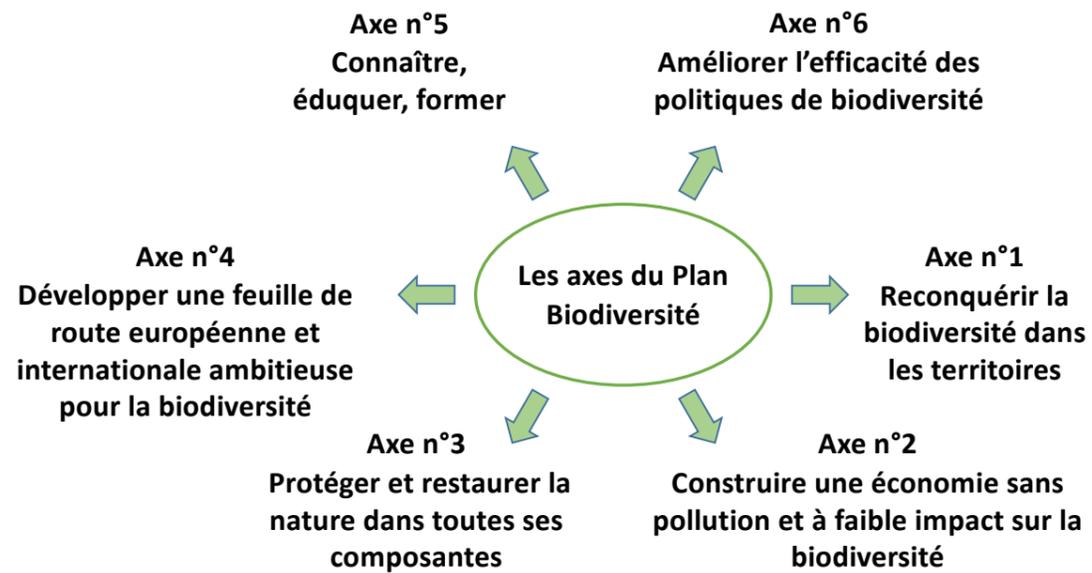


Un plan biodiversité a été mis en place en juillet 2018 afin de définir les actions pour la préserver. Ce plan est structuré en 6 axes, 24 objectifs et 90 actions.



### Le rôle des entreprises dans la protection de la biodiversité

En France, le législateur a promulgué une loi pour « a reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages ». L'objectif de cette loi est de préserver l'intégralité de la biodiversité sur l'ensemble des territoires. La loi Biodiversité de 2016 insiste sur les trois points suivants : éviter, réduire, compenser. Les entreprises doivent donc observer ces règles dans leurs différents projets et dans leur fonctionnement au quotidien.

Selon le programme des Nations Unies sur l'environnement, 40% de l'activité des entreprises mondiales est directement impacté par la biodiversité : approvisionnement en eau potable, utilisation de matières premières végétales, activités diverses liées à la nature... La dégradation de ces systèmes, comme par exemple une sécheresse accrue, mettrait en danger leur activité ou à minima leur rentabilité. Outre les obligations réglementaires liées au respect de l'environnement, les entreprises peuvent s'engager dans la préservation de la biodiversité dans le cadre de leur politique RSE.

POUR ALLER PLUS LOIN |



- [www.ipbes.net](http://www.ipbes.net)  
Site de l'IPBES : la plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques publie régulièrement des études et analyses
- [biodiversite.gouv.fr](http://biodiversite.gouv.fr)  
Site pour découvrir la biodiversité et comprendre ses enjeux



# 6

## DE NOUVELLES ÉNERGIES

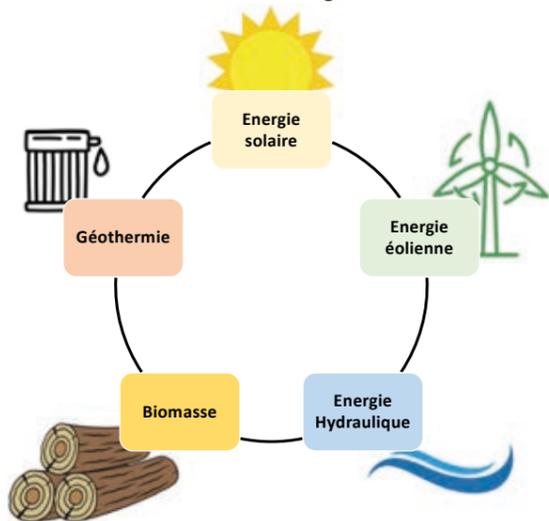
# 1. REPÈRES : LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

## Définition

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie en perpétuel renouvellement. Se régénérant constamment, elles sont donc considérées comme inépuisables. Les différentes sources d'énergies renouvelables sont :

- **L'énergie solaire** qui est la source d'énergie qui dépend du soleil. La lumière du soleil est captée par des panneaux solaires et permet de produire de l'électricité à partir généralement de panneaux photovoltaïques.
- **La géothermie** qui utilise la chaleur du sous-sol terrestre. Un fluide, par exemple de l'eau, circule en profondeur et remonte à la surface chargé de calories. Cette chaleur est alors utilisée directement ou convertit en l'électricité.
- **L'énergie éolienne** qui est l'énergie du vent. Elle peut être utilisée directement, avec une voile par exemple, ou convertit en électricité notamment via une éolienne.
- **L'énergie hydraulique** qui permet de produire de l'électricité en utilisant la force de l'eau provenant du débit d'une rivière, d'un fleuve ou d'une chute d'eau.
- **La biomasse** qui est la matière organique d'origine végétale ou animale. Elle peut être utilisée directement par combustion, avec le bois par exemple, ou par transformation comme la méthanisation.

### Les 5 sources d'énergies renouvelables

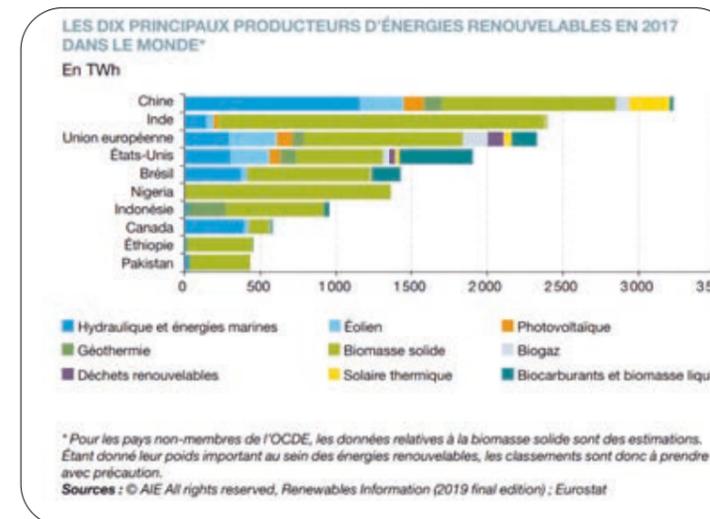
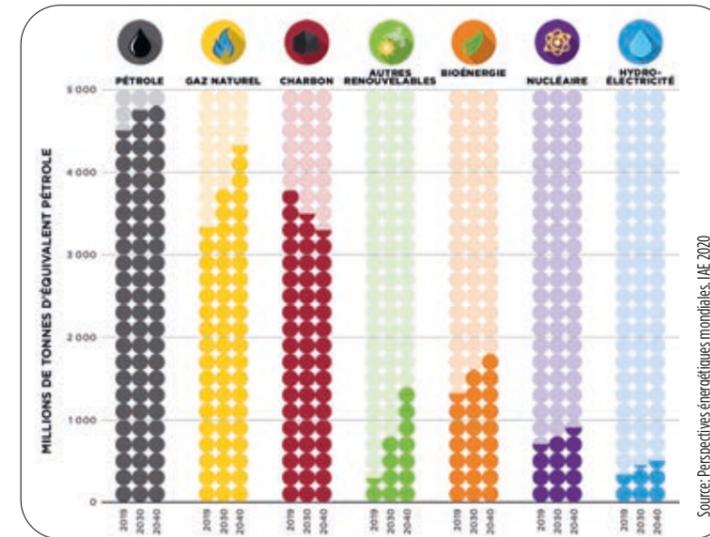


## La part de l'énergie renouvelable dans le monde

Face aux enjeux de la transition écologique, de nombreux pays misent sur le remplacement, même partiel, des énergies fossiles par des énergies renouvelables. L'IRENA (Agence Internationale pour les Energies Renouvelables) souligne qu'en 2021, les énergies renouvelables ont représenté 81% des nouvelles capacités de production électriques. Bien que pour l'instant minoritaire, l'usage de ces énergies va se développer dans les prochaines décennies. Selon l'AIE (Agence Internationale pour l'Energie), à l'horizon 2040, le pétrole, le gaz naturel et le charbon demeureront les sources les plus utilisées, mais leur part sera en décroissance. En 2018, la part des énergies renouvelables représentait 17,9% dans la consommation finale d'énergie et 26,4% dans la production d'électricité.

Le premier pays producteur d'énergies renouvelables est la Chine qui s'est engagée en 2015 à ce que ces énergies représentent 20% de son énergie consommée en 2030. Délaissant progressivement les centrales thermiques à charbon, le pays a investi ces dernières années plus de 300 milliards de dollars dans les énergies renouvelables. L'objectif est triple pour cette puissance économique : garantir une indépendance énergétique, fournir suffisamment d'énergie pour assurer le développement de son économie, devenir le leader mondial sur ces technologies.

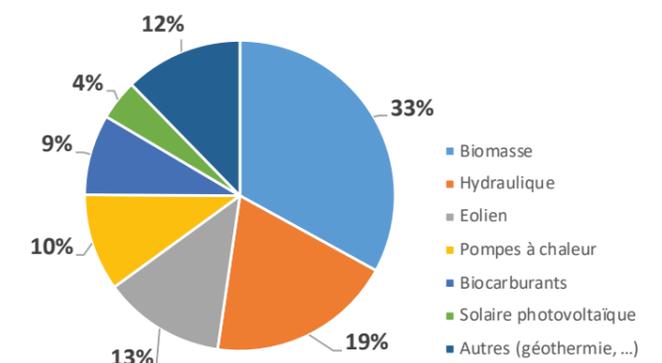
Le second pays dans ce classement est l'Inde. Devenue une puissance industrielle majeure, l'Inde doit aussi sécuriser son indépendance énergétique. Entre 2012 et 2020, la capacité installée de production d'énergies renouvelables a augmenté de 286%. L'objectif ambitieux du pays est de tripler cette capacité d'ici 2030 en développant simultanément l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie hydroélectrique. 45 parcs solaires sont déjà en activité et le plus grand parc hybride solaire/éolien est en cours d'installation dans la province du Gujarat.



## La part de l'énergie renouvelable en France

Les énergies renouvelables représentaient 13,1% de la consommation d'énergie primaire et 19,1% de la consommation brute finale d'énergie en 2020 (source : Ministère de la transition écologique), ce qui classe le pays en 17<sup>ème</sup> position au sein de l'Union européenne. Malgré une hausse constante, ce résultat reste éloigné de l'objectif national fixé par la loi relative à l'énergie et au climat de 2019 qui est de 33% en 2030. En 2020, la production d'énergie en France provient principalement de l'énergie nucléaire (39,2%), du pétrole (27,5%) et du gaz naturel (16,9%). Concernant la production d'énergies renouvelables, la première source utilisée en France est la biomasse (33%), suivie par l'énergie hydraulique (19%). Quant à l'énergie solaire, elle ne représente que 4%.

### Principales productions primaires d'énergies renouvelables (2020) en France



Source : Service des données et études statistiques (SDES)



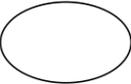
## 2. L'HYDROGÈNE

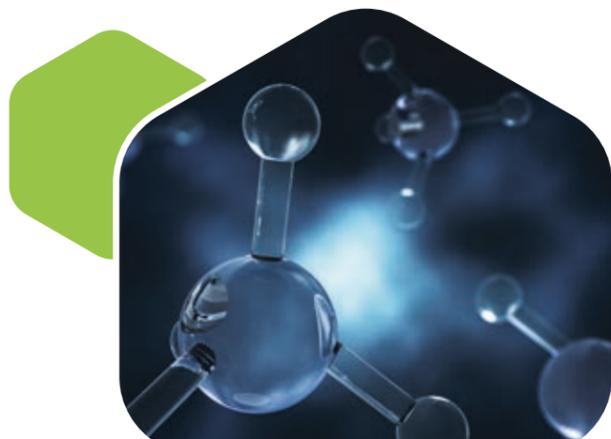
### Les différents types d'hydrogène

L'hydrogène (H) est un élément naturel, abondamment présent dans l'univers. Il a l'avantage de se consommer sans produire de CO<sub>2</sub> ce qui est un atout dans les processus de décarbonation. L'exploitation de gisement naturel de ce gaz n'est pour l'instant pas économiquement viable. Une industrie de l'hydrogène synthétique s'est donc développée, principalement aux Etats-Unis et en Chine, qui produit chaque année 75 millions de tonnes. Plusieurs procédés de fabrication ont été développés en utilisant différentes sources d'énergie.

L'hydrogène obtenu à partir de ces procédés plus ou moins polluants se distingue alors par sa couleur. Cette classification a été définie par l'IRENA (Agence Internationale des Energies Renouvelables) et largement adoptée. Cependant, la commission européenne délaisse depuis 2020 ces définitions et met en avant le terme d'hydrogène « propre », produit exclusivement à partir d'énergies renouvelables et d'hydrogène « bas carbone », produit à partir d'électricité nucléaire ou de combustibles fossiles avec captage et stockage du CO<sub>2</sub>.

### Les différents types d'hydrogène

Hydrogène Blanc		Hydrogène à l'état naturel sous forme gazeuse (H <sub>2</sub> )
Hydrogène Noir		Hydrogène qui provient de la gazéification du charbon bitumineux. Procédé polluant qui génère du CO <sub>2</sub> et du monoxyde de carbone CO
Hydrogène Brun		Hydrogène qui provient de la gazéification du lignite, charbon composé à 70% de carbone
Hydrogène Gris		Hydrogène produit par vaporeformage qui consiste à faire réagir un gaz naturel, principalement le méthane avec de l'eau et qui génère du CO <sub>2</sub>
Hydrogène Bleu		Hydrogène produit par vaporeformage mais dont le CO <sub>2</sub> généré est capté et stocké
Hydrogène Rose		Hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau qui divise l'eau en hydrogène et oxygène. Le procédé est rose si l'électricité provient du nucléaire
Hydrogène Vert		Hydrogène obtenu par électrolyse de l'eau avec une électricité provenant d'énergie renouvelable



### L'utilisation de l'hydrogène

L'hydrogène possède des propriétés énergétiques remarquables de par sa grande densité massique. Pour pouvoir l'utiliser, il faut donc soit le liquéfier à très basse température, soit le comprimer à très haute pression, deux procédés énergivores. De plus, ce gaz est réputé dangereux, il est extrêmement inflammable. C'est aussi un gaz très léger dont le stockage est difficile. C'est la molécule de gaz la plus petite, ce qui rend très compliqué la parfaite étanchéité de ses contenants. Malgré ces inconvénients, l'hydrogène a de multiples applications dans différents domaines. Près de la moitié de l'hydrogène mondial produit est utilisé dans la désulfuration et le raffinage du pétrole. La production d'ammoniac, qui servira notamment dans la fabrication d'engrais, est l'autre grande utilisation de l'hydrogène. L'hydrogène est aussi utilisé dans de nombreux procédés industriels. Il est indispensable à la fabrication de verre plat. Issu du vaporeformage et combiné au monoxyde de carbone CO, il permet de fabriquer de l'acier.

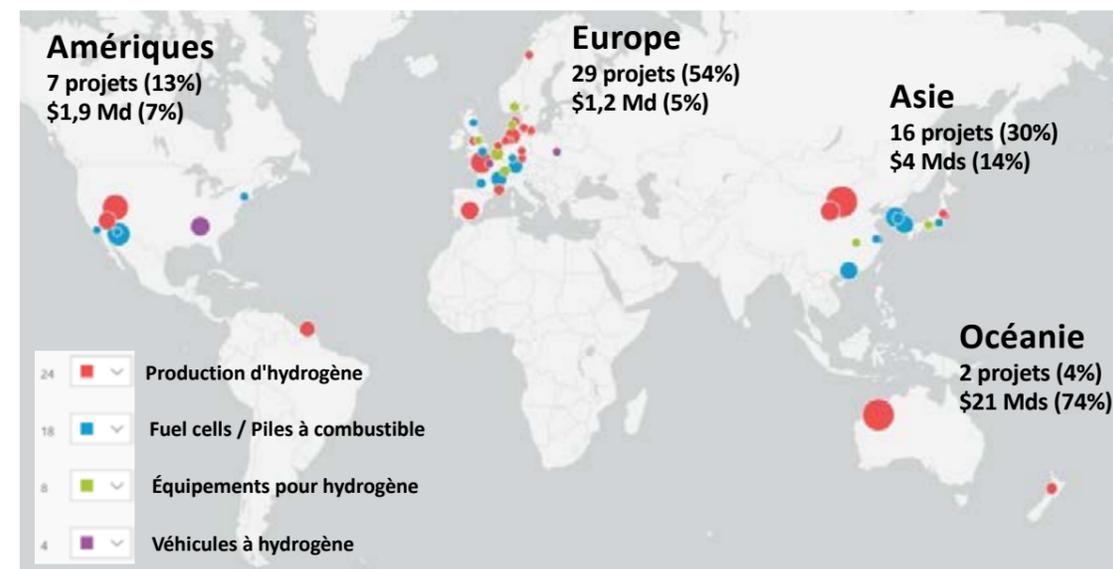
Mais l'enjeu de l'hydrogène se situe dans son potentiel. Utilisé dans les piles à combustible, il permet de faire rouler des voitures sans émission de gaz à effet de serre même si ces véhicules sont pour l'instant plus chers que les véhicules électriques avec

un rendement moindre. La recherche va permettre le développement de l'hydrogène dans le ferroviaire, le transport maritime voire l'aviation. Airbus travaille, par exemple, sur le développement de piles à combustibles pour ses avions.

### Les investissements dans l'hydrogène

L'hydrogène vert produit avec des énergies renouvelables est considéré comme un levier majeur de la décarbonation. De nombreux projets de recherche à travers le monde permettent d'espérer que l'hydrogène décarboné devienne rapidement compétitif. L'hydrogen Council, organisation mondiale représentant des entreprises industrielles impliquées dans le développement de cette ressource, recensait en février 2021 plus de 300 milliards d'annonces d'investissements dans 228 programmes dans plus de 30 pays. Devancée par l'Asie et les Etats-Unis sur différentes technologies clés comme les panneaux solaires ou la production de véhicules électriques, l'Europe ambitionne de devenir leader sur l'hydrogène vert. Cela se traduit par des plans ambitieux notamment en Allemagne et en France. Le plan France 2030, piloté par le gouvernement, donne effectivement la part belle aux financements de projets concernant l'hydrogène vert.

### Investissements dans l'hydrogène vert 2016-2020



Source : Trendeo, 2020

POUR ALLER PLUS LOIN |



• [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)  
Le site de l'IFPEN (IFP énergies nouvelles)

# 3. HYDROGÈNE DÉCARBONÉ : COMMENT PASSER DU GRIS AU GREEN ?

Institut Mines Telecom (IMT)

## L'enjeu de l'hydrogène

Le déploiement industriel de la production d'hydrogène n'a de sens que si celui-ci n'émet que peu ou pas de dioxyde de carbone. Les chercheurs des écoles de l'IMT travaillent notamment sur différentes alternatives à l'utilisation des énergies fossiles, comme l'électrolyse et la photocatalyse de l'eau, la pyrolyse du méthane par plasma ou encore la pyrolyse et gazéification de biomasse.

Produire une tonne d'hydrogène aujourd'hui, c'est émettre 12 tonnes de CO<sub>2</sub>. En effet, 95% de l'hydrogène mondial sont produits à partir de ressources fossiles. On parle d'hydrogène gris. Une situation incompatible avec le déploiement à long terme de la filière hydrogène. D'autant que, même si le CO<sub>2</sub> émis par les procédés actuels peut être capté en milieu contrôlé, les ressources fossiles ne pourront de toute façon pas répondre aux ambitions gouvernementales sur cette énergie. Développer d'autres modes de production « d'hydrogène décarboné » est donc essentiel. Dans le cadre du réseau Carnot H2Mines, les chercheurs des différentes écoles de l'IMT travaillent sur des procédés qui pourraient faire tourner au vert la palette de couleurs de l'hydrogène actuel.

## Du bleu pour se mettre au vert

L'électrolyse de l'eau est en ligne de mire du plan gouvernemental français publié en septembre dernier. Elle consiste à séparer une molécule d'H<sub>2</sub>O en hydrogène et en oxygène grâce à un apport d'électricité. C'est une solution décarbonée, à condition que l'électricité provienne d'une source renouvelable. Mais pourquoi transformer une énergie déjà propre en gaz ? « L'hydrogène permet le stockage d'importantes quantités d'énergie sur le long terme, ce que ne permettent pas de faire les batteries à grande échelle pour alimenter tout un réseau », explique Christian Beauger, chercheur en sciences des matériaux à Mines ParisTech. Le gaz répond donc en partie à la problématique d'intermittence des énergies renouvelables.

Dans ce cadre, les chercheurs veulent améliorer la performance des électrolyseurs afin de les rendre plus compétitifs sur le marché. À savoir : trouver le meilleur équilibre possible entre rendements, durées de vie et coûts réduits. Les électrolyseurs sont constitués de plusieurs cellules électrochimiques contenant deux électrodes et un électrolyte, comme dans le cas de piles à combustible. Il en existe trois grandes familles : les alcalins dont l'électrolyte est liquide, les technologies à membrane polymère (PEM) et les systèmes à haute température à base d'oxyde solide céramique (SOC). Chacune présente des problématiques qui lui sont propres.



À Mines ParisTech, l'équipe de Christian Beauger cherche à augmenter la durée de vie des électrolyseurs PEM en se concentrant sur les matériaux utilisés au niveau de l'anode. « Nous développons de nouveaux supports de catalyseurs sous forme d'aérogels d'oxydes métalliques qui doivent être conducteurs électroniques et capables de résister à la corrosion en milieu humide, à une température de 80°C et soumis à des potentiels souvent supérieurs à 2 volts », rapporte le chercheur. Une autre problématique de taille touche également les matériaux : le coût d'un électrolyseur. En effet, le catalyseur présent sur les électrodes des PEM est l'oxyde d'iridium, un composé trop cher pour favoriser le déploiement massif de futurs électrolyseurs à forte puissance. C'est pourquoi les chercheurs travaillent sur des catalyseurs à base de nanoparticules d'oxyde d'iridium. Ils réduisent ainsi la quantité de matière et donc le coût potentiel du système.



## Lumière sur la photocatalyse

À l'échelle du laboratoire, une alternative utilisant l'énergie solaire pour casser les molécules d'eau en hydrogène et oxygène est également envisagée. C'est la photocatalyse. Les semi-conducteurs utilisés peuvent être immergés dans de l'eau sous forme de poudre. Sous l'effet des rayons solaires, les paires électrons-trous créées fournissent l'énergie nécessaire à la dissociation des molécules d'eau. Mais attention : les niveaux d'énergie de ces porteurs de charge doivent être très précisément contrôlés pour être utiles.

« Nous formons des défauts au sein des matériaux qui viennent introduire des niveaux d'énergie dont la position doit être compatible avec l'énergie

nécessaire au procédé », explique Christian Beauger. Un travail d'ultra-précision délicat à réaliser, et qui conditionne l'efficacité de la photocatalyse. La route est encore longue pour les photocatalyseurs dont le rendement dépasse difficilement 1% pour les plus stables. Mais il ne faut pas enterrer ce mode de production d'hydrogène trop vite, car il est moins cher et plus facile à mettre en place qu'un système combinant une source d'énergie renouvelable et un électrolyseur.

## De l'hydrogène turquoise par pyrolyse du méthane

À Mines ParisTech, l'équipe de Laurent Fulcheri, spécialiste des procédés plasma, travaille sur la production d'hydrogène non plus à partir de l'eau, mais à partir de la pyrolyse du méthane. Une technique encore peu connue en France, bien que largement explorée par nos voisins allemands et russes. « Ce procédé nécessite de l'électricité comme pour l'électrolyse de l'eau, mais son principal intérêt est qu'il en nécessite environ sept fois moins que celle-ci. Il permet donc de produire plus d'hydrogène à partir de la même quantité d'électricité », révèle le chercheur.

En pratique, les chercheurs craquent des molécules de méthane, formule : CH<sub>4</sub> à haute température. « Pour cela, nous utilisons un gaz à l'état plasma pour fournir de l'énergie thermique au système. C'est la seule alternative pour apporter de l'énergie à une température supérieure à 1 500°C sans émission de CO<sub>2</sub> et à une échelle industrielle », précise Laurent Fulcheri. La réaction génère ainsi deux produits valorisables : l'hydrogène (25% en masse) et le noir de carbone solide (75% en masse). Ce dernier, à ne pas confondre avec le CO<sub>2</sub>, est notamment utilisé dans la gomme des pneus, les piles, les batteries, des câbles ou encore des pigments. Le carbone est ainsi stocké dans les matériaux et peut théoriquement être recyclé à l'infini. « La production d'une tonne de noirs de carbone par cette méthode permet d'éviter l'émission de 3 tonnes de CO<sub>2</sub> comparée aux méthodes actuelles », ajoute le chercheur.

Ce procédé a déjà fait ses preuves de l'autre côté de l'Atlantique. Depuis 2012, les chercheurs de Mines ParisTech collaborent avec la start-up américaine Monolith Materials qui a développé une technologie directement inspirée de leurs travaux. Sa localisation dans le Nebraska n'est pas anodine, car elle lui apporte un accès direct à l'énergie éolienne au cœur de la « corn belt », espace agricole majeur des États-Unis.

L'hydrogène produit est ainsi transformé en ammoniac pour fertiliser les exploitations de maïs environnantes.

Si la machine tourne, le travail de l'équipe de Laurent Fulcheri, acteur majeur de la R&D de la start-up, est pourtant loin d'être fini. « La production d'hydrogène est la tâche la plus simple, car les procédés de purification du gaz sont assez matures. Par contre, le noir de carbone produit peut avoir sur le marché, des valeurs drastiquement différentes selon sa nano-structure. L'objectif est donc désormais d'optimiser notre procédé afin de pouvoir générer toutes les qualités de noirs de carbone qui répondent à la demande des industries consommatrices », présente le chercheur. En effet, l'avenir de cette technologie repose dans les capacités de valorisation des deux coproduits sur le court terme.

### Transformation de la biomasse : une alternative locale

Du côté d'IMT Mines Albi, l'équipe de Javier Escudero travaille sur des procédés thermochimiques de transformation de la biomasse par pyrolyse et gazéification. Des déchets organiques sont chauffés à des températures élevées dans un réacteur et convertis en petites molécules de gaz de synthèse. L'hydrogène, le monoxyde de carbone, le méthane et le CO<sub>2</sub> ainsi produits sont captés pour ensuite être recombinaés ou séparés. Par exemple, le CO<sub>2</sub> et l'hydrogène peuvent servir à la formation de méthane de synthèse utilisable dans les réseaux de gaz naturel. Toutefois, un verrou scientifique doit encore être levé : « le gaz de synthèse produit est toujours accompagné de molécules inorganiques et de grandes molécules organiques appelées goudrons. Bien que leur concentration soit faible, elle impose

tout de même une étape d'épuration supplémentaire du gaz », explique Javier Escudero. En résulte une augmentation des coûts de traitement qui rend l'implémentation de cette solution plus difficile à petite échelle. Le chercheur travaille donc sur plusieurs solutions. Par exemple, l'exploration de différents matériaux catalyseurs qui permettraient d'accélérer certaines réactions de séparation des molécules des déchets, tout en éliminant les goudrons.

Cette approche pourrait être envisagée comme une forme de valorisation énergétique locale des déchets. En effet, ces technologies permettraient un maillage du territoire à petite et moyenne échelle avec des tailles de réacteurs adaptées à celles des centres de collecte de déchets verts, de résidus agricoles non valorisés, etc. Mais ceci tient également à un besoin de clarification des réglementations encadrant ce type d'installations. « Pour le moment, la loi n'est pas claire sur les contraintes environnementales imposées à de telles structures, ce qui ralentit leur développement et rebute certains industriels à vraiment investir dans cette méthode », précise le chercheur.

Les solutions ne manquent pas pour la production d'hydrogène décarboné. Néanmoins, la réalité économique veut que pour être réellement compétitifs, ces procédés devront produire un hydrogène moins cher que celui issu des énergies fossiles.



# 7

## LE BÂTIMENT DURABLE

