmes techniques à surmonter, une fois sortis de nos laboratoires, pour développer des réservoirs fonctionnels exploitables par l'industrie. Nous avons en effet dû travailler sur des aspects tels que l'optimisation de la gestion thermique des réservoirs et de la conductivité thermique des matériaux, de leur résistance à un nombre de cycles élevé, de la gestion des contraintes mécaniques engendrées sur les parois des réservoirs, ou encore de la manipulation de poudres très réactives à la fois à l'hydrogène mais aussi à l'air, et donc pyrophoriques… Cela nous a permis de constater qu'il ne suffit pas de bénéficier d'un bon matériau aux qualités intrinsèques intéressantes pour que le travail soit terminé…

Quels bénéfices y a-t-il à travailler dans le cadre et sur les priorités définies par la SNA hydrogène décarboné ?

Ces priorités consistent à la fois à installer suffisamment d'électrolyseurs pour apporter une contribution significative à la décarbonation de l'énergie et de l'économie, et à développer la mobilité propre, en particulier des véhicules lourds. Si la problématique du stockage n'est pas directement abordée, elle l'est indirectement, la stratégie portant sur l'ensemble des technologies nécessaires à l'utilisation de l'hydrogène. En ce qui concerne la recherche amont dans les laboratoires, nous bénéficions notamment de la mise en place du PEPR H2 qui comporte un volet spécifiquement consacré au stockage solide.
Les bénéfices se font donc non seulement en termes de retombées financières, les démonstrateurs, nécessaires pour progresser, coûtant très cher, mais aussi en termes de synergies entre les différents acteurs de l'hydrogène : tous les aspects de la filière sont abordés et des événements encourageant les rencontres sont régulièrement organisés et permettent de mieux comprendre les enjeux.

Avez-vous des projets de transferts qui entreraient dans ce cadre ?

Si McPhy a actuellement arrêté sa production de réservoirs de stockage pour se recentrer sur les électrolyseurs, nous travaillons avec Mincatec, dont l'objectif consiste à stocker de l'hydrogène grâce à des hydrures métalliques fonctionnant à température ambiante et ne nécessitant pas d'être chauffés à 300 degrés pour désorber l'hydrogène. Ce qui implique d'avoir recours à des métaux plus chers que le magnésium, mais qui permettent de travailler au voisinage de la température ambiante et sont donc mieux adaptés à la mobilité. Un travail étroit avec l'industriel est indispensable pour permettre de mieux appréhender les besoins en fonction des applications visées. Pour chacune, il nous faudra développer un alliage spécifique, aux propriétés adaptées.
Nous avons aussi des projets sur des stockages de très grandes capacités, à nouveau à base d'alliages de magnésium.

Qu'est-ce qui motive les chercheurs à faire du transfert de technologies ?

J'ai toujours consacré une partie de mon activité à travailler dans le cadre de contrats industriels ou de projets académiques impliquant ce type des partenaires industriels. Je trouve en effet très motivant de voir mes travaux sortir du laboratoire pour générer des retombées technologiques, qui plus est quand ils contribuent, même modestement, à la transition énergétique. Or, faire du transfert n'est pas forcément naturel quand on œuvre dans la recherche fondamentale : lorsque j'ai débuté ma carrière il y a une trentaine d'années, j'osais à peine mettre en avant dans mes rapports d'activité ce volet « recherche appliquée » de mon travail. Mais les choses sont heureusement en train d'évoluer. **Orienter ses travaux vers le développement de l'hydrogène décarboné, et plus généralement la transition énergétique, contribue à attirer de jeunes chercheurs dans la profession en apportant du sens et une meilleure reconnaissance à leur activité.** Ce facteur ressort d'ailleurs fortement dans les entretiens d'embauche !

Accélérer le développement de la filière hydrogène est crucial pour mener une transition énergétique et écologique

Catherine AZZARO-PANTEL

Professeur des Universités à Toulouse INP-ENSIACET, l'école d'ingénieurs de la transformation de la matière et de l'énergie et chercheur au Laboratoire de Génie Chimique (UMR CNRS 5503 INP UPS)

En quoi vos travaux préfigurent-ils l'avenir de l'hydrogène décarboné ?

Je m'intéresse au déploiement de la filière hydrogène en général, et plus particulièrement au développement de modèles de systèmes énergétiques dédiés à des infrastructures « hydrogène ».
Nos travaux concernent en particulier la conception optimale de systèmes « hydrogène vert » décentralisés à travers une approche systémique de procédés, faisant intervenir des critères économiques et environnementaux basés sur une approche de type analyse du cycle de vie.
Plusieurs objectifs sont visés : 1) prendre en compte les aspects économiques et environnementaux lors de la phase de conception la chaîne logistique « hydrogène » avec le niveau de granularité adapté pour modéliser les différentes briques technologiques (production, stockage, distribution) et intégrer les contraintes spécifiques du territoire ; 2) développer de nouvelles connaissances sur les conditions de ces systèmes énergétiques (politiques, organisation de la gouvernance de la chaîne logistique et questions économiques) pour exploiter pleinement le potentiel de décarbonation de l'hydrogène ; 3) concevoir et développer de nouveaux outils scientifiques et instruments économiques pour concrétiser ces conditions.

Avez-vous une expérience des transferts de technologies ?

Notre activité étant centrée sur des modèles, nous développons des outils mathématiques qui font intervenir des environnements de modélisation et faisons appel à des solveurs d'optimisation.
Dans ce cadre, nous pouvons avoir recours à notre SATT, Toulouse Tech Transfer, pour une demande de dépôt de logiciel à l'APP, l'Agence pour la Protection des Programmes.
Il ne s'agit donc pas de transfert de technologies à proprement parler mais de protection de nos codes.

Quel est le bénéfice à travailler dans le cadre et sur les priorités définies par la SNA hydrogène décarboné ?

Il est toujours extrêmement dynamisant de se trouver dans un cadre qui **favorise la transition énergétique.** Je trouve cela très stimulant, notamment dans une optique d'encadrement de jeunes chercheurs.

Avez-vous des projets de transfert de technologies qui entreraient dans ce cadre ?

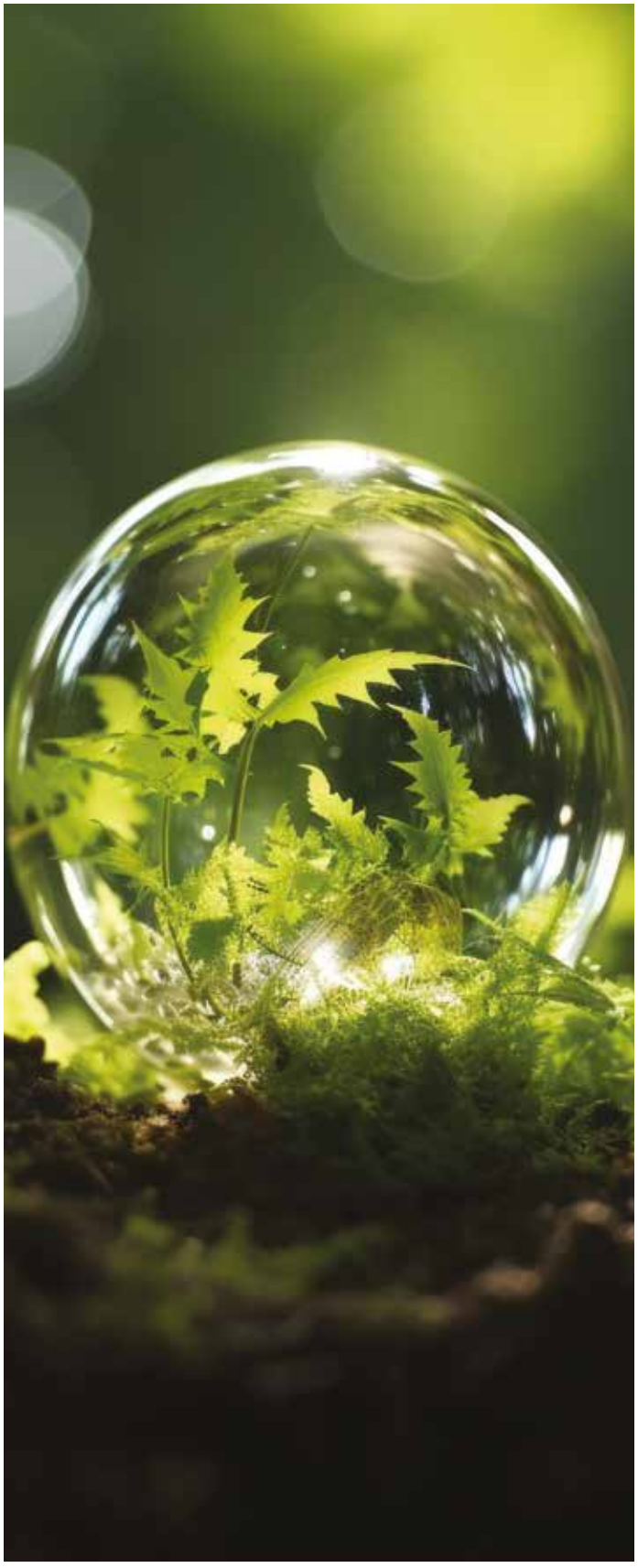
Oui, à travers les modèles sur lesquels nous travaillons. Nous avons ainsi développé un noyau de modélisation destiné à représenter une chaîne logistique hydrogène en vue du déploiement de la filière. Il s'appuie sur une approche multicritère coût, environnement et risque. L'outil logiciel issu de ces travaux, développé dans l'environnement de modélisation GAMS (General Algebraic Modeling System - https ://www.gams.com) est baptisé HYSCHIDO (HYdrogen Supply CHaIn Design by Optimization*).

Qu'est-ce qui motive les chercheurs à faire du transfert de technologies ?

Avant tout, cela permet d'ancrer nos travaux dans une réalité industrielle. **Accélérer le développement de la filière hydrogène est crucial pour mener une transition énergétique et écologique.**

Selon vous, en quoi est-ce impactant d'orienter ses travaux vers H2DEC ?

Compte tenu du fort potentiel de l'hydrogène dans la décarbonation, en particulier en matière de mobilité lourde, cette source d'énergie constitue un vecteur incontournable. Une initiative comme H2DEC nous permet donc d'apporter une réponse certes partielle, mais pas moins importante, qui s'intègre dans l'ensemble du paysage énergétique du futur.
Grâce à lui, nous bénéficions également de fonds supplémentaires plus que bienvenus pour financer nos recherches. Nous les avons en effet démarrées, il y a près de 12 ans, sans avoir recours à des appels à projets particuliers. Aussi une telle initiative est-elle très bien accueillie !



*Sofía De-León Almaraz, Catherine Azzaro-Pantel, Ludovic Montastruc, Luc Pibouleau, Oscar Baez Senties, Assessment of mono and multi-objective optimization to design a hydrogen supply chain, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 38, Issue 33, 2013, Pages 14121-14145, ISSN 0360-3199, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.059.

Créer sa start-up : une vraie prise de pouvoir pour un chercheur !

Jules BILLIET

Directeur Général de la start-up INOCEL, spécialisée dans les piles à combustible à hydrogène compactes de fortes puissances

Qu'est-ce qui vous a conduit à créer une start-up ?

D'une manière générale, la création d'une société se doit de répondre à un besoin du marché en lui apportant une réelle proposition de valeur.
L'histoire d'INOCEL correspond parfaitement à ce schéma, à une nuance particulière près : sa mission sociétale et environnementale de décarbonation.
Tout commence en effet avec le célèbre explorateur Mike Horn qui s'est donné comme mission de contribuer à accélérer la décarbonation de la planète. Il a alors voulu prouver que cela pouvait se faire en utilisant l'hydrogène comme vecteur énergétique via le développement d'une pile à combustible de forte puissance pour une compétition sportive.
L'offre de marché n'existant pas, l'idée de créer une start-up a émergé. Ce qui a été rendu possible grâce à la rencontre de deux mondes, celui de la technologie d'une part et du business et de l'industrie de l'autre, avec l'implication dans ce projet de l'entrepreneur Mauro Ricci et de moi-même. Nous nous sommes en effet aperçus que la technologie développée sous l'impulsion de Mike pouvait répondre à un scope d'applications très large et à des cas d'usage attendus par les industriels. INOCEL est donc née de la combinaison d'une demande structurelle à long terme du marché avec une technologie capable d'y répondre.

En quoi la création d'une start-up constituait-elle la solution la plus appropriée ?

Nous avions besoin de pouvoir proposer rapidement des solutions au marché.
En effet, non seulement il n'existait pas de pile à combustible à forte puissance, mais l'écosystème hydrogène était également en train de se structurer avec l'émergence rapide de différents acteurs alors que certaines briques manquaient sur l'ensemble de la chaîne de valeur en raison de freins technologiques et stratégiques.
Or, pour lever ces derniers rapidement et proposer au plus vite une solution européenne viable au marché constituant une vraie alternative aux énergies fossiles, la start-up paraissait comme idéale.
Elle combine une réelle agilité structurelle, essentielle quand on travaille en « techno push », avec une capacité à se structurer en un court laps de temps en société industrielle. Rapidité, garantie d'indépendance d'une stratégie décalée - mais qui s'est avérée la bonne - et possibilité de structurer le projet autour de personnalités fortes à la vision à long terme : autant d'éléments plaidant en faveur d'une start-up !

Alors que beaucoup de leviers sont déjà mis à disposition pour leur création, quels sont ceux qui pourraient manquer ?

INOCEL a un vécu particulier puisque son co-fondateur, Mauro Ricci, a lancé une quarantaine de sociétés, dont l'une emploie plus de 25 000 ingénieurs et réalise deux milliards d'euros de chiffre d'affaires, le tout dans le cadre d'un « family office » structuré. Nous ne sommes donc pas partis de rien, mais avons bénéficié d'une structuration déjà forte.
Ce qui a pu nous manquer, c'est en revanche une accélération des procédures de création et de réglementation, notamment au niveau de l'usine. Nous avons en effet fait le choix du « brown field », c'est-à-dire de partir d'une structure existante et de l'adapter pour y mettre notre usine, plutôt que du « green field », qui aurait consisté à la construire de zéro. Or, ce sur-mesure aurait été plus intéressant d'un point de vue décarbonation notamment… mais il aurait nécessité un permis de construire dont les délais d'obtention auraient été trop longs pour nous permettre d'atteindre nos objectifs. Par conséquent, plus de simplicité administrative et de flexibilité dans les autorisations nécessaires à la création d'une société et à son développement rapide seraient souhaitables.
Il faudrait aussi que les investisseurs aient plus le courage de prendre des risques qu'actuellement. Vous connaissez les VC – « Venture Capitals » -, ces fonds qui investissent dans les phases d'amorçage et de démarrage des projets et qui prennent le plus de risques puisqu'ils acceptent de miser des montants conséquents sur de simples idées pour voir émerger un produit sur un marché qui n'est que potentiellement émergent. Or, force est de reconnaître que beaucoup de VC se présentent comme telles alors qu'elles n'ont ni la capacité, ni la volonté stratégique d'investir dans des projets à forts risques dans leur structuration et leur lancement…

Votre start-up est-elle toujours en relation avec la recherche publique ou de nouveaux laboratoires ?

Oui, très fortement. Nous avons une relation structurelle historique avec le CEA qui nous a fourni des briques technologiques que nous continuons à améliorer avec lui et qui nous a aidés à conceptualiser notre produit. Nous nous sommes d'ailleurs installés à Grenoble pour être à côté de lui sur la partie développement et à Belfort sur l'industrialisation et la production.
Mais notre relation est aussi très forte avec la recherche de manière générale puisqu'INOCEL vient de ce monde : sans son orientation « techno push », la société, qui repose sur 25 ans de R&D, n'aurait jamais vu le jour ! Nous avons aussi un intérêt stratégique à initier des partenariats et à travailler avec d'autres institutions, notamment sur la partie tests, puisque nous développons un système qui n'a, à ce jour, aucun équivalent sur le marché en matière de puissance. Ce sera la pile la plus puissante du monde ! Ce qui signifie des cas d'application nouveaux pour le marché qui nécessitent de s'aventurer vers des études qui se situent plus du côté de la recherche que de celui des sociétés privées. Nous travaillons donc notamment avec l'IFPEN, le Laboratoire Laplace à Toulouse ou encore des structures de recherche basées à Belfort, comme l'UTBM, le FCLAB ou le FEMTO-ST.

Qu'est-ce qui permettrait d'amplifier le mouvement de création de start-ups chez les chercheurs ?

Ce serait indéniablement d'intégrer dans leur processus de recherche même une vision industrielle et marché. Si leur structuration et leur façon de faire actuelles sont nécessaires et passionnantes car la recherche fondamentale ouvre des portes vers des briques technologiques, leur conscience du marché et du chemin industriel à parcourir est souvent très faible.
Mieux les accompagner, tant d'un point de vue produit que création de start-up, leur permettrait de prendre des orientations correspondant à ces besoins. Elles déboucheraient ainsi sur l'émergence de très nombreuses innovations, qui autrement risquent de finir inutilisées sur des tables de laboratoires.
Cela leur permettrait aussi de passer au stade entrepreneurial en défendant eux-mêmes leurs innovations plutôt que de voir des grands groupes se les approprier. Ce serait une vraie prise de pouvoir de la part des chercheurs !

Le Programme Prématuration – Maturation H2DEC, en pratique

Objectifs

H2DEC vise à accélérer le développement et le transfert vers l'industrie des innovations issues de la recherche publique française en matière d'hydrogène décarboné.
Il permet aux chercheurs porteurs de projets de valorisation de bénéficier d'un accompagnement et d'un abondement financier pouvant aller jusqu'à 80 000 euros en phase de pré-maturation (TRL 2 à 3) et jusqu'à 300 000 euros pour la maturation (TRL 3 à 6).

Critères d'éligibilité de H2DEC

- Le projet est porté par des chercheurs et est rattaché à un des membres partenaires du consortium H2DEC

- Le projet a fait l'objet d'une décision de financement préalable par votre établissement ou par votre SATT, partenaire du consortium H2DEC

- Le projet est en phase de prématuration (TRL 2 à 3) ou de maturation (TRL 3 à 6) dans le domaine de l'hydrogène décarboné

- Le projet participe à l'un des axes suivants :

→ **pour la production d'hydrogène :** notamment l'électrolyse à haut rendement, à haute température, l'électrolyse à basse température pressurisée, les systèmes réversibles SOEC/SOFC, la substitution des métaux critiques, le couplage avec les ENR, les procédés de thermoconversion solaire et photoélectrocatalyse, l'hydrogène naturel

→ **pour le stockage de l'hydrogène** : notamment l'efficacité énergétique du stockage cryogénique, le stockage en milieu liquide, dans les matériaux solides, le stockage hyperbare, l'intégration du réservoir, le stockage géologique d'hydrogène en aquifère

→ **pour la conversion** : notamment les piles à combustible versatiles, flexibles, réversibles, à bas coût, à haute densité de puissance, durables ; la gestion intelligente et optimale ; les moteurs thermiques à combustion d'hydrogène.

Comment candidater au programme H2DEC ?

Les projets sont reçus et traités au fil de l'eau par les partenaires du consortium H2DEC.
Les projets sont soumis à un Comité d'engagement et de suivi, instance trimestrielle qui évalue les dossiers de candidatures et décide de l'attribution de l'abondement financier par le Programme H2DEC. Ce Comité est constitué de 3 collèges (représentants de l'État, partenaires du consortium, experts). Le projet est traditionnellement présenté par un représentant de l'organisme de transfert financeur, partenaire du consortium. Il peut éventuellement être accompagné du chercheur à l'origine du projet.

Pour toute question, n'hésitez pas à nous solliciter à l'adresse, **contact@h2dec.fr**.

Vous pouvez soumettre votre projet, en phase de PREMATURATION ou de MATURATION, à l'adresse : contact@h2dec.fr

Les partenaires du consortium H2DEC

Chef de file prématuration

SAYENS
CATALYSEUR D'INNOVATIONS

Chef de file maturation

Linksium
technology transfer & startup building
Grenoble Alpes

FRANCE 2030

RÉSEAU SATT

H2DEC

HYDROGÈNE DÉCARBONÉ

Accélérer l'innovation
de l'hydrogène décarboné

Production • Stockage • Conversion

www.h2dec.fr

SAYENS SATT
CATALYSEUR D'INNOVATIONS

Linksium
technology transfer & startup building
Grenoble Alpes

cea cnrs CNRS INNOVATION PSL INSTITUT POLYTECHNIQUE DE PARIS SORBONNE UNIVERSITÉ Lyon UGA Université Grenoble Alpes université PARIS-SACLAY

AxLR CONECTUS QUEST VALORISATION Ressources d'innovation PULSALYS SATT LUTECH SATT Nord SATT PARIS-SACLAY L'innovation en confiance Toulouse Tech Transfer INNOVATIVE IMPACT

FRANCE 2030