TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

LES FOCUS
TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR



HYDROGÈNE DÉCARBONÉ :
OÙ EN EST LA FRANCE ?

novembre / 2020

SOMMAIRE

SOMMAIRE 2

INTRODUCTION 3

COMMENT SE DÉVELOPPE LA FILIÈRE HYDROGÈNE ? 4

- FRANCE RELANCE : PLEINS PHARES SUR L'HYDROGÈNE 4
- HYDROGÈNE : UNE FILIÈRE DE L'ÉLECTROLYSE EN CONSTRUCTION 6
- L'HYDROGÈNE, UN VECTEUR ÉNERGÉTIQUE ALTERNATIF À L'ÉLECTRICITÉ POUR LA MOBILITÉ LOURDE 8
- COMMENT RENDRE L'HYDROGÈNE VRAIMENT ÉCOLO ? 11

POUR ALLER PLUS LOIN 14

- LA MANCHE VEUT CONSOLIDER L'ÉCOSYSTÈME HYDROGÈNE TERRITORIAL 14
- POUR L'AIE, IL FAUT ACCÉLÉRER DANS LES TECHNOLOGIES PROPRES ET LE MARCHÉ NE FERA PAS TOUT ! 16
- AIRBUS DÉVOILE SES CONCEPTS D'AVION ZÉRO ÉMISSION À HYDROGÈNE 18
- AMÉLIORER LA DURÉE DE VIE DES PILES À HYDROGÈNE PAR ÉLECTRO-CATALYSE SÉLECTIVE 19

INTRODUCTION

A la faveur du plan France Relance annoncé par le gouvernement en septembre 2020, 30 milliards d'euros ont été dédiés à la transition écologique, dont 7,2 milliards destinés au « plan hydrogène ». Mais quelle est la situation de l'hydrogène en France aujourd'hui ?

Le premier article de ce livre blanc s'attache à décrypter le « plan hydrogène ». Le gouvernement a détaillé une stratégie en 3 axes pour le développement de l'hydrogène décarboné en France. D'abord, décarboner l'industrie, en faisant émerger une filière pour l'électrolyse. Ensuite, développer les transports collectifs et marchandises fonctionnant à l'hydrogène. Enfin, soutenir la recherche, l'innovation et le développement des compétences.

Notre deuxième article se concentrera sur le premier axe prévu par le plan, à savoir l'électrolyse. Ce procédé reste celui qui peut le plus facilement produire de l'hydrogène bas carbone à partir d'énergies renouvelables, ou de nucléaire. La France dispose déjà d'industriels à fort potentiel et une présence sur l'ensemble de la chaine de valeur de la filière hydrogène. Le marché de la production d'hydrogène décarboné par électrolyse doit donc évoluer vers des projets de plus grande taille et de plus importante capacité, en réalisant des gigafactories. La France se fixe ainsi un objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030.

Avec 20 % des rejets de CO2, les transports sont en ligne de mire par les plans du gouvernement, et l'hydrogène pourrait être une option. La problématique de la mobilité repose sur la production de l'hydrogène mais d'autres aspects entrent en jeu : points de charge, stockage, réseau. Notre troisième article se focalisera principalement sur la mobilité lourde. En effet, pour l'heure, les véhicules hydrogènes impliquent un réservoir qui occupe un volume certain, malgré les avancées de ces dernières années en la matière, et freine le développement de la voiture particulière. Ce qui réserve à court terme l'hydrogène pour les véhicules utilitaires et les véhicules lourds, comme les camions (une dizaine de kg d'hydrogène par 100 km) ou les bus.

Finalement, comme l'électricité, l'hydrogène est un vecteur énergétique, et non directement une source d'énergie provenant de la nature. Pour miser sur ce vecteur, qui n'émet ni CO2, ni ne pollue l'atmosphère, il faut donc qu'il soit lui-même produit à partir de sources d'énergie décarbonées. A ce jour, l'hydrogène utilisé majoritairement dans l'industrie est produit à partir de composés carbonés. Pour que l'hydrogène soit écologique, encore faut-il que les molécules soient produites à partir d'un procédé lui-même écolo… Ce qui est loin d'être le cas aujourd'hui. Et c'est tout l'enjeu des grands plans lancés aux niveaux européen et français. Notre dernier article dévoilera les travaux en cours pour rendre l'hydrogène vraiment écolo.

COMMENT SE DÉVELOPPE LA FILIÈRE HYDROGÈNE ?

FRANCE RELANCE : PLEINS PHARES SUR L'HYDROGÈNE

A la faveur du plan France Relance annoncé par le gouvernement, doté de 30 milliards d'euros en faveur de la transition écologique, Barbara Pompili, ministre de la Transition écologique et Bruno Le Maire, ministre de l'Economie, des Finances et de la Relance ont détaillé la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France. Un « plan hydrogène » qui représente 7,2 milliards d'euros sur les 30 milliards d'euros.

Le dossier de présentation du plan hydrogène des ministères de la Transition écologique et de l'Economie rappelle que *« la France a été l'une des premières nations à déployer un plan hydrogène en 2018 »*. Ces trois dernières années, l'État a apporté son soutien à la filière via plusieurs mécanismes. Le Programme d'investissements d'avenir (PIA) a mobilisé plus de 100 millions d'euros en soutenant la mise en œuvre de démonstrateurs et la prise de participation dans des entreprises à fort potentiel. En outre, l'Agence nationale de la recherche (ANR) a soutenu la recherche publique en mobilisant plus de 110 millions d'euros sur les 10 dernières années. Bpifrance a accompagné de nombreuses startups ou PME dans leurs projets d'innovation et de développement technologiques, alors que, de son côté, l'Ademe a soutenu le déploiement de la mobilité hydrogène en apportant 80 millions d'euros. Enfin, la Banque des Territoires s'est également positionnée en soutenant des projets de déploiements portés par des collectivités, rappellent les ministres.

Trois grands axes

C'est devant l'Association française pour l'hydrogène et les piles à combustible (Afhypac) et l'ensemble des acteurs et partenaires de la filière que les deux ministres ont donné les trois grandes priorités de ce vaste plan, doté de 2 milliards d'euros sur les seules années 2020 à 2022.

D'abord, décarboner l'industrie, en faisant émerger une filière pour l'électrolyse et passer de l'usage de l'hydrogène provenant de sources carbonées dans l'industrie à de l'hydrogène décarboné. Ensuite, développer les transports collectifs et marchandises fonctionnant à l'hydrogène (trains, poids-lourds, véhicules utilitaires légers, bennes à ordures ménagères, etc.) et soutenir les projets territoriaux d'envergure. Enfin, la troisième priorité vise à soutenir la recherche, l'innovation et le développement des compétences.

Ils détaillent également la répartition de 3,4 milliards d'euros (sur les 7,2 milliards d'euros) sur la période 2020-2023. Ainsi, 54 % seront consacrés à la décarbonation de l'industrie, 27 % au développement de transports collectifs et marchands hydrogène et le solde, 19 % pour la recherche, l'innovation et la formation.

Décarboner l'industrie et créer une filière électrolyse

Le gouvernement rappelle que la stratégie retient l'électrolyse qui apparaît comme le plus prometteur, sur lequel la France dispose déjà d'industriels à fort potentiel. Le marché de la production d'hydrogène décarboné par électrolyse doit donc évoluer vers des projets de plus grande taille et de plus importante capacité. La France se fixe ainsi un objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés en 2030.

Ainsi, dès 2021, le gouvernement veut lancer la construction d'un Projet Important d'Intérêt Européen Commun (PIIEC/IPCEI) sur l'hydrogène, sur le modèle de « L'Airbus des batteries ». Il s'agit plus particulièrement de faire émerger en France des projets de « gigafactory » d'électrolyseurs, selon un schéma similaire au plan batterie qui prévoit le développement des usines de Nersac puis de Douvrin par ACC, entreprise commune de PSA et Total/Saft (bientôt rejoints par Renault), indique le gouvernement dans la présentation de son plan hydrogène. Dès lors que

ces moyens de production commencent à exister, le gouvernement estime que parallèlement, un verdissement de l'usage de l'hydrogène dans l'industrie sera possible.

Développer la mobilité hydrogène

Le plan vise à développer les transports collectifs et marchandises fonctionnant à l'hydrogène et soutenir les projets territoriaux d'envergure. Le développement des technologies et composants clés se poursuivra notamment au travers de projets pilotes pour des navettes fluviales et des navires fonctionnant à l'hydrogène, ainsi que l'accélération des efforts d'innovation en faveur d'un avion décarboné à hydrogène dont l'entrée en service pourrait avoir lieu au cours de la décennie 2030, explique le gouvernement.

Dans ce cadre, avant la fin de l'année 2020, un appel à projets (AAP) « Briques technologiques et démonstrateurs » sera lancé. Cet AAP est doté de 350 millions d'euros jusqu'en 2023. Par ailleurs, un appel à projets « Hub territoriaux d'hydrogène » sera lancé par l'Ademe (doté de 275 millions d'euros d'ici 2023) pour le déploiement, par des consortiums réunissant des collectivités et des industriels fournisseurs de solutions, d'écosystèmes territoriaux de grande envergure regroupant différents usages (industrie et mobilité), pour favoriser au maximum des économies d'échelle.

Soutien à la recherche, l'innovation et la formation

De nombreux nouveaux d'usages de l'hydrogène sont à explorer : utilisation dans les réseaux énergétiques pour faciliter le déploiement des renouvelables, dans l'industrie, la sidérurgie notamment, les mobilités, la décarbonation du secteur gazier. Autant de domaines qui impliquent de la recherche, de l'innovation et de la formation.

Le gouvernement annonce, d'ici la fin de l'année, un programme prioritaire de recherche (PPR) « Applications de l'hydrogène » opéré par l'ANR (Agence nationale de la recherche) qui permettra de soutenir la recherche en amont et de préparer la future génération des technologies de l'hydrogène (piles, réservoirs, matériaux, électrolyseurs...). Ce programme vise à contribuer à l'excellence française dans la recherche sur l'hydrogène et sera doté de 65 millions d'euros.

Dès 2021, sera lancé un *« accompagnement du développement de campus des métiers et des qualifications rassemblant, dans la même organisation ou sur le même site, lycées d'enseignement technologique et professionnel (baccalauréats technologiques et professionnels, section de techniciens supérieurs), universités (IUT, licences professionnelles ou spécialisées, masters, formations d'ingénieurs, doctorats) et grandes écoles d'ingénieurs. »*

16/09/2020

HYDROGÈNE : UNE FILIÈRE DE L'ÉLECTROLYSE EN CONSTRUCTION

La clé du développement de l'hydrogène, c'est l'électrolyse. Ce procédé reste celui qui peut le plus facilement produire de l'hydrogène bas carbone à partir d'énergies renouvelables, ou de nucléaire.

Les acteurs de la filière, réunis au sein de France Hydrogène (ex-Aphypac), sont désormais près de 200 à partager cet objectif, contre 120 en 2019. Et le lobby français de l'hydrogène a atteint son objectif à l'aune du plan de relance, puisque le plan hydrogène du gouvernement présenté le 8 septembre dernier est doté de quelque 7 milliards.

Comme l'a rappelé Philippe Boucly, président de France hydrogène lors d'une rencontre virtuelle avec les journalistes de l'énergie et de l'environnement (AJDE et AJE), dans *« notre manifeste »*, le montant global d'investissement *« doit atteindre 24 milliards d'euros sur 2020-2030, avec des technologies matures, mais pas encore compétitives »*. Les 7 GW d'électrolyseurs sont désormais dans le pipe, pour produire quelque 570 000 tonnes d'hydrogène par an pour faire baisser les coûts, a insisté Alice Vieillefosse, la directrice de cabinet de Laurent Michel, le directeur général de l'énergie et du climat (DGEC) au ministère, lors de la conférence en ligne. Mais il faudra aussi doter les installations industrielles, qui produisent actuellement l'hydrogène à partir de vaporéformeurs de capture et de stockage ou d'utilisation du carbone (CCUS), pour quelque 130 000 t. *« Cet objectif,* insiste Philippe Boucly, *représente un doublement de la capacité de production d'ici à 2030, pour passer de quelque 880 000 t d'hydrogène produites par an à entre 1,3 et 1,4 milliard de tonnes »*.

Pour France Hydrogène, cela suppose un soutien à l'investissement de l'Etat à hauteur de 6,7 milliards d'euros et un soutien de 3,6 Mds € à la production d'hydrogène renouvelable et bas carbone.

L'aide de l'Europe

Le premier axe de la stratégie française énoncée par le gouvernement en septembre consiste à accélérer l'investissement pour une industrie de l'hydrogène décarbonée et compétitive. L'objectif de 6,5 GW d'électrolyseurs installés s'y inscrit. La stratégie française s'appuie sur le développement d'importants projets d'intérêt européen commun (IPCEI), le Programme d'investissements d'avenir (PIA) y mettant 1,5 Md €. La priorité est donc de réaliser des gigafactories, comme avec les batteries, afin de disposer de 40 GW d'électrolyseurs en Europe à l'horizon 2030, dont 6,5 GW en France donc. La feuille de route 2030 de l'Union européenne vise 6 GW sur 2020-2024, soit 1 Mt par an en électrolyse, puis à atteindre les 40 GW d'ici à 2030, pour produire 10 Mt, avec un investissement compris entre 24 et 42 Mds €. C'est bien là le composé clé pour le développement de l'hydrogène.

Pour ces IPCEI, d'ores et déjà plusieurs pays européens ont manifesté de l'intérêt, insiste le président de France Hydrogène, mais la France souhaite une alliance avec l'Allemagne. Ce qui a été confirmé lors d'une récente rencontre entre le Président français Emmanuel Macron et la Chancelière allemande, Angela Merkel, précise Philippe Boucly. Ces projets européens transnationaux dans des domaines stratégiques de la recherche accordent aussi un soutien dans les premières années de production et ils s'adressent aux nouvelles générations d'électrolyseurs.

La question demeure cependant pour le président de France Hydrogène de *« promouvoir une vision française dans le cadre de la démarche IPCEI »*. Une vision française qui passe notamment par le recours au nucléaire également, pour alimenter les électrolyseurs.

Sur toute la chaîne de valeur

La France dispose d'atouts majeurs, notamment une présence sur l'ensemble de la chaine de valeur de la filière

hydrogène a insisté Philippe Boucly. Qu'il s'agisse de la production d'électricité pour alimenter les électrolyseurs (avec des acteurs majeurs, comme EDF, Engie, Total et CNR), ou de la production d'hydrogène, avec des acteurs tels Air Liquide, McPhy, Engie, voire CNR ou Hynamics, la filiale d'EDF dédiée, sans oublier les plus « petits », comme Lhyfe. Avec des fabricants, comme Areva H2Gen, ou McPhy. Et des distributeurs et des usagers.

Grâce au CEA-Liten, a insisté Florence Lambert, la directrice de l'organisme, qui regroupe plus d'un millier de personnes, mais aussi avec des start-up, spin-off comme Symbio, ou avec des collaborations avec les autres grands centres de recherche, comme le CNRS, les recherches se poursuivent, notamment en termes d'électrolyse haute température. Comme le souligne la responsable du CEA-Liten, l'objectif est, alors que l'industrie va démarrer avec les moyens existants, d'être capable de porter à maturation de telles technologies permettant de réaliser des gains de rendement de 20 % à 30 % à coût identique de l'électricité. Cela permettrait de faire chuter le coût de la molécule produite par les électrolyseurs à 2 euros par kg. Par ailleurs, sur les premières technologies, il n'y a plus de verrous à lever, mais il faut des premiers marchés avec des modèles économiques ad hoc et installer les premières usines, insiste-t-elle. Enfin, *« il faut maintenir le cap sur la durée »*. Côté électrolyse, de nouveaux matériaux (comme les céramiques), en alliant l'intelligence artificielle, doivent permettre d'aller vers de bons matériaux et les porter à maturité. Le CEA est, dans ces recherches, associé au CNRS ainsi qu'à d'autres organismes européens. Et de conclure que le *« coût de l'hydrogène part dans le bon sens* (à la baisse, ndlr), *mais il faut que la recherche conserve cette synchronisation avec l'industrie »*.

L'enjeu est en effet industriel, il s'agit clairement pour Philippe Boucly de ne pas reproduire ce qui s'est passé dans les énergies renouvelables, notamment le solaire.

18/11/2020

L'HYDROGÈNE, UN VECTEUR ÉNERGÉTIQUE ALTERNATIF À L'ÉLECTRICITÉ POUR LA MOBILITÉ LOURDE

Comme l'électricité, l'hydrogène est un vecteur énergétique, et non directement une source d'énergie provenant de la nature. Pour miser sur ce vecteur, qui n'émet ni CO2, ni ne pollue l'atmosphère, il faut donc qu'il soit lui-même produit à partir de sources d'énergie décarbonées. A ce jour, l'hydrogène utilisé majoritairement dans l'industrie est produit à partir de composés carbonés. La problématique de la mobilité repose ainsi également sur la production de l'hydrogène. Mais d'autres aspects entrent en jeu : points de charge, stockage, réseau ?

« La crise du Covid-19 joue un rôle d'accélérateur : après l'électricité, l'Europe s'attaque à la décarbonation des transports et l'on sait désormais quelles technologies seront déployées à grande échelle. Le véhicule électrique à batterie s'impose ainsi pour la mobilité individuelle, mais il y a aussi des niches en complément pour l'hydrogène propre et le bioGNV (bus, camionnettes, camions de ramassage, fret routier lourd) », constate dans un communiqué Marc-Antoine Eyl-Mazzega, directeur du Centre Énergie & Climat de l'Ifri, co-auteur d'une récente étude réalisée avec La Fabrique de la Cité.

Logiquement, la mobilité hydrogène est l'un des grands axes du plan hydrogène, détaillé par le gouvernement. Avec 20 % des rejets de CO2, les transports sont en effet en ligne de mire.

Reste que pour les véhicules particuliers, le marché est encore loin, beaucoup plus loin que le marché électrique, qui avance à grands pas. Même si, le véhicule hydrogène est en réalité un véhicule électrique fonctionnant avec une pile à combustible qui consomme l'hydrogène pour produire de l'électricité et alimenter un moteur électrique identique à celui des véhicules électriques.

Néanmoins, cela implique un réservoir qui, pour l'heure, occupe un volume certain, malgré les avancées de ces dernières années en la matière, et freine le développement de la voiture particulière. Même s'il suffit de 4 à 5 kg d'hydrogène compressé (à 700 bar) pour alimenter un véhicule léger sur 500 à 600 km, le volume du réservoir demeure suffisamment important. C'est en effet un peu plus d'une centaine de litres si le gaz est uniquement comprimé, mais s'il est liquide (à -252.87°C et à 1 013 bar), il est possible de parvenir à 75 litres… Reste que le réservoir lui-même occupe un certain volume, peu compatible avec les besoins d'un véhicule particulier. En attendant le stockage sous forme solide, mais là nous en sommes encore au stade de la recherche.

Ce qui réserve à court terme l'hydrogène pour les véhicules utilitaires et les véhicules lourds, comme les camions (une dizaine de kg d'hydrogène par 100 km) ou les bus. Pour ces deux types de véhicules, la masse à embarquer sera ainsi de 4 à 5 fois celle nécessaire pour un véhicule léger pour les mêmes performances… Sans oublier les trains et le navires, qui peuvent, eux-aussi basculer plus rapidement à l'hydrogène.

C'est d'ailleurs ce que le plan hydrogène du gouvernement veut mettre en œuvre, en ciblant les transports collectifs et de marchandises fonctionnant à l'hydrogène (trains, poids-lourds, véhicules utilitaires légers, bennes à ordures ména-

gères, etc.) et en soutenant les projets territoriaux d'envergure. Le développement des technologies et composants clés se poursuivra notamment au travers de projets pilotes pour des navettes fluviales et des navires fonctionnant à l'hydrogène, ainsi que l'accélération des efforts d'innovation en faveur d'un avion décarboné à hydrogène dont l'entrée en service pourrait avoir lieu au cours de la décennie 2030, explique le gouvernement.

Produire, acheminer et distribuer

En présentant devant la presse les désirs de la profession à l'aune de la relance annoncée en juillet dernier, Philippe Boucly, le président du lobby hydrogène français estimait qu'une trajectoire de déploiement des solutions hydrogènes à hauteur de 700 000 tonnes d'hydrogène renouvelable ou bas carbone pour un marché global estimé à cette date à environ 1,35 million de tonnes était atteignable à l'horizon 2030.

Ceci nécessite la mise en œuvre, sur la période 2020-2030, de 7 GW d'électrolyseurs (57 000 tonnes par an), ainsi que d'unités de CCUS (capture et stockage du carbone) associés aux vapo-réformeurs (qui produiraient à partir de dérivés pétroliers 130 000 tonnes par an). Pour la partie mobilité, cela se traduirait en 2030, selon l'Aphypac, par un parc de 300 000 véhicules utilitaires légers et taxis (chiffres PFA), environ 5 000 poids lourds, 250 trains et un millier de bateaux, pour une consommation de 342 500 tonnes d'hydrogène.

Le lobby de l'hydrogène, désormais renommé France Hydrogène, a gagné cette partie, puisque le gouvernement a inscrit un développement de 6,7 GW d'électrolyseurs dans son plan hydrogène présenté en septembre. Voilà pour la partie production, pour autant que ces électrolyseurs produisent du courant à partir de sources vertes (plus de 45 TWh par an quand même).

D'autres problématiques demeurent : l'acheminement sur les sites de distribution… Et le réseau de distribution lui-même. Reste en effet à distribuer ce gaz. Les grands experts des gaz industriels, Air liquide ou Linde savent parfaitement le faire… Par train et par camion ! D'où l'idée de réaliser des productions décentralisées. Ce que savent faire des entreprises comme McPhy par exemple, en utilisant les surplus d'énergies renouvelables produites localement elles-aussi. C'est ce que met en place par exemple la Zero Emission Valley en Auvergne Rhône-Alpes, avec pour objectif un millier de véhicules, 20 stations, 15 électrolyseurs à horizon 2023.

La question se pose alors de la distribution. Afin de permettre un remplissage rapide du réservoir des véhicules se présentant « à la pompe » – moins de 5 minutes pour un véhicule léger et moins de 30 minutes pour un bus –, les stations de remplissage doivent disposer d'unités de compression performantes et de réservoirs de stockage de grande capacité, explique France Hydrogène. Pour permettre cela, un stockage à pression intermédiaire, voire à plus haute pression, et des pompes de transfert sont nécessaires. Utiliser un gaz refroidi lors de son transfert permet d'y remédier. Dans ces conditions, le transfert de 5 kg d'hydrogène sous 700 bars, ne dure que 4 à 5 minutes. Des entreprises comme McPhy mettent déjà en œuvre ces « pompes H2 », de même les grands du secteur, comme Air Liquide.

Reste que, comme pour le véhicules électriques, il faut disposer d'un réseau. Mi-2019, une trentaine de stations délivrant de l'hydrogène, d'accès privé ou public, en comprenant les distributeurs pour vélos à assistance électrique via pile H2, étaient ouvertes en France, dont presque le tiers en région parisienne, selon le site H2-mobile.fr, parrainé notamment par le producteur Air Liquide. C'est également le défi que doit permettre de relever le plan hydrogène, via un appel à projets (AAP) « Hub territoriaux d'hydrogène » qui sera lancé par l'Ademe (doté de 275 M€ d'ici 2023) pour le déploiement – par des consortiums réunissant des collectivités et des industriels fournisseurs de solutions – d'écosystèmes territoriaux de grande envergure regroupant différents usages (industrie et mobilité), pour favoriser au maximum des économies d'échelle.

Dans le cadre de la précédente stratégie hydrogène de la France de 2018, le Sipperec, l'un des grands syndicats d'énergie francilien, avait présenté le projet H2 IDF, lauréat du premier appel à projets « écosystèmes territoriaux de

mobilité hydrogène ». Ce projet vise à produire de l'hydrogène renouvelable à partir de la cogénération de l'Unité de Valorisation Énergétique de Créteil (94), exploitée par Suez. Un électrolyseur a été installé sur le site pour produire 500 Kg d'hydrogène par jour, ainsi qu'un espace de stockage et une station de distribution. Les usages envisagés sont des bus avec Île-de-France Mobilités et des bennes à ordures ménagères avec l'EPT Grand Paris Sud Est Avenir, compétent en collecte des déchets.

Les avantages de l'hydrogène

- aucune pollution locale ;
- grande autonomie de fonctionnement, de l'ordre de 600 km ;
- performances routières équivalentes aux véhicules classiques, souplesse d'utilisation ;
- pas de vitesse à passer (moteur électrique) ;
- rapidité du « plein » d'hydrogène, en 3 à 5 minutes ;
- haut rendement de la chaîne de propulsion : pile à combustible et moteur électrique ;
- aucune pollution sonore

17/11/2020

COMMENT RENDRE L'HYDROGÈNE VRAIMENT ÉCOLO ?

Faut-il le rappeler, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie, mais un vecteur énergétique. Ainsi, au même titre que l'électricité, pour disposer d'hydrogène, il faut le fabriquer. Pour que l'hydrogène soit écologique, encore faut-il que les molécules soient produites à partir d'un procédé lui-même écolo… Ce qui est loin d'être le cas aujourd'hui. Et c'est tout l'enjeu des grands plans lancés aux niveaux européen et français.

Aujourd'hui, en France, la production d'hydrogène avoisine les 900 000 tonnes par an. Et son usage est quasiment uniquement industriel, pour la désulfurisation de carburants pétroliers (60 %), la synthèse d'ammoniac principalement pour les engrais (25 %) et la chimie (10 %). A près de 95 %, la production est actuellement réalisée à partir d'énergies fossiles, avec un peu plus de 11 millions de tonnes de carbone produites et 3 % des émissions nationales.

Tout l'enjeu est à la fois de décarboner cette production, pour la rendre « verte » et de faire monter parallèlement en puissance des solutions de production « propres », grâce à l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité en provenance d'énergies renouvelables et, en France, de nucléaire.

L'électrolyse de l'eau a néanmoins un coût aujourd'hui, estimé par l'IPFEN entre 8 et 9 euros par kg produit et distribué (hors taxe). L'objectif et de passer entre 2 et 3 euros le kg, tout en rendant le mix électrique bas-carbone.

Encore de la recherche

Florence Lambert, responsable du CEA-Liten*, souligne que deux axes sont mis en œuvre pour les électrolyseurs. D'une part des unités de 3 MW à 5 MW délocalisées, à proximité des parcs d'énergie renouvelable, afin d'en tirer les surplus de production, ou encore des parcs dédiés, mais tout en raccordant au réseau, afin de bénéficier du mix français bas-carbone. Ce type d'unités existe, avec des électrolyseurs « alcalin » classiques dans l'industrie, et des électrolyseurs PEM (Proton exchange membrane), et leur déploiement monte en puissance. Le coup de pouce du gouvernement devrait booster ce segment. Ces unités permettraient d'alimenter des flottes locales ou encore directement certains industriels.

D'autre part, au niveau national, il y a nécessité à déployer une production massive afin de répondre aux transports lourds (maritime, aérien) et aux besoins des gros industriels consommateurs d'hydrogène. Les électrolyseurs devraient avoir une capacité moyenne de 100 MW. Là, le CEA-Liten travaille sur un plus long terme, avec des travaux sur la technologie réversible d'électrolyse haute température (EHT) – l'électrolyse et la pile à combustible sont en effet deux technologies dont les fonctionnements sont réversibles – et son couplage possible avec des sources de production renouvelables. Avec son atelier pilote, le Liten développe et qualifie des démonstrateurs de taille significative, depuis le stack SOEC/SOFC (Solid Oxide Electrolysis Cell/ Solid Oxyde Fuel Cell) jusqu'au système complet. Les études technico-économiques que le Liten a réalisées avec ses partenaires industriels montrent qu'en optimisant les systèmes de production EHT, ceux-ci pourraient, d'ici 2030, fournir un hydrogène à moins de 2 € par kg. La feuille de route du Liten vise à disposer d'un prototype de 300 kW dès 2023, pour passer à un démonstrateur industriel de 2 MW en 2024, pour un système industriel de 300 MW prêt pour 2026. Objectif : pouvoir déployer à partir de 2030 cette technologie qui fera faire un bond à la filière.

Des industriels en pointe

La France dispose d'au moins deux acteurs dans les électrolyseurs, avec McPhy, spécialisé dans l'électrolyse alcaline sous pression. Historiquement soutenu par EDF Pulse

croissance Holding et le Fonds Ecotechnologies, géré par Bpifrance Investissement, il vient donc de voir entrer à son capital Technip Energies et Chart International à la faveur d'une nouvelle levée de fonds de quelque 180 millions d'euros pour se déployer. La société développe un concept modulaire d'électrolyseurs lui permettant d'être sur l'ensemble des marchés actuels, indique McPhy.

Mais aussi avec Areva H2GEN, leader français de l'électrolyse PEM (Proton exchange membrane), qui vient d'être repris par le groupe GTT (Gaz transport & technigaz), spécialiste des confinements pour le stockage en conditions cryogéniques de gaz liquéfié (GNL), pour miser sur la production d'hydrogène vert.

De premiers appels à projets lancés

En application de la stratégie nationale du gouvernement pour le développement de l'hydrogène décarboné en France, annoncée le 8 septembre dernier, deux appels à projets visant au développement de la filière ont été lancés vendredi 23 octobre.

Un premier appel à projets concerne les « Briques technologiques et démonstrateurs ». Il est financé par le Programme d'investissements d'avenir (PIA) de l'Etat et opéré par l'Ademe (agence de la transition écologique) et s'adresse principalement aux entreprises.

Il vise à développer ou améliorer les composants et systèmes liés à la production et au transport d'hydrogène. Il pourra notamment soutenir des pilotes et démonstrateurs d'envergure (supérieur à 20 MW) sur le territoire national, permettant à la filière industrielle de l'hydrogène de développer de nouvelles solutions et de se structurer.

Il concerne également les usages de l'hydrogène tels que les applications de transport ou de fourniture d'énergie, ou encore la conception et le développement de nouveaux véhicules notamment pour le transport routier de marchandises et le ferroviaire.

Le deuxième appel à projets mise sur les « Ecosystèmes territoriaux hydrogène » de l'Ademe et soutient des investissements de production et de distribution d'hydrogène renouvelable ou décarboné, pour des usages industriels et en mobilité, en particulier dans le domaine des utilitaires et des transports lourds (collectifs ou de marchandise). Il a pour objectif de faire émerger des consortiums réunissant sur un même territoire collectivités et industriels pour porter des écosystèmes de grande envergure favorisant des économies d'échelle. C'est clairement un coup de pouce pour les « petites » unités alimentées par des énergies renouvelables à l'échelle locale.

**CEA-Liten : Laboratoire des innovations pour les technologies des énergies nouvelles du Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*

13/11/2020

POUR ALLER PLUS LOIN

LA MANCHE VEUT CONSOLIDER L'ÉCOSYSTÈME HYDROGÈNE TERRITORIAL

Le département de la Manche cherche à consolider son écosystème hydrogène territorial. Il s'inscrit également dans une démarche plus globale à l'échelle du Grand Ouest pour consolider les initiatives locales et faire émerger un écosystème de mobilité hydrogène. Décryptage.

Le département de la Manche s'investit particulièrement dans la mobilité hydrogène depuis 2015. Il vient de lancer une *« Charte H2 Manche »* afin d'accompagner les entreprises de son territoire dans la découverte de ce vecteur énergétique. Le département veut ainsi susciter l'intérêt local en vue de fixer ses objectifs de déploiement d'infrastructures. *« Si une entreprise s'intéresse à l'hydrogène, en signant la Charte H2 Manche, elle pourra être renseignée sur l'infrastructure prévue localement, l'autonomie et le coût d'un véhicule, les possibilités d'achat groupés et d'aides financières »*, prévient Matthieu Guesné, fondateur et PDG du producteur d'hydrogène Lhyfe.

Après avoir porté des projets sur les véhicules légers et les vélos, le département de la Manche porte désormais le projet ETHyR CoManche pour faire émerger une mobilité poids lourds dans le département. Dans le cadre de ce projet, Lhyfe a été retenu pour construire le site de production d'hydrogène qui alimentera trois nouvelles stations de distribution. « *L'hydrogène doit être produit localement, selon des énergies locales adaptées au territoire,* déclare Matthieu Guesné. *En Vendée où nous construisons actuellement notre premier site de production d'hydrogène et pour notre site à venir dans la Manche, l'hydrogène est obtenu par électrolyse de l'eau à partir d'énergie éolienne. »*

Construire un écosystème hydrogène dans le Grand Ouest

Le projet ETHyR CoManche n'est pas qu'un projet local. Il joue le rôle de pivot entre régions du Grand Ouest pour développer une cohérence territoriale de l'écosystème hydrogène sur l'ensemble du territoire. Il fait ainsi partie intégrante du projet « Vallée Hydrogène Grand Ouest », rassemblant les projets locaux des régions Bretagne, Pays-de-la-Loire et Normandie. Lhyfe, acteur clé du projet local ETHyR CoManche, fait également partie des coordinateurs de ce consortium.

Vallée Hydrogène Grand Ouest (VHyGO) joue un rôle structurant pour le développement de l'infrastructure nécessaire à la mobilité hydrogène. *« Il faut désormais changer d'échelle,* assure Matthieu Guesné. *Les collectivités locales qui portent les projets doivent travailler ensemble pour construire des plans de déploiement de véhicules et de stations cohérents. »*

L'ambition de VHyGO consiste à regrouper assez d'acteurs et d'initiatives locales pour commander ensemble un nombre important de véhicules à prix négocié, principalement dans la mobilité lourde. *« L'objectif est d'arriver à des commandes autour d'une centaine d'unités par type de véhicules »*, partage Matthieu Guesné.

Cette mise en relation permettra aussi de mutualiser les infrastructures pour développer des sites de production locaux d'hydrogène par électrolyse de l'eau. Il sera enfin possible de mailler le territoire avec des stations-service délivrant cet hydrogène. *« De Brest à Orléans et de Cherbourg à Bordeaux, les collectivités doivent se parler pour grouper les commandes de véhicules et planifier l'installation d'électrolyseurs »*, défend Matthieu Guesné.

L'hydrogène devient un pari politique

En 2018, le plan hydrogène du ministre de la transition Nicolas Hulot était doté de 100 millions d'euros. Le premier ministre Jean Castex a annoncé début septembre 2020 une nouvelle stratégie hydrogène consacrant 7 milliards d'euros au développement de la filière d'ici 2030, dont 2 milliards d'euros dès le plan de relance, pour les deux prochaines années. La Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné se fixe un objectif d'installation de 6,5 gigawatts d'électrolyseurs d'ici 2030 pour apporter une contribution significative à la décarbonation de l'économie et construire une filière industrielle française de l'électrolyse. Le développement d'une offre de mobilité lourde et des projets territoriaux d'envergure mutualisant les usages, comme le projet VHyGO, constitue une priorité.

Le plan de relance allemand consacre pour sa part 9 des 130 milliards d'euros de son plan de relance pour devenir le numéro un mondial de l'hydrogène d'ici 2030. Lhyfe se félicite du développement de l'intérêt national et international pour l'hydrogène. Alors que son premier site de production en Vendée devrait être mis en service en mai 2021, une quarantaine de sites utilisant sa technologie modulaire de production d'hydrogène grâce aux énergies renouvelables sont déjà en développement en France et en Europe.

12/11/2020

POUR L'AIE, IL FAUT ACCÉLÉRER DANS LES TECHNOLOGIES PROPRES ET LE MARCHÉ NE FERA PAS TOUT !

L'Agence internationale de l'énergie a rendu public le 10 septembre son dernier rapport complet sur les nouvelles technologies de l'énergie (NTE 2020, en initiales anglaises). Le message est basique : il faut accélérer et le marché ne fera pas tout seul. Pour cela, une implication des gouvernements est nécessaire.

« Aujourd'hui, je suis de plus en plus optimiste quant à l'avenir de l'énergie propre dans le monde, malgré les graves défis auxquels nous sommes confrontés. La PTE-2020 montre que nous savons ce qu'il faut faire pour développer et déployer les technologies qui peuvent placer les émissions sur une voie durable », indique Fatih Birol, le directeur général de l'AIE dans l'introduction du rapport.

Le rapport de l'AIE sur les nouvelles technologies de l'énergie insiste : *« Pour parvenir à des émissions nettes nulles, il faut transformer radicalement la manière dont nous fournissons, transformons et utilisons l'énergie. La croissance rapide de l'éolien, du solaire et des véhicules électriques a montré le potentiel des nouvelles technologies d'énergie propre pour réduire les émissions ».*

Néanmoins, *« l'objectif d'émissions nettes zéro nécessitera le déploiement de ces technologies à une bien plus grande échelle, parallèlement au développement et au déploiement massif de nombreuses autres solutions d'énergie propre qui en sont actuellement à un stade de développement plus précoce, telles que les nombreuses applications de l'hydrogène et du captage du carbone. »*

L'AIE présente un scénario « développement durable » qui permet d'atteindre ces objectifs pour le système énergétique à l'horizon 2070, soit 20 ans après les objectifs 2050 visés par l'accord de Paris. Mais elle passe également en revue quelque 800 options technologiques afin de voir ce qu'il faudrait faire pour atteindre cet objectif dès 2050.

L'électricité à la rescousse

« L'extension de l'utilisation de l'électricité à un plus grand nombre de secteurs de l'économie est le facteur qui contribue le plus à l'obtention d'émissions nettes nulles », rapporte l'AIE. Cependant, la transformation du seul secteur de l'électricité ne permettrait au monde de parcourir qu'un tiers du chemin vers des émissions nettes zéro.

Ce n'est pas sans enjeux, puisque dans le scénario de développement durable, *« la demande finale d'électricité fait plus que doubler »* pour répondre aux usages : alimenter les voitures, les bus et les camions, produire des métaux recyclés et fournir de la chaleur à l'industrie, et fournir l'énergie nécessaire au chauffage, à la cuisson et aux autres appareils dans les bâtiments, insiste le rapport.

En outre, pour atteindre des émissions nettes nulles en 2050, il faudrait déployer beaucoup plus rapidement la production d'électricité à faible teneur en carbone. Dans le scénario « d'innovation accélérée », la production d'électricité serait environ 2,5 fois plus élevée en 2050 qu'aujourd'hui, soit un taux de croissance équivalent à l'ajout de l'ensemble du secteur électrique américain tous les trois ans. Les ajouts annuels de capacité d'électricité renouvelable, quant à eux, devraient être, en moyenne, quatre fois supérieurs au record actuel, qui a été atteint en 2019.

Mais l'électricité ne peut tout seule

L'électricité seule ne pourra cependant pas répondre à tous les enjeux. Ainsi, l'AIE juge que l'hydrogène doit permettre d'étendre la portée de l'électricité. Là encore, avec une

montée en puissance des besoins. *« Une grande quantité de production supplémentaire est nécessaire pour l'hydrogène à faible teneur en carbone. La capacité mondiale des électrolyseurs, qui produisent de l'hydrogène à partir de l'eau et de l'électricité, passe de 0,2 GW aujourd'hui à 3 300 GW dans le scénario de développement durable »*. Et pour atteindre le niveau nécessaire pour aboutir à des émissions nettes nulles, ces électrolyseurs consommeraient deux fois la quantité d'électricité que la République populaire de Chine produit aujourd'hui…

Développer le CCS et les bioénergies

L'AIE revient ainsi à la charge sur le captage et stockage du carbone (CCS) et les bioénergies qui doivent pouvoir jouer des rôles multiples. *« Le captage des émissions de CO2 en vue de les utiliser de manière durable ou de les stocker est une technologie cruciale pour atteindre des émissions nettes nulles »*, insiste l'agence de l'OCDE.

« Dans le scénario de développement durable, le CCS est utilisé pour la production de carburants synthétiques à faible teneur en carbone et pour éliminer le CO2 de l'atmosphère. Elle est également essentielle pour produire une partie de l'hydrogène à faible teneur en carbone nécessaire pour atteindre des émissions nettes nulles, principalement dans les régions disposant de ressources en gaz naturel à faible coût et d'un stockage de CO2 disponible. », rappelle le rapport.

En outre, il faut dans le même temps multiplier par trois par rapport aux niveaux actuels le recours aux bioénergies modernes, à la fois pour remplacer directement les combustibles fossiles (biocarburants pour le transport) ou pour compenser indirectement les émissions par son utilisation combinée avec le CCS.

In fine, indique l'AIE, alors que *« la sécurité du système énergétique mondial actuel repose en grande partie sur la maturité des marchés mondiaux des trois principaux combustibles – charbon, pétrole et gaz naturel – qui représentent ensemble environ 70 % de la demande énergétique finale mondiale »*, demain *« l'électricité, l'hydrogène, les combustibles synthétiques et la bioénergie »* doivent représenter une part de la demande similaire à celle des combustibles fossiles dans le scénario de développement durable.

Rôle des gouvernements

« Le succès spectaculaire de l'énergie solaire photovoltaïque, qui est devenue la source d'énergie la moins chère dans de nombreuses économies, et l'essor impressionnant de l'éolien en mer démontrent la capacité des technologies énergétiques propres à percer si les gouvernements mettent en place les politiques adéquates pour soutenir leur expansion », insiste le directeur générale de l'agence de l'OCDE.

Si les marchés sont essentiels pour mobiliser des capitaux et catalyser l'innovation, ils ne permettront pas à eux seuls d'atteindre un niveau d'émissions nettes zéro, martèle le rapport NTE 2020. Les gouvernements ont un rôle énorme à jouer dans le soutien des transitions vers des émissions nettes zéro. Et l'AIE d'estimer que *« pour être efficaces, les outils politiques doivent porter sur cinq domaines essentiels : s'attaquer aux émissions des actifs existants ; renforcer les marchés des technologies à un stade précoce de leur adoption ; développer et mettre à niveau les infrastructures qui permettent le déploiement des technologies ; renforcer le soutien à la recherche, au développement et à la démonstration et enfin développer la collaboration technologique internationale »*.

Optimiste, Fatih Birol signale que *« de plus en plus de gouvernements dans le monde entier soutiennent les technologies énergétiques propres dans le cadre de leurs plans de relance économique en réponse à la crise Covid-19, comme l'ont clairement indiqué les 40 ministres qui ont participé au sommet de l'AIE sur les transitions en matière d'énergie propre le 9 juillet 2020. »*

09/10/2020

AIRBUS DÉVOILE SES CONCEPTS D'AVION ZÉRO ÉMISSION À HYDROGÈNE

Airbus veut mettre sur les pistes le premier avion commercial zéro émission en 2035. L'entreprise fait le pari de l'hydrogène et dévoile trois concepts d'avions.

L'avion zéro émission carburera à l'hydrogène pour Airbus. L'entreprise vient de dévoiler trois concepts d'avion préfigurant le premier avion commercial zéro émission au monde. Trois concepts qui permettront d'explorer différentes pistes technologiques et configurations aérodynamiques. Nom de code de ces concepts : « ZEROe », pour « zéro émission ». Sa feuille de route prévoit un premier démonstrateur au sol en 2021, un vol de démonstration en 2023 et la sélection de la technologie d'ici 2024.

Airbus estime que l'hydrogène est la solution la plus prometteuse comme carburant aéronautique pour atteindre les objectifs de neutralité climatique. Remplacer le kérosène par l'hydrogène demande toutefois de repenser l'architecture de l'avion. En effet, l'hydrogène demande un volume de stockage quatre fois plus grand que le kérosène pour fournir la même énergie. En plus, il nécessite d'être refroidi à près de -253°C pour être liquide.

Un turboréacteur, un turbopropulseur et un fuselage intégré

L'hydrogène peut directement être utilisé dans une turbine à gaz modifiée ou être converti en électricité grâce à une pile à combustible. Airbus prévoit d'allier ces deux solutions sur ses avions. Ainsi, un premier concept de turboréacteur pouvant embarquer entre 20 et 200 passagers imagine une turbine à gaz modifiée fonctionnant à l'hydrogène. Il serait capable d'effectuer des vols intercontinentaux de plus de 3 500 km. Les réservoirs d'hydrogène liquide sont situés derrière la cloison étanche arrière.

Le deuxième concept de turbopropulseur serait capable d'embarquer jusqu'à 100 passagers. Son moteur turbopropulseur serait également alimenté par la combustion d'hydrogène dans des turbines à gaz modifiées. Il serait capable de parcourir plus de 1 800 km.

Le dernier concept repense complètement l'architecture de l'avion afin d'offrir de multiples possibilités pour le stockage et la distribution d'hydrogène. Son fuselage intégré permettrait d'embarquer jusqu'à 200 passagers et repense l'aménagement de la cabine. Il pourrait également parcourir près de 1 800 km.

« Nous avons 3 architectures d'avion différentes, mais il est trop tôt pour prédire laquelle sortira gagnante », prévient Jean-Brice Dumont, directeur de l'ingénierie chez Airbus. L'entreprise souhaite jouer le rôle de chef de fil pour la transition de l'écosystème aéronautique. Avec l'hydrogène, les aéroports auront par exemple besoin de nouvelles infrastructures de transport et de ravitaillement pour répondre aux besoins des opérations quotidiennes.

22/09/2020

AMÉLIORER LA DURÉE DE VIE DES PILES À HYDROGÈNE PAR ÉLECTRO-CATALYSE SÉLECTIVE

Lorsqu'une voiture à hydrogène n'est pas en fonctionnement, des problèmes de corrosion surviennent au sein de la pile à combustible, ce qui réduit à la fois ses performances et sa durée de vie. Des chercheurs coréens ont trouvé une solution pour résoudre en partie ce problème.

Les arrêts et redémarrages répétitifs des véhicules fonctionnant à l'hydrogène provoquent de sévères réactions de corrosion au niveau de la cathode de la pile à combustible. Pour quelles raisons ? Parce qu'en cas d'arrêt du moteur, de l'air s'introduit à l'anode et la corrosion des éléments cathodiques s'accélère alors que le potentiel à la cathode grimpe instantanément.

Le catalyseur développé par l'équipe de chercheurs coréens favorise l'oxydation de l'hydrogène et supprime les réactions de réduction de l'oxygène (ORR) de manière sélective.

Une solution basée sur le phénomène de transition métal isolant

La transition métal isolant (*en anglais, Metal Insulator Transition ou MIT*), est un phénomène qui se produit lorsqu'un matériau passe de l'état conducteur à l'état isolant sous l'effet de modifications de son environnement. Le trioxyde de tungstène (WO3), par exemple, a la capacité d'augmenter sa conductivité lorsqu'il capte un proton et de repasser à l'état isolant lorsque la pression d'oxygène augmente.

Pour exploiter cette propriété, l'équipe de chercheurs de Pohang University of Science and Technology (POSTECH) a ainsi développé un catalyseur Pt/HxWO3 qui combine du platine et un bronze de tungstène et d'hydrogène.

Le mécanisme est le suivant :

- en utilisation normale, l'état conducteur (H-WO3) est maintenu par l'insertion d'un proton ;
- lorsque le contact est coupé, de l'air s'introduit, faisant augmenter la pression d'oxygène. L'état isolant WO3 réapparaît, ce qui stoppe la réaction à l'électrode et résout le problème de corrosion cathodique.

Des résultats encourageants

Ces travaux, développés en détail dans un article publié le 29 juin 2020 dans la revue Nature Catalysis *[1]* semblent encourageants. En effet, grâce à cette réaction d'oxydation sélective de l'hydrogène initiée par le catalyseur Pt/HxWO3, la durée de vie est multipliée par un facteur 2, en comparaison avec l'utilisation de catalyseurs conventionnels de type Pt/C.

Le professeur Yong-Tae Kim, responsable de cette étude estime ainsi que *« ces recherches améliorent considérablement la durée de vie des piles à combustible destinées aux automobiles. »*

D'après l'article du 13 juillet 2020, publié sur le site de POSTECH

Pour en savoir plus :

[1] Jung, S., Yun, S., Kim, J. et al. Selective electrocatalysis imparted by metal–insulator transition for durability enhancement of automotive fuel cells. Nat Catal 3, 639–648 (2020).

07/10/2020

TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Gagnez du temps et sécurisez vos projets en utilisant une source actualisée et fiable

RÉDIGÉE ET VALIDÉE PAR DES EXPERTS

MISE À JOUR PERMANENTE

100 % COMPATIBLE SUR TOUS SUPPORTS NUMÉRIQUES

SERVICES INCLUS DANS CHAQUE OFFRE

- + de 340 000 utilisateurs chaque mois
- + de 10 000 articles de référence et fiches pratiques
- Des Quiz interactifs pour valider la compréhension

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES

Questions aux experts*
Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent

Articles Découverte
La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre

Dictionnaire technique multilingue
45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand

Archives
Technologies anciennes et versions antérieures des articles

Info parution
Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

Les offres Techniques de l'Ingénieur

INNOVATION
- Éco-conception et innovation responsable
- Nanosciences et nanotechnologies
- Innovations technologiques
- Management et ingénierie de l'innovation
- Smart city – Ville intelligente

MATÉRIAUX
- Bois et papiers
- Verres et céramiques
- Textiles
- Corrosion – Vieillissement
- Études et propriétés des métaux
- Mise en forme des métaux et fonderie
- Matériaux fonctionnels. Matériaux biosourcés
- Traitements des métaux
- Élaboration et recyclage des métaux
- Plastiques et composites

MÉCANIQUE
- Frottement, usure et lubrification
- Fonctions et composants mécaniques
- Travail des matériaux – Assemblage
- Machines hydrauliques, aérodynamiques et thermiques
- Fabrication additive – Impression 3D

ENVIRONNEMENT – SÉCURITÉ
- Sécurité et gestion des risques
- Environnement
- Génie écologique
- Technologies de l'eau
- Bruit et vibrations
- Métier : Responsable risque chimique
- Métier : Responsable environnement

ÉNERGIES
- Hydrogène
- Ressources énergétiques et stockage
- Froid industriel
- Physique énergétique
- Thermique industrielle
- Génie nucléaire
- Conversion de l'énergie électrique
- Réseaux électriques et applications

GÉNIE INDUSTRIEL
- Industrie du futur
- Management industriel
- Conception et production
- Logistique
- Métier : Responsable qualité
- Emballages
- Maintenance
- Traçabilité
- Métier : Responsable bureau d'étude / conception

ÉLECTRONIQUE – PHOTONIQUE
- Électronique
- Technologies radars et applications
- Optique – Photonique

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION
- Sécurité des systèmes d'information
- Réseaux Télécommunications
- Le traitement du signal et ses applications
- Technologies logicielles – Architectures des systèmes
- Sécurité des systèmes d'information

AUTOMATIQUE – ROBOTIQUE
- Automatique et ingénierie système
- Robotique

INGÉNIERIE DES TRANSPORTS
- Véhicule et mobilité du futur
- Systèmes aéronautiques et spatiaux
- Systèmes ferroviaires
- Transport fluvial et maritime

MESURES – ANALYSES
- Instrumentation et méthodes de mesure
- Mesures et tests électroniques
- Mesures mécaniques et dimensionnelles
- Qualité et sécurité au laboratoire
- Mesures physiques
- Techniques d'analyse
- Contrôle non destructif

PROCÉDÉS CHIMIE – BIO – AGRO
- Formulation
- Bioprocédés et bioproductions
- Chimie verte
- Opérations unitaires. Génie de la réaction chimique
- Agroalimentaire

SCIENCES FONDAMENTALES
- Mathématiques
- Physique Chimie
- Constantes physico-chimiques
- Caractérisation et propriétés de la matière

BIOMÉDICAL – PHARMA
- Technologies biomédicales
- Médicaments et produits pharmaceutiques

CONSTRUCTION ET TRAVAUX PUBLICS
- Droit et organisation générale de la construction
- La construction responsable
- Les superstructures du bâtiment
- Le second œuvre et l'équipement du bâtiment
- Vieillissement, pathologies et réhabilitation du bâtiment
- Travaux publics et infrastructures
- Mécanique des sols et géotechnique
- Préparer la construction
- L'enveloppe du bâtiment
- Le second œuvre et les lots techniques

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com